

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

---



ISSN 2413-1830

**ИЗВЕСТИЯ  
ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА  
ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ**

Том 327, № 8, 2016

ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ

г. Томск

**ИЗВЕСТИЯ  
ТОМСКОГО  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО  
УНИВЕРСИТЕТА.  
ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ**

**Редакционная коллегия**

Дьяченко А.Н., гл. редактор, д-р техн. 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)  
Кирыанова 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, 2016

**УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!**

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

Учредителем является Томский политехнический университет.

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

ISSN (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
- Прикладные задачи технологий георесурсов.

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

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

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

Окончательное решение по публикации статьи принимает главный редактор журнала.

Все материалы размещаются в журнале на бесплатной основе.

Журнал издается ежемесячно.

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

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



ISSN 2413-1830

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

Volume 327, № 8, 2016

TPU  PUBLISHING

Tomsk

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

**Editorial Board**

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

© Tomsk Polytechnic University, 2016

**AIMS AND SCOPES**

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

The journal was founded in 1903.

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

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;
- Applied Aspects of Geo Assets technologies.

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

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

The publication of manuscripts is free of charge.

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



## СОДЕРЖАНИЕ

- Хромититы Харчерузского блока массива Сыум-Кеу: вещественный состав и генезис руд (Полярный Урал)**  
Юричев А.Н., Чернышов А.И.
- Особенности определения места повреждения (ОМП) в кабельно-воздушной линии постоянного тока**  
Иванова Е.А., Лозинова Н.Г.
- Расчетно-экспериментальное исследование кавитационного обтекания гидрокрыла НАСА0015**  
Сентябов А.В., Тимошевский М.В., Первунин К.С., Гаврилов А.А., Маркович Д.М., Дектерев А.А.
- Использование нейронной сети для построения краткосрочного прогноза электропотребления ООО «Омская энергосбытовая компания»**  
Потапов В.И., Грицай А.С., Тюнков Д.А., Синицин Г.Э.
- Метод автоматизации оценки индексов подстилающей поверхности и их изменения во времени по космическим изображениям и его применение при оценке состояния окружающей среды в окрестности полигонов твердых бытовых отходов**  
Казарян М.Л., Рихтер А.А., Шахраманьян М.А.
- Палеоклиматические факторы реконструкции термической истории нефтематеринской баженовской свиты Арктического региона Западной Сибири**  
Искоркина А.А.
- Редкоземельные элементы в позднепалеозойских углях Северной Азии (Сибирь, Северный Китай, Монголия, Казахстан)**  
Арбузов С.И., Ильенок С.С., Машенькин В.С., Юйчжуан Сунь, Цунлян Жао, Блохин М.Г., Иванов В.В., Зарубина Н.В.
- Повышение запаса динамической устойчивости автономной энергетической системы на базе ветроэнергетических установок при резких изменениях режима нагрузки**  
Удалов С.Н., Ачитаев А.А., Приступ А.Г., Боченко В.М.
- Некоторые особенности геологического строения и золотой минерализации рудопроявления Южное (Енисейский Кряж)**  
Мансуров Р.Х.
- Влияние техногенеза на формирование элементного состава волос детского населения**  
Наркович Д.В., Барановская Н.В., Коваль Е.В., Корогод Н.П.

## CONTENTS

- 6 Chromitites of Kharcheruz block of Syum-Keu massif: ore composition and genesis (Polar Ural)**  
Yurichev A.N., Chernyshov A.I.
- 17 Line fault location features in the HVDC lines containing cable and overhead segments**  
Ivanova E.A., Lozinova N.G.
- 28 Numerical and experimental investigation of cavitation flow around NACA0015 hydrofoil**  
Sentyabov A.V., Timoshevskiy M.V., Pervunin K.S., Gavrilov A.A., Markovich D.M., Dekterev A.A.
- 44 Using neural network for building short-term forecast of electricity load of LLC «Omsk Energy Retail Company»**  
Potapov V.I., Gritsay A.S., Tyunkov D.A., Sinitin G.E.
- 52 Method for automating estimation of surface indices and their time changes using space images. Application of the method in assessing the environment state in the vicinity of solid waste landfills**  
Kazaryan M.L., Rikhter A.A., Shakhramanyan M.A.
- 59 Paleoclimate factors of reconstructing thermal history of the petromaternal bazhenov suite of the Arctic region in Western Siberia**  
Iskorkina A.A.
- 74 Rare earth elements in the late Paleozoic coals of North Asia (Siberia, Northern China, Mongolia, Kazakhstan)**  
Arbuzov S.I., Ilenok S.S., Mashenkin V.S., Yuzhuang Sun, Cunliang Zhao, Blokhin M.G., Ivanov V.V., Zarubina N.V.
- 89 Increase of dynamic stability stoke of autonomus energy system based on wind energy installtions under sudden load change**  
Udalov S.N., Achitayev A.A., Pristup A.G., Bochenkov B.M.
- 99 Certain features of geological structure and gold mineralization of the ore occurrence Yuzhnoe (Yenisei ridge)**  
Mansurov R.Kh.
- 116 Influence of technogenesis on forming element composition of children's hair**  
Narkovich D.V., Baranovskaya N.V., Koval E.V., Korogod N.P.

УДК 552.321.6:553.08

## ХРОМИТИТЫ ХАРЧЕРУЗСКОГО БЛОКА МАССИВА СЫУМ-КЕУ: ВЕЩЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ И ГЕНЕЗИС РУД (ПОЛЯРНЫЙ УРАЛ)

Юричев Алексей Николаевич<sup>1</sup>,  
juratur@sibmail.com

Чернышов Алексей Иванович<sup>1</sup>,  
aich@ggf.tsu.ru

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

**Актуальность работы** обусловлена необходимостью детального петрологического исследования слабо изученных ультрабазитовых массивов России с позиции их потенциальной рудоносности на хромитовое оруденение, являющееся в настоящее время остродефицитным сырьем для государства.

**Цель работы:** характеристика петрографических особенностей и химизма хромититов Харчерузского блока массива Сыум-Кеу с целью реконструкции эволюции вещественного состава рудных хромшпинелидов в процессе формирования пород и их последующих метаморфических изменений, геодинамической обстановки формирования исследуемого объекта.

**Методы исследования:** изучение силикатных и рудных минералов в прозрачных шлифах и аншлифах на поляризационном микроскопе AxioScope Carl Zeiss; оценка химического состава хромшпинелидов на электронном сканирующем микроскопе Tescan Vega II LMU, оборудованном энергодисперсионным спектрометром (с детектором Si (Li) Standard) INCA Energy 350 и волнодисперсионным спектрометром INCA Wave 700.

**Результаты.** Впервые предпринята попытка детально охарактеризовать хромититы, выявленные среди дунитов в пределах слабоизученного Харчерузского блока массива Сыум-Кеу. По количественной роли хромшпинелидов они разделены на три разновидности: вкрапленные, густовкрапленные и сливные. По текстурным особенностям выделены рассланцованные хромититы, которые являются продуктом пластического течения. По химическому составу рудные хромшпинелиды представлены хромитами и алюмохромитами и обнаруживают единый линейный эволюционный тренд, отражающий преобразование их вещественного состава под действием высокобарического динамометаморфизма. Данный процесс сопровождался выносом из хромшпинелидов магния и алюминия и увеличением их хромистости, что приводило к естественному «облагораживанию» последних. Вторая стадия преобразования, связанная с более поздними процессами наложенного регионального метаморфизма, несущественно повлияла на химический состав рудных хромшпинелидов и связана с незначительным переходом закисного железа в окисное. Изученные хромшпинелиды отвечают минералам верхнемантийного субстрата с высокой степенью частичного плавления (29...40 %), которое происходило в зоне спрединга, расположенного рядом с горячей точкой. В дальнейшем в островодужной системе эта аномальная океаническая литосферная мантия подверглась взаимодействию с бонинитовыми расплавами, инициированными субдукцией, что привело к появлению дунитов и хромититов с явными характеристиками надсубдукционных перидотитов.

### Ключевые слова:

Реститы, ультрамафиты, хромититы, хромшпинелиды, химизм, генезис, геодинамическая обстановка.

### Введение

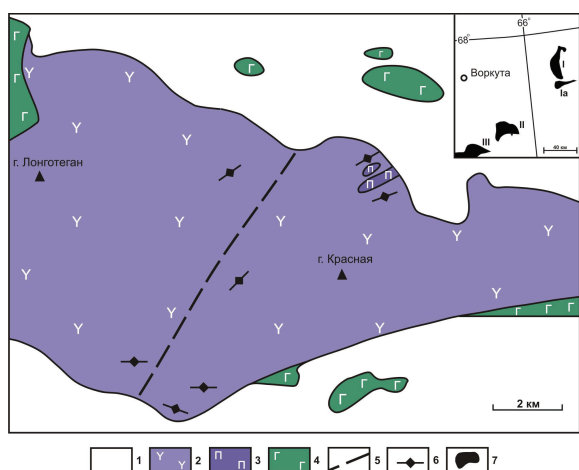
Ультрамафиты офиолитовых комплексов вызывают интерес геологов как с позиции генезиса, учитывая их мантийную природу образования и связь с ранними этапами развития складчатых сооружений, так и с позиции рудоносности. Они являются источником рудных и нерудных полезных ископаемых – Cr, ЭПГ, Au, Co, Ni, асбеста, брусита, магнезита, змеевика и др. Внимание к объектам данного типа, как единственным источникам хромитового сырья, в России резко возросло после распада СССР, когда крупнейшие в мире хромитовые месторождения в офиолитовых комплексах Южного Урала отошли Казахстану и государство столкнулось с острым дефицитом легирующих добавок для черной металлургии.

Харчерузский блок до настоящего времени остается малоизученным в отличие от основного тела массива Сыум-Кеу, в котором ранее проведены детальные петрологические исследования [1–4]. В данной статье рассматриваются петрографические особенности и химизм хромититовых тел, вы-

явленных в пределах Харчерузского блока, а также предпринимается попытка проследить эволюцию вещественного состава хромшпинелидов на стадии формирования пород и их последующего метаморфического преобразования, смоделировать геодинамическую обстановку формирования исследуемого объекта.

### Краткая геологическая характеристика исследуемого объекта

Харчерузский блок ультрамафитового массива Сыум-Кеу является южным фрагментом Хадатинского офиолитового пояса, который замыкает на севере офиолитовые комплексы Полярного Урала (рис. 1) [5]. Согласно геолого-геофизическим данным, полученным при проведении групповой геологической съемки масштаба 1:50000 (по данным А.К. Афанасьева, 1984 г.), он представлен самостоятельным телом, отделенным от более крупного ультрамафитового массива Сыум-Кеу метаморфизованными габбро и амфиболитами, и, вероятно, является эрозивно-тектоническим клипом от данного массива.



**Рис. 1.** Геологическое строение Харчерузского блока массива Сьум-Кей и его географическое положение в структуре Полярного Урала: 1 – четвертичные отложения; 2 – дуниты, гарцбургиты; 3 – верлиты, клинопироксениты; 4 – габброиды; 5 – геологический разлом; 6 – залегание хромитовых тел; 7 – массивы ультрамафитов: I – Сьум-Кей (Ia – Харчерузский блок), II – Рай-Из, III – Войкарский

**Fig. 1.** Geological structure of Kharcheruz block of Syum-Keu massif and its geographical position in structure of the Polar Urals: 1 are the quaternary deposits; 2 are the dunites, harzburgites; 3 are the wehrlites, clinopyroxenites; 4 are the gabbro; 5 is the geological fault; 6 is the position of chromite bodies; 7 are the ultramafic masses: I – Syum-Keu (Ia – Kharcheruz block), II – Rai-Iz, III – Voykarsky

Морфологически Харчерузский блок представляет собой клинообразное тело субширотного простирания, которое выклинивается на восток, его протяженность составляет ~18 км, при максимальной ширине в западной части 7 км (рис. 1). Массив разделен разломом северо-восточного простирания на западную и восточную части и сложен, главным образом, дунитами, среди которых очень редко встречаются гарцбургиты. Отмечаются также мелкие тела габброидов, обычно интенсивно метасоматически измененные. В экзоконтактовых зонах габброидов устанавливаются верлиты и клинопироксениты, которые, вероятно, являются высокотемпературными реакционно-метасоматическими образованиями.

Дуниты имеют средне-, крупнозернистое строение и часто обладают «свежим» неизмененным обликом со светло-желтой корочкой выветривания. Реже они в различной степени серпентинизированы и часто тремолитизированы. Черные зерна хромшпинелидов отчетливо выделяются на светло-желтых корочках выветривания и наблюдаются в виде спорадической, очень редкой, мелкой акцессорной вкрапленности. Их содержание обычно менее 1 %, редко в участках сегрегации до 5...10 %, в рудных зонах их содержание существенно возрастает.

Среди дунитов выявлены линейные и линзообразные тела хромититов, имеющие преимуще-

ственно субширотное простирание. Мощность отдельных тел обычно менее 1 м при протяженности до 10 м. Рудные тела нередко группируются в рудные субширотные зоны, в которых количество хромшпинелидов существенно возрастает и может значительно варьировать – от 10 до 50...90 %, с образованием от убоговкрапленных до густовкрапленных и сплошных руд. Иногда в рудных зонах отмечается полосчатое строение, обусловленное различной концентрацией хромшпинелидов. Ширина отдельных полос обычно 0,5...2,0 м. Полосчатость ориентирована диагонально к простиранию рудных зон и согласно с кливажом пластического течения северо-восточного простирания.

Ультрамафиты блока претерпели интенсивные пластические деформации и постоянно обнаруживают признаки метаморфических пород в виде уплощенности зерен оливина, а также кливажа пластического течения, представленного очень тонкой плитчатой отдельностью [4, 6].

#### Методика исследования

Петрографическое изучение хромититов Харчерузского блока осуществлялось в проходящем и отраженном свете на поляризационном микроскопе Axioscop 40 Pol. Анализ их вещественного состава выполнен методом рентгеноспектрального микроанализа [7] на электронном сканирующем микроскопе «Tescan Vega II LMU», оборудованном энергодисперсионным спектрометром (с детектором Si (Li) Standard) INCA Energy 350 и волнодисперсионным спектрометром INCA Wave 700 в ЦКП «Аналитический центр геохимии природных систем» ТГУ (г. Томск). Для этого из отобранных образцов хромититов с разной степенью вкрапленности были изготовлены плоскопараллельные шлифы толщиной 3...4 мм по рекомендуемым методикам [7]. Перед проведением анализов на исследуемые поверхности предварительно напыляли слой углерода толщиной 25...30 нм. Последующие расчеты химических составов проводились по программе INCA-Issue 18b и по дополнительным авторским программам.

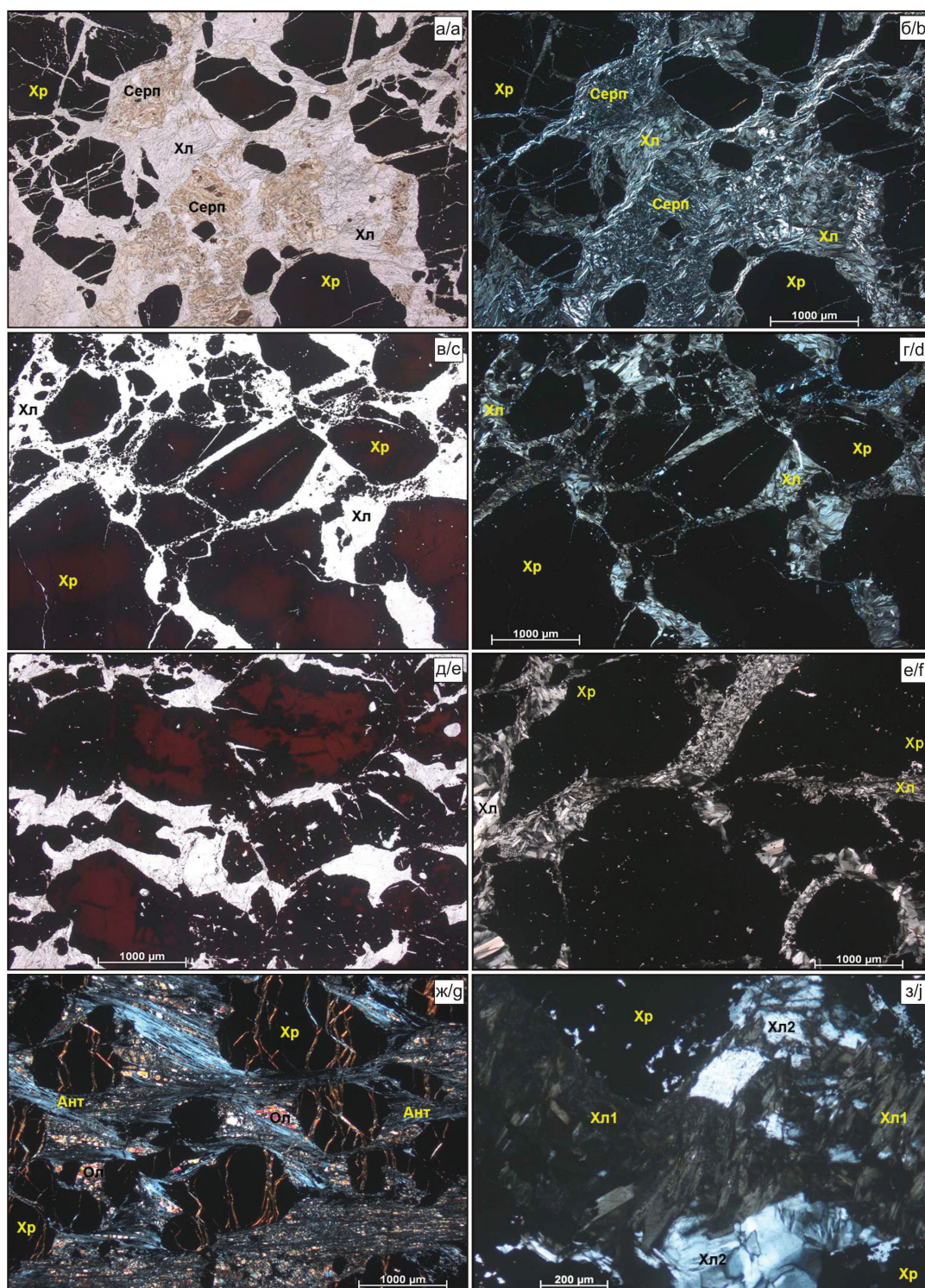
#### Петрографическая характеристика хромититов

Хромититы встречаются редко среди дунитов в виде небольших обособлений. Среди них авторами по количественной роли хромшпинелидов и структуре выделено три разновидности: вкрапленные, густовкрапленные и сливные.

**Хромититы вкрапленные.** Структура мелко-, среднезернистая, текстура однородная, иногда сланцеватая. Часто отмечается трещиноватость. Количественно-минералогический состав: хромшпинелиды ~ 55...60 %, хлорит, антигорит ~ 35...50 %. Отмечаются оливин, лизардит, хризотил, антигорит, тальк, шпинель.

Зерна хромшпинелидов имеют субизометричную, неправильную форму, обычно с плавными, прямолинейными границами (рис. 2, а–б). В слан-





**Рис. 2.** Хромититы Харчерузского блока массива Сьум-Кеу: а-б – вкрапленный, николи параллельны и скрещены соответственно; в-г – густовкрапленный, николи параллельны и скрещены соответственно; д-е – сливной, николи параллельны и скрещены соответственно; ж – вкрапленный сланцеватый, николи скрещены; з – хлорит двух модификаций в сливном хромитите, николи скрещены. Хр – хромшпинелид, Ол – оливин, Серп – серпентинит, Ант – антигорит, Хл – хлорит

**Fig. 2.** Chromitites from Kharcheruz block of Syum-Keu massif: а-б – interspersed, parallel and crossed nicols, respectively; в-г – thickly interspersed, parallel and crossed nicols, respectively; д-е – drain, parallel and crossed nicols, respectively; ж – interspersed shaly, crossed nicols; з – chlorite of two modifications in drain chromitite, nicols are crossed. Хр – chromspinelides, Ол – olivine, Серп – serpentinite, Ант – antigorite, Хл – chlorite

цветатых хромититах зерна имеют округлую, удлиненную и линзовидную форму и ориентированы субпараллельно (рис. 2, ж).

Нередко встречаются дезинтегрированные, раздробленные индивиды с неправильной, угловатой формой. Размер зерен хромшпинелидов изменяется от долей до 4 мм, чаще 1...2 мм. Иногда они образуют между собой тесные срастания. Хромшпинелиды просвечивают темным красно-бурым цветом, а по краям и вдоль трещинок – черным, вследствие замещения магнетитом. Иногда в зернах хромшпинелидов отмечаются субпараллельные трещинки спайности, редко в трех направлениях под углом ~ 60°, с образованием треугольных выколов. В них часто отмечаются мелкие пойкилитовые включения серпентинизированного оливина и хлорита. Зерна хромшпинелидов часто разбиты трещинками, выполненными тонкими поперечно-волокнистыми жилками хризотил-лизардитового состава, при этом волокна хризотила положительные, а лизардита – отрицательные.

Цементирующая масса сложена мелкочешуйчатыми серпентин-хлоритовыми агрегатами с различными количественными сочетаниями минералов на разных участках, иногда вплоть до мономинеральных (рис. 2, а–б). Серовато-бурые серпентиновые агрегаты имеют микрозернистое строение и лизардит-хризотилловый состав. В других случаях цементирующая масса представлена тонкозернистыми агрегатами антигорита, среди которых иногда наблюдаются фрагменты уцелевших зерен оливина. Отмечаются чешуйки хлорита и талька.

Иногда цементирующая гранолепидобластовая масса обнаруживает отчетливо *сланцеватую* текстуру (рис. 2, ж), она плавно огибает вкрапленные зерна хромшпинелидов и придает им форму будин. При этом основная масса преимущественно сложена игольчатыми индивидами антигорита, которые вытягиваются субпараллельно и отражают направление сланцеватости. Среди антигорита отмечаются мелкие, мозаичные зерна оливина с размерами менее 0,1 мм. В основной массе также отмечается тонкая вкрапленность магнетита с размерами индивидов менее 0,5 мм, которые, вероятно, возникли в результате дезинтеграции краевых частей зерен хромшпинелидов с последующим их растаскиванием вдоль сланцеватости.

**Хромититы густовкрапленные.** Структура мелко-, среднезернистая, текстура однородная, нередко отмечается интенсивная трещиноватость. Количественно-минералогический состав: хромшпинелиды ~ 75...85 %, оливин, антигорит, хлорит ~ 15...25 %, отмечаются кальцит, брусит.

Хромшпинелиды в одних случаях наблюдаются преимущественно в виде отдельных обособленных зерен, реже в виде их тесных срастаний. Размер зерен составляет 1,0...2,5 мм. Они имеют субизометричную, чаще неправильную форму с плавными границами. В других случаях хромшпинелиды представлены многочисленными разнове-

ликими обломками, которые образовались в результате интенсивного проявления трещиноватости, сопровождающейся дезинтеграцией как отдельных зерен, так и сростков (рис. 2, в–г). Обломки имеют как округлую, так и остроугольную форму, их размер изменяется от долей до 4...5 мм. Трещинки в зернах и обломках часто выполнены тонкими жилками хлорита. Границы индивидов прямолинейные либо округлые, заливообразные. По краям они обычно резорбированы и часто дезинтегрированы на очень мелкие индивиды. Хромшпинелиды имеют вишнево-красный цвет, а по краям и трещинкам – черный, вследствие замещения магнетитом. Мелкие индивиды обычно полностью черные.

Промежутки между зернами, сростками и обломками хромшпинелидов и трещины в них выполнены преимущественно бесцветными агрегатами хлорита (рис. 2, в–г). Нередко в центральных частях интерстиций наблюдаются реликты зерен оливина, замещающиеся магнетитом и игольчатыми индивидами антигорита. Последний часто образует тесные срастания с хлоритом, среди которых наблюдаются редкие мелкие агрегативные скопления кальцита и единичные пластинчатые зерна брусита.

**Хромититы сливные** имеют однородную текстуру с наложенной директивностью, отмечается обильная трещиноватость.

Они представляют собой сливные агрегаты хромшпинелидов, которые разбиты многочисленными субпараллельными трещинками на остроугольные обломки, часто вытянутой формы. Обломки обнаруживают предпочтительную ориентировку и отражают направление наложенной директивности (рис. 2, д–е). Размер обломков по длине до 7...8 мм. Они имеют преимущественно прямолинейные границы, реже округлые. Края их часто резорбированы и нередко дезинтегрированы. Крупные обломки имеют вишнево-красный цвет, либо темный красно-бурый, однако по периферии и трещинкам приобретают черный вследствие замещения магнетитом. Обломки неравномерно насыщены пойкилобластовыми включениями хлорита (менее 0,1 мм), от их почти полного отсутствия до обильных ситовидных выделений.

Трещинки и промежутки между обломками хромититов заполнены хлоритом двух модификаций (рис. 2, з). Первая, ранняя, представлена крипто- и микрозернистыми агрегатами, имеющими зеленовато-серые оттенки. В скрещенных направлениях для них характерны аномально низкие темно-синие и буровато-серые цвета интерференции. Вторая модификация хлорита, очевидно, образовалась в результате перекристаллизации первой с образованием тонко- и мелкозернистых чешуйчатых лепидобластовых бесцветных агрегатов с размером чешуек до 1 мм. Они обычно пластически деформированы (характерны изгибы и многочисленные полосы пластического излома), в скре-



ценных никелях обнаруживают от серого до белого цвета интерференции. Пойкилобластовые включения хлорита в хромититах представлены второй модификацией.

#### Рудная минерализация

Проведенные исследования показывают, что все проанализированные хромшпинелиды в целом характеризуются высокохромистым составом

( $\text{Cr}_2\text{O}_3=49,0\text{...}63,5\%$ ) и очень слабо метаморфизованы. В химическом составе постоянно отмечаются NiO (до 0,21%), ZnO (до 0,38%) и  $\text{V}_2\text{O}_5$  (до 0,22%).

Согласно классификационной диаграмме Н.В. Павлова [8], все рудные хромшпинелиды из густовкрапленных и рассланцованных шпинелидов соответствуют по химическому составу хромитам, а хромшпинелиды из вкрапленных хромититов примерно в равной мере представлены алюмохромитом и

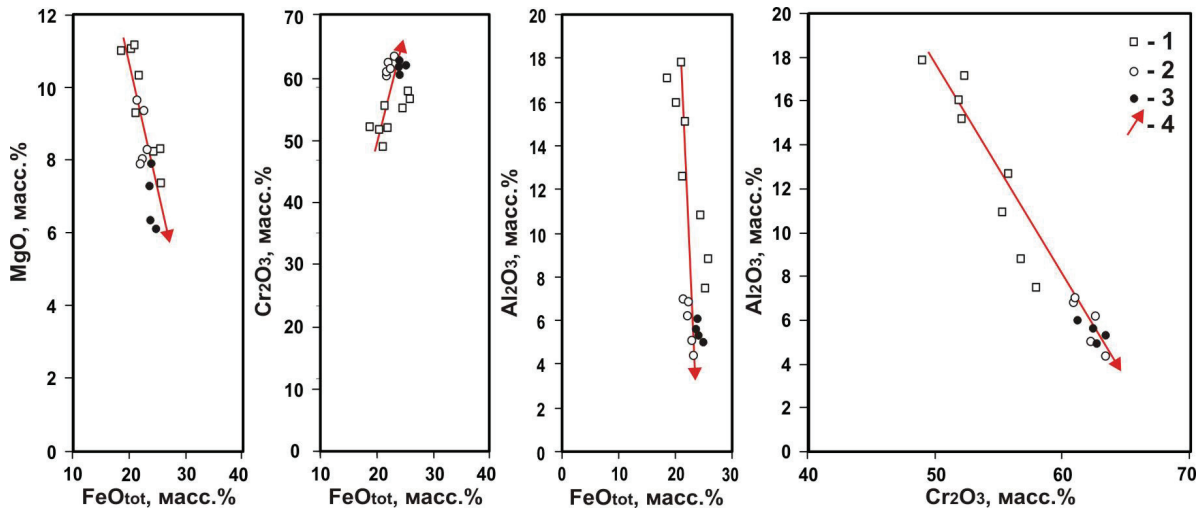


Рис. 3. Бинарные диаграммы для хромшпинелидов из хромититов Харчерузского блока. Условные обозначения здесь и далее: 1 – вкрапленные хромититы; 2 – густовкрапленные хромититы; 3 – рассланцованные хромититы; 4 – эволюционный тренд составов хромшпинелидов, отражающий степень реститивации вмещающих их хромититов

Fig. 3. Binary diagrams for chromophenelides from chromitites of Kharcheruz block. Legend is hereinafter: 1 are the interspersed chromitites; 2 are the thickly interspersed chromitites; 3 are the schistose chromitites; 4 is the evolution trend of composition of chromophenelides reflecting the restitic degree of chromitites, enclosing them

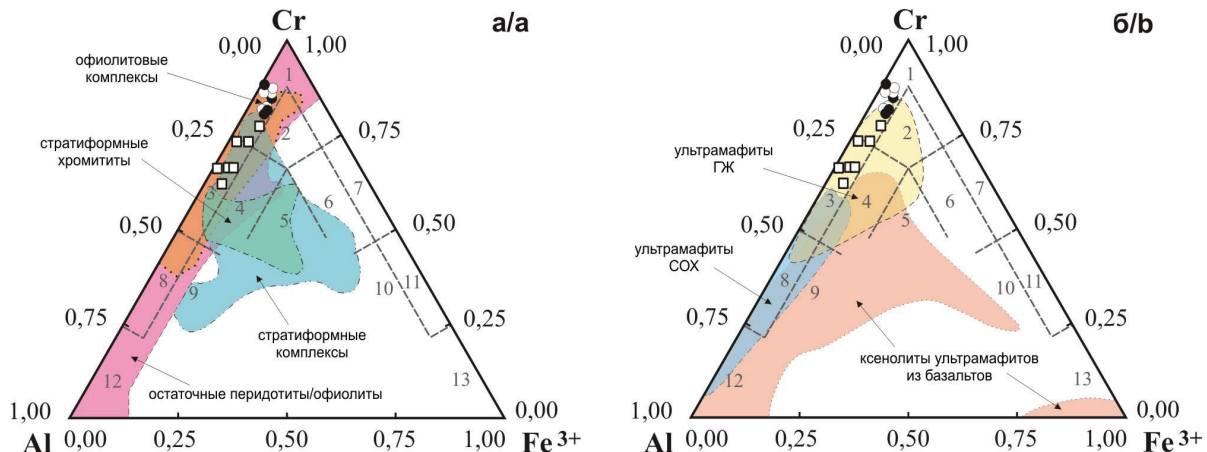


Рис. 4. Составы хромшпинелидов из хромититов Харчерузского блока на классификационной диаграмме Н.В. Павлова [8]: 1 – хромиты; 2 – субферрихромиты; 3 – алюмохромиты; 4 – субферриалюмохромиты; 5 – ферриалюмохромиты; 6 – субалюмоферрихромиты; 7 – феррихромиты; 8 – хромпикотиты; 9 – субферрихромпикотиты; 10 – субалюмохроммагнетиты; 11 – хроммагнетиты; 12 – пикотиты; 13 – магнетиты. Диаграмма (а) отражает генетический тип хромититов [11], диаграмма (б) – геодинамическую обстановку формирования [12]

Fig. 4. Composition of chromophenelides from chromitites of Kharcheruz block on classification diagram of N.V. Pavlov [8]: 1 are the chromitites; 2) sub-ferri-chromitites; 3 are the chromohercynites; 4 are the sub-ferri-chromohercynites; 5 are the ferri-chromohercynites; 6 are the sub-alumina-ferri-chromitites; 7 are the ferri-chromitites; 8 are the chrompicotites; 9 are the sub-ferri-chrompicotites; 10 are the sub-alumina-chrome-magnetites; 11 are the chrome-magnetites; 12 are the picotites; 13 are the magnetites. The diagram (a) shows the genetic type of chromitites [11], the diagram (b) demonstrates geodynamic conditions of formation [12]

хромитом (рис. 3, 4). Алумохромиты, очевидно, являются более ранними разновидностями хромшпинелидов по отношению к хромитам, о чем свидетельствуют их более высокие значения глиноземистости и магниальности при более низкой хромистости. Для них характерны также относительно повышенные содержания  $TiO_2$  и  $ZnO$  (таблица).

На рис. 3 фигуративные точки составов хромшпинелидов образуют линейно вытянутый ряд точек, через который можно провести эволюционный тренд, отражающий преобразование вещественного состава хромшпинелей в процессе высокобарического динамометаморфизма, а также

степень рестирования вмещающих их ультрамафитов [9–10]. Увеличение степени плавления рестиита (рис. 5, а) сопровождается возрастанием хромистости и железистости при уменьшении глиноземистости и магниальности (рис. 3), что характерно для мантийных рестиитогенных ультрамафитов [14–18] и служит дополнительным свидетельством рестиитовой природы пород Харчерузского блока.

Положение фигуративных точек составов шпинелидов на треугольной диаграмме (рис. 4, а) и диаграмме J.M. Ghazi с соавторами (рис. 5, б) также указывает на генетическую связь изученных хро-

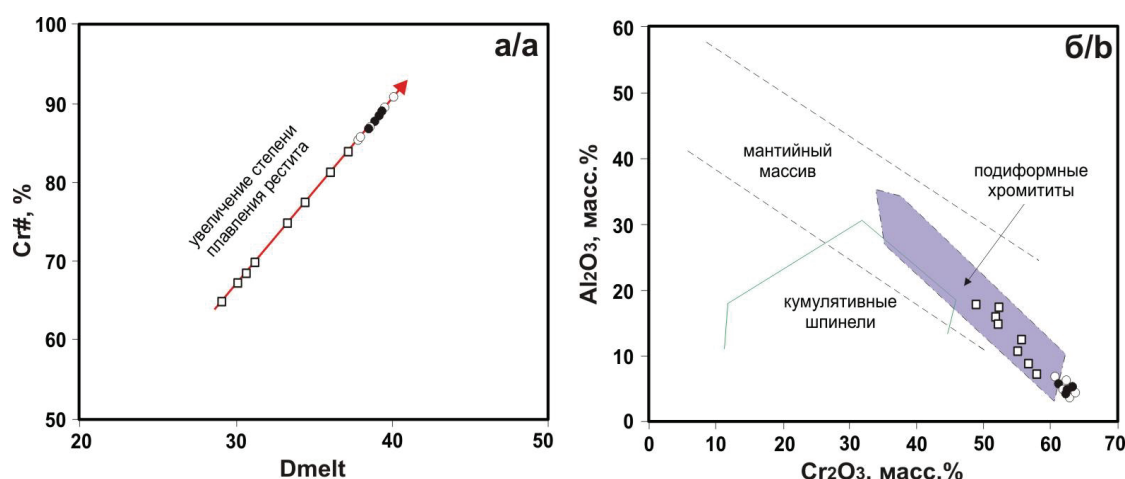
**Таблица.** Составы хромшпинелидов из хромититов Харчерузского блока, мас. %

**Table.** Composition of chromosphenelides from chromitites of Kharcheruz block, wt. %

Элем-т Element	Вкрапленная структура Interspersed structure							Густовкрапленная структура Thickly interspersed structure					Рассланцованная текстура Schistose texture			
	Хромит/Chromite			Алумохромит/Chromohercynite				Хромит/Chromite					Хромит/Chromite			
MgO	8,27	7,37	8,34	10,34	11,15	11,10	11,03	8,31	8,05	9,38	9,64	7,93	7,35	8,00	6,19	6,43
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,87	8,84	7,49	15,18	17,92	16,06	17,18	5,08	4,41	6,93	7,00	6,19	5,84	6,20	5,16	5,50
TiO <sub>2</sub>	0,14	0,33	0,21	0,13	0,17	–	0,09	0,19	0,19	0,05	0,10	0,06	–	0,03	0,04	0,02
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,22	0,17	0,14	0,12	0,13	0,13	0,08	0,22	0,15	0,03	0,08	0,16	0,08	0,07	0,20	0,09
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	55,24	56,81	57,90	52,12	48,99	51,90	52,27	62,27	63,38	60,89	60,99	62,60	62,42	61,21	62,67	63,45
MnO	0,60	0,44	0,60	0,32	0,55	0,32	0,50	0,49	0,62	0,33	0,50	0,80	0,60	0,48	0,59	0,51
FeO <sub>общ</sub>	24,33	25,66	25,29	21,60	20,92	20,24	18,56	23,18	23,12	22,21	21,40	22,11	23,60	23,86	24,82	23,79
ZnO	0,25	0,38	–	0,13	0,03	0,19	0,11	0,18	0,03	–	0,08	0,06	0,03	0,06	0,14	0,15
NiO	0,07	–	0,03	0,06	0,14	0,06	0,18	0,07	0,06	0,17	0,21	0,08	0,08	0,08	0,18	0,07
Сумма Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Примечание. Определение химического состава осуществлялось на электронном сканирующем микроскопе Tescan Vega II LMU, оборудованном энергодисперсионным спектрометром (с детектором Si (Li) Standard) INCA Energy 350 и волнодисперсионным спектрометром INCA Wave 700 в ЦКП «Аналитический центр геохимии природных систем» ТГУ (г. Томск), оператор А.С. Кульков.

Note. Chemical composition was determined on electron scanning microscope «Tescan Vega II LMU» equipped with energy-dispersive spectrometer (with detector Si (Li) Standard) INCA Energy 350 and wave-dispersive spectrometer INCA Wave 700 at «Analytic center of natural system geochemistry» TSU (Tomsk), the operator is A.S. Kulkov.



**Рис. 5.** Бинарные диаграммы для хромшпинелидов из хромититов Харчерузского блока. График (а) отражает зависимость значений параметра Cr# хромшпинелидов от степени частичного плавления лерцолита Dmelt (по экспериментальным данным [13]):  $Cr\# = [Cr / (Cr + Al)] \cdot 100\%$ ;  $Dmelt = 0,426 \cdot Cr\# + 1,538$ . Диаграмма (б) отражает происхождение хромититов и их тип [11]

**Fig. 5.** Binary diagrams for chromosphenelides from chromitites of Kharcheruz block. The diagram (a) reflects the dependence of Cr# parameter values of chromosphenelides on the degree of Dmelt lherzolite partial melting (by the experimental data [13]):  $Cr\# = [Cr / (Cr + Al)] \cdot 100\%$ ;  $Dmelt = 0,426 \cdot Cr\# + 1,538$ . The diagram (b) represents the origin and type of chromitites [11]

мититов с офиолитовыми мантийными ультрамафитами и их отнесение к подиформному типу.

Оценка химического состава хромшпинелидов с использованием экспериментальных данных [13] позволила определить степень частичного плавления мантийного субстрата при формировании хромититов Харчерузского блока. Согласно расчетам и графическим построениям (рис. 5, а), данные породы формировались при вариации степени частичного плавления мантийного источника 29...40 %.

Для оценки геодинамической обстановки формирования Харчерузского блока авторами были привлечены диаграммы зарубежных ученых по данному направлению исследований (рис. 4, б; рис. 6, а, в).

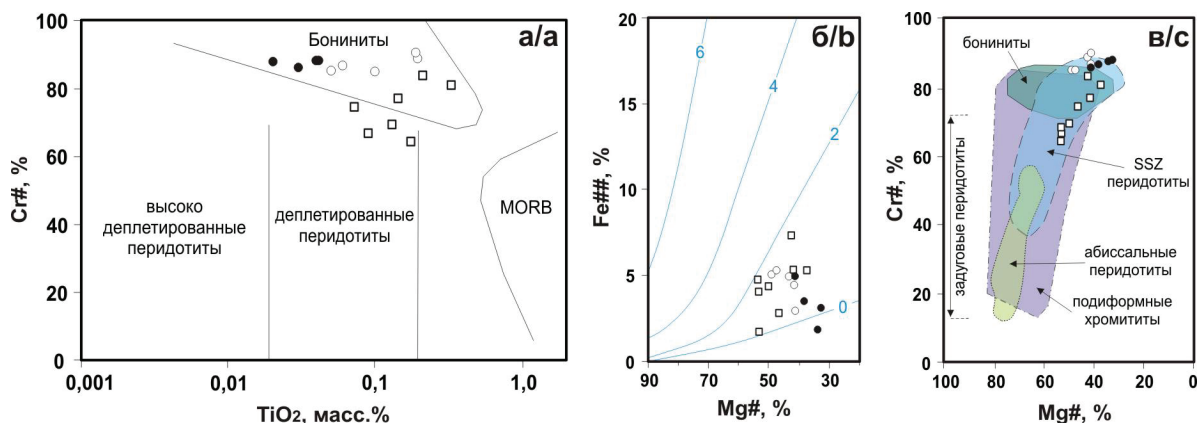
На треугольной диаграмме Al–Cr–Fe<sup>3+</sup> фигуративные точки составов в большинстве своем попадают в область ультрамафитов глубоководных жезлов, на бинарной диаграмме TiO<sub>2</sub>–Cr# – в область бонинитов, на бинарной диаграмме Mg#–Cr# – в область океанических надсубдукционных перидотитов. Такие наблюдения позволяют предположить сложную многостадийную тектоническую историю хромититов Харчерузского блока. Очевидно, плавление исходного рестита происходило в зоне спрединга, расположенного рядом с горячей точкой. В дальнейшем, в островодужной системе, эта аномальная океаническая литосферная мантия подверглась взаимодействию с бонинитовыми расплавами, инициированными субдукцией. Это привело к появлению дунитов и хромититов с явными характеристиками надсубдукционных перидотитов.

### Обсуждение результатов и выводы

Впервые в данной работе, используя комплексный подход, предпринята попытка охарактеризовать хромититы, выявленные среди дунитов в пределах слабоизученного Харчерузского блока массива Сыум-Кеу.

Полученные результаты позволили авторам по количественной роли хромшпинелидов разделить хромититы на три разновидности: вкрапленные, густовкрапленные и сливные, а по текстурным особенностям – на однородные и рассланцованные хромититы. Последние, очевидно, являются продуктом пластического течения в процессе динамометаморфизма.

По химическому составу хромшпинелиды из хромититов представлены хромитами и алюмохромитами с преобладанием первых. Их фигуративные точки составов обнаруживают единый линейный эволюционный тренд, который отражает преобразование вещественного состава хромшпинелей под действием высокобарического динамометаморфизма, связанного с процессами деформаций, скупчивания океанической литосферы и ее аккреции на пассивную окраину континента. Данный процесс, как следует из построенных диаграмм (рис. 3, 4), сопровождался выносом из рудных хромшпинелидов магния и алюминия и увеличением их хромистости, что приводило к естественному «облагораживанию» последних. Развитие такого механизма «облагораживания» получило подтверждение экспериментальными исследованиями [21–22], а также находками минералов высоких и сверхвысоких давлений (алмаз, карбиды кремния, псевдоморфы октаэдрического оливина, корунд, циркон, гранат



**Рис. 6.** Бинарные диаграммы для хромшпинелидов из хромититов Харчерузского блока, отражающие условия и геодинамическую обстановку их формирования [11, 19]. Линии на диаграмме (б) представляют теоретические изобары для чистого (Mg,Fe)Cr<sub>2</sub>O<sub>4</sub> [20], значения указаны в Кбар. Cr#=[Cr/(Cr+Al)]·100 %; Mg#=[Mg/(Mg+Fe<sup>2+</sup>)]·100 %; Fe##=[Fe<sup>3+</sup>/(Fe<sup>3+</sup>+Cr+Al)]·100 %; SSZ перидотиты – океанические надсубдукционные перидотиты

**Fig. 6.** Binary diagrams for chromophenelides from chromitites of Kharcheruz block, reflecting conditions and geodynamic position of their formation [11, 19]. The lines in the diagram (b) represent the theoretical isobars for pure (Mg,Fe)Cr<sub>2</sub>O<sub>4</sub> [20], the values are indicated in Kbar. Cr#=[Cr/(Cr+Al)]·100 %; Mg#=[Mg/(Mg+Fe<sup>2+</sup>)]·100 %; Fe##=[Fe<sup>3+</sup>/(Fe<sup>3+</sup>+Cr+Al)]·100 %; SSZ peridotites are the oceanic above-subduction peridotites



и др.) в хромититах ультрамафитовых массивов Полярного Урала [23–25].

Вторая стадия преобразования хромшпинелидов, связанная с более поздними процессами наложенного приповерхностного регионального метаморфизма (давления не более 2 Кбар, рис. 6, б), не существенно повлияла на химический состав рудных хромшпинелидов из хромититов и в основном связана с незначительным окислением закисного железа в окисное. При этом авторами отмечено, что по мере увеличения густоты вкрапленности в рудной зоне отмечается увеличение качества хромшпинелидов (табл., рис. 4). Данная особенность на примере других объектов отмечалась ранее [16, 18, 26–27] и, очевидно, обусловлена кинетическим фактором, который выражается в сокращении интенсивности и степени завершенности наложенных метаморфических процессов при увеличении густоты вкрапленности хромитовых руд и размеров рудных тел [28]. В пользу последнего свидетельствуют более низкие значения хрома при

более высоких значениях суммарного железа и цинка в химических составах аксессуарных вкрапленных шпинелидов, что отражает большую степень воздействия на них процессов метаморфизма. Данная закономерность, с учетом пострудных процессов, дает возможность впоследствии спрогнозировать состав и технологическую сортность скрытых рудных залежей по составу повсеместно распространенного аксессуарного хромшпинелида.

По своему химическому составу изученные хромшпинелиды отвечают минералам верхнемантийного субстрата с высокой степенью частичного плавления (29...40 %), которое происходило в зоне спрединга, расположенного рядом с горячей точкой [29]. В дальнейшем, в островодужной системе, эта аномальная океаническая литосферная мантия подверглась взаимодействию с бонинитовыми расплавами, инициированными субдукцией, что впоследствии привело к появлению дунитов и хромитов с явными характеристиками надсубдукционных перидотитов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Савельева Г.Н., Суслон П.В. Структура и состав мантийных перидотитов на границе с коровыми комплексами офиолитов в массиве Сыумкеу, Полярный Урал // Геотектоника. – 2014. – № 5. – С. 3–16.
2. Шмелев В.Р. Гипербазиты массива Сыум-Кеу (Полярный Урал). Структура, петрология, динамометаморфизм. – Екатеринбург: УрО АН СССР, 1991. – 79 с.
3. Shmelev V.R. Mantle ultrabasites of ophiolite complexes in the Polar Urals: petrogenesis and geodynamic environments // Petrology. – 2011. – V. 19. – № 6. – P. 618–640.
4. Chernyshov A.I., Yurichev A.N. The Structural Evolution of Dunite and Chromite Ore from the Kharcheruz Massif, the Polar Urals // Geotectonics. – 2016. – V. 50. – № 2. – P. 196–208.
5. Петрология и метаморфизм древних офиолитов (на примере Полярного Урала и Западного Саяна) / Н.Л. Добрецов, Ю.Е. Молдаванцев, А.П. Казак, Л.Г. Пономарева, Г.Н. Савельева, А.А. Савельев. – Новосибирск: Наука, 1977. – 221 с.
6. Чернышов А.И. Ультрамафиты (пластическое течение, структурная и петроструктурная неоднородность). – Томск: Чародей, 2001. – 214 с.
7. Reed S.J.V. Electron microprobe analysis and scanning electron microscopy in geology. – N.Y.: Cambridge University Press, 2005. – 189 p.
8. Павлов Н.В. Химический состав хромшпинелидов в связи с петрографическим составом пород ультраосновных интрузивов // Труды Геологического института РАН. – 1949. – Вып. 103. – № 3. – 91 с.
9. Юричев А.Н. Аксессуарные шпинелиды из ультрамафитов: индикаторы условий формирования // Руды и металлы. – 2013. – № 6. – С. 30–34.
10. Юричев А.Н., Чернышов А.И. Эволюция составов шпинелиевой минерализации из различных формационных типов мафит-ультрамафитовых комплексов Канской глыбы (Восточный Саян) // Отечественная геология. – 2012. – № 2. – С. 42–50.
11. The geodynamic setting of the Nain ophiolites, Central Iran: evidence from chromian spinels in the chromitites and associated rocks / J.M. Ghazi, M. Moazzen, M. Rahghoshay, H.S. Moghadam // Ophiolite. – 2011. – V. 36. – № 1. – P. 59–76.
12. Barnes S.J., Roeder P.L. The range of spinel compositions in terrestrial mafic and ultramafic rocks // Journal of petrology. – 2001. – V. 42. – № 12. – P. 2279–2302.
13. Леснов Ф.П., Подлипский М.Ю. Геохимия аксессуарных хромшпинелидов из пород Эргакского хромитоносного гипербазитового массива и условия его формирования (Западный Саян) // ДАН. – 2008. – Т. 422. – № 5. – С. 660–664.
14. Dick H.J.V., Bullen T. Chromian spinel as a petrogenetic indicator in abyssal and alpine-type peridotites and spatially associated lavas // Contrib. Mineral. Petrol. – 1984. – V. 84. – P. 54–76.
15. Макиев А.Б. Минералогия альпинотипных ультрабазитов Урала. – СПб.: Наука, 1992. – 197 с.
16. Юричев А.Н., Чернышов А.И., Кульков А.С. Рудная минерализация Агардагского ультрамафитового массива (Республика Тыва) // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323. – № 1. – С. 130–136.
17. Перевозчиков Б.В., Плотников А.В., Макиев Т.Т. Природа вариаций состава рудной и аксессуарной хромшпинели ультрабазитового массива Сыум-Кеу (Полярный Урал) // Известия вузов. Геология и разведка. – 2007. – № 4. – С. 32–39.
18. Юричев А.Н. Калнинский ультрамафитовый массив Западного Саяна: рудная минерализация и ее генетическая природа // Известия Томского политехнического университета. – 2015. – Т. 326. – № 2. – С. 61–69.
19. Petrogenesis of the Ophiolitic Giant Chromite Deposits of Kempirsai, Kazakhstan: a Study of Solid and Fluid Inclusions in Chromite / F. Melcher, W. Grum, G. Simon, T.V. Thalhammer, E.F. Stumpf // Journal of Petrology. – 1997. – V. 38. – № 10. – P. 1419–1458.
20. Irvine T.N. Chromian spinel as a petrogenetic indicator. 1. Theory // Can. J. Earth Sci. – 1965. – V. 2. – P. 648–672.
21. Turkin A.I., Sobolev N.V. Pyrope-knorringite garnets: overview of experimental data and natural parageneses // Russian Geology and Geophysics. – 2009. – V. 50. – № 12. – P. 1169–1182.
22. Garnet-spinel-olivine-orthopyroxene equilibria in the FeO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> system: I. Composition and molar volumes of minerals / G.P. Brey, A.M. Doroshev, A.V. Gurnis, A.I. Turkin // Eur. J. Mineral. – 1999. – V. 11. – № 4. – P. 599–617.
23. Суставов С.Г., Вахрушева Н.В. Хромовый рutil в хромититах Енгайской площади массива Рай-Из // Вестник Уральского отделения Российского минералогического общества. – 2010. – № 7. – С. 159–162.
24. Discovery of diamond and an unusual mineral group from the podiform chromite ore Polar Ural / J. Yang, W. Bai, Q. Fang,

- F. Meng, S. Chen, Zh. Zhang, H. Rong // *Geology in China*. – 2007. – V. 34. – P. 950–953.
25. Diamonds, native elements and metal alloys from chromitites of the Ray-Iz ophiolite of the Polar Urals / J. Yang, F. Meng, X. Xu, P.T. Robinson, Y.D. Dilek, A.B. Makeyev, R. Wirth, M. Wiedenbeck, J. Cliff // *Gondwana Research*. – 2015. – V. 27. – № 2. – P. 459–485.
26. Макеев А.В., Брянцианинова Н.И. Топоминералогия ультрабазитов Полярного Урала. – СПб.: Наука, 1999. – 252 с.
27. Перевозчиков Б.В., Набиуллин В.И. Методические основы оценки ресурсного потенциала хромовых руд офиолитовых ультрабазитов // *Вестник Пермского университета. Геология*. – 2007. – № 4. – С. 91–105.
28. Пучков В.Н., Штейнберг Д.С. Строение, эволюция и минерогения гипербазитового массива Рай-Из. – Свердловск: Уро АН СССР, 1990. – 228 с.
29. Peridotites from the Kamchatsky mys: evidence of oceanic mantle melting near a hotspot / V.G. Batanova, A.V. Sobolev, Z.E. Lyaskovskaya, G.N. Savelieva // *Russian Geology and Geophysics*. – 2014. – V. 55. – № 12. – P. 1395–1403.

*Поступила 23.06.2016 г.*

#### **Информация об авторах**

**Юричев А.Н.**, кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры петрографии геолого-географического факультета Национального исследовательского Томского государственного университета.

**Чернышов А.И.**, доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий кафедрой петрографии геолого-географического факультета Национального исследовательского Томского государственного университета.

UDC 552.321.6:553.08

## CHROMITITES OF KHARCHERUZ BLOCK OF SYUM-KEU MASSIF: ORE COMPOSITION AND GENESIS (POLAR URAL)

Alexey N. Yurichev<sup>1</sup>,  
juratur@sibmail.com

Alexey I. Chernyshov<sup>1</sup>,  
aich@ggf.tsu.ru

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

**The relevance of the work** is caused by the need of detailed petrological studies of poorly studied ultrabasic massifs of Russia in terms of their potential on chromite ore, which are currently the raw materials in very short supply for the state.

**The main aim** of the paper is to characterize petrographic features and chemistry of chromitites from Kharcheruz block of Syum-Keu massif to reconstruct the evolution of material composition of ore chromosphinelides at formation of rocks and their subsequent metamorphic changes, geodynamic conditions of formation of the investigated object.

**The methods used in the work:** study of silicate and ore minerals in transparent sections and polished sections on the polarizing microscope AxioScope Carl Zeiss; evaluation of chemical composition of chromosphinelides on scanning electron microscope Tescan Vega II LMU, equipped with energy-dispersive spectrometer (detector Si (Li) Standard) INCA Energy 350 and wave-dispersive spectrometer INCA Wave 700.

**The results.** The authors have made the first attempt to describe in detail the chromitites identified among dunites within poorly studied Kharcheruz block of Syum-Keu massif. By quantifying role of chromosphinelides they are divided into three types: interspersed, thickly interspersed and drain. By textural features the schistose chromitites, which are the product of plastic flow, are marked. By chemical composition ore chromosphinelides are presented by chromites and chromohercynites and exhibit a single linear evolutionary trend, reflecting the transformation of their material composition under influence of high-pressure dynamometamorphism. This process was accompanied by magnesium and aluminum removal from chromosphinelides and increase of chromium, which led to the natural «beautification» of the latter. The second conversion step, associated with the later processes of superimposed regional metamorphism, did not affect significantly the chemical composition of ore chromosphinelides and it is associated with a slight shift of ferrous iron to ferric. The investigated chromosphinelides meet the minerals of upper mantle substrate with a high degree of partial melting (29...40 %), which occurred in spreading zone, adjacent to the hot spot. Later, in the island arc system, this anomalous oceanic lithospheric mantle underwent interaction with boninite melts, initiated by subduction, that led to occurrence of dunite and chromitites with obvious characteristics of above-subduction peridotites.

### Key words:

Restites, ultramafics, chromitites, chromosphinelides, chemistry, genesis, geodynamic setting.

### REFERENCES

- Savelieva G.N., Suslov P.V. Structure and composition of mantle peridotites at the boundary with crustal complexes of ophiolites in the Syumkeu massif, Polar Urals. *Geotectonics*, 2014, no. 5, pp. 3–16. In Rus.
- Shmelev V.R. *Giperbazity massiva Syum-Keu (Polyarny Ural). Struktura, petrologiya, dinamometamorfizm* [Ultramafic rocks of the Syum-Keu massif, the Polar Urals. Structure, petrology and dynamometamorphism]. Ekaterinburg, UrO AN SSSR, 1991. 79 p.
- Shmelev V.R. Mantle ultrabasites of ophiolite complexes in the Polar Urals: petrogenesis and geodynamic environments. *Petrology*, 2011, vol. 19, no. 6, pp. 618–640.
- Chernyshov A.I., Yurichev A.N. The Structural Evolution of Dunite and Chromite Ore from the Kharcheruz Massif, the Polar Urals. *Geotectonics*, 2016, vol. 50, no. 2, pp. 196–208.
- Dobretsov N.L., Moldavantsev Yu.E., Kazak A.P., Ponomareva L.G., Savelyeva G.N., Savelyev A.A. *Petrologiya i metamorfizm drevnikh ofiolitov (na primere Polyarnogo Urala i Zapadnogo Sayana)* [Petrology and metamorphism of ancient ophiolites (by the example of the Polar Urals and Western Sayan)]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1977. 221 p.
- Chernyshov A.I. *Ultramafity (plasticheskoe techenie, strukturnaya i petrostrukturnaya neodnorodnost)* [Ultramafics (plastic flow, structural and petrostructural heterogeneity)]. Tomsk, Charodey Publ., 2001. 214 p.
- Reed S.J.B. *Electron microprobe analysis and scanning electron microscopy in geology*. N.Y., Cambridge University Press, 2005. 189 p.
- Pavlov N.V. Khimichesky sostav khromshpinelidov v svyazi s petrograficheskim sostavom porod ultrasnovnykh intruzivov [Chemical composition of chromosphinelides in connection with the petrographic composition of rocks of ultramafic intrusive]. *Trudy Geologicheskogo instituta RAN*, 1949, vol. 103, no. 3, 91 p.
- Yurichev A.N. Accessory spinels from ultramafites: indicators of formation conditions. *Rudy i metally*, 2013, no. 6, pp. 30–34. In Rus.
- Yurichev A.N., Chernyshov A.I. Evolution of compositions of spinel mineralization from different formation types of mafic-ultramafic complexes of Kan block (Eastern Sayan). *Otechestvennaya geologiya*, 2012, no. 2, pp. 42–50. In Rus.
- Ghazi J.M., Moazzen M., Rahghoshay M., Moghadam H.S. The geodynamic setting of the Nain ophiolites, Central Iran: evidence from chromian spinels in the chromitites and associated rocks. *Ofioliti*, 2011, vol. 36, no. 1, pp. 59–76.
- Barnes S.J., Roeder P.L. The range of spinel compositions in terrestrial mafic and ultramafic rocks. *Journal of petrology*, 2001, vol. 42, no. 12, pp. 2279–2302.
- Lesnov F.P., Podlipsky M.Yu. Geochemistry of accessory chromosphinelides from rocks of Ergaksky chromite-bearing ultramafic massif and conditions of its formation (West Sayan). *Doklady Earth Sciences*, 2008, vol. 422, no. 5, pp. 660–664. In Rus.

14. Dick H.J.B., Bullen T. Chromian spinel as a petrogenetic indicator in abyssal and alpine-type peridotites and spatially associated lavas. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1984, vol. 84, pp. 54–76.
15. Makeev A.B. *Mineralogiya alpinotipnykh ultrabazitov Urala* [Mineralogy of alpine ultrabazites of the Ural]. St. Petersburg, Nauka Publ., 1992. 197 p.
16. Yurichev A.N., Chernyshov A.I., Kulkov A.S. Ore mineralization of the Agardag ultramafic massif (Republic of Tyva). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 323, no. 1, pp. 130–136. In Rus.
17. Perevozchikov B.V., Plotnikov A.V., Makiev T.T. Priroda variatsiy sostava rudnoy i aktsessornoy khromshpineli ultrabazitovogo massiva Syum-Keu (Polyarny Ural) [Nature of variations in composition of ore and accessory chromspinel from Syum-Kaew ultrabasic massif (Polar Urals)]. *Izvestiya vuzov. Geologiya i razvedka*, 2007, no. 4, pp. 32–39.
18. Yurichev A.N. Kalninsky ultramafic massif of Western Sayan: ore mineralization and its genetic nature. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2015, vol. 326, no. 2, pp. 61–69. In Rus.
19. Melcher F., Grum W., Simon G., Thalhammer T.V., Stumpf E.F. Petrogenesis of the Ophiolitic Giant Chromite Deposits of Kempirsai, Kazakhstan: a Study of Solid and Fluid Inclusions in Chromite. *Journal of Petrology*, 1997, vol. 38, no. 10, pp. 1419–1458.
20. Irvine T.N. Chromian spinel as a petrogenetic indicator. 1. Theory. *Can. J. Earth Sci.*, 1965, vol. 2, pp. 648–672.
21. Turkin A.I., Sobolev N.V. Pyrope-knorringite garnets: overview of experimental data and natural parageneses. *Russian Geology and Geophysics*, 2009, vol. 50, no. 12, pp. 1169–1182.
22. Brey G.P., Doroshev A.M., Giris A.V., Turkin A.I. Garnet-spinel-olivine-orthopyroxene equilibria in the FeO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> system: I. Composition and molar volumes of minerals. *Eur. J. Mineral.*, 1999, vol. 11, no. 4, pp. 599–617.
23. Sustavov S.G., Vakhrusheva N.V. Khromovy rutil v khromititakh Engayskoy ploshchadi massiva Ray-Iz [Chromic rutile in chromitites of Engaysky are of Rai-Iz massif]. *Vestnik Ural'skogo otdeleniya Rossiyskogo mineralogicheskogo obshchestva*, 2010, no. 7, pp. 159–162.
24. Yang J., Bai W., Fang Q., Meng F., Chen S., Zhang Zh., Rong H. Discovery of diamond and an unusual mineral group from the podiform chromite ore Polar Ural. *Geology in China*, 2007, vol. 34, pp. 950–953.
25. Yang J., Meng F., Xu X., Robinson P.T., Dilek Y.D., Makeyev A.B., Wirth R., Wiedenbeck M., Cliff John. Diamonds, native elements and metal alloys from chromitites of the Ray-Iz ophiolite of the Polar Urals. *Gondwana Research*, 2015, vol. 27, no. 2, pp. 459–485.
26. Makeev A.V., Bryanchaninova N.I. *Topomineralogiya ultrabazitov Polyarnogo Urala* [Topomineralogy of ultrabazites of the Polar Urals]. St. Petersburg, Nauka Publ., 1999. 252 p.
27. Perevozchikov B.V., Nabiullin V.I. Metodicheskie osnovy otsenki resursnogo potentsiala khromovykh rud ofiolitovykh ultrabazitov [Methodical bases for estimating resource potential of chrome ore from ophiolitic ultramafic rocks]. *Vestnik Permskogo universiteta. Geologiya*, 2007, no. 4, pp. 91–105.
28. Puchkov V.N., Shteynberg D.S. *Stroenie, evolyutsiya i minerageniya giperbazitovogo massiva Ray-Iz* [Structure, evolution, and minerageny of the Rai-Iz ultrabasic massif]. Sverdlovsk, Uro AN SSSR, 1990. 228 p.
29. Batanova V.G., Sobolev A.V., Lyaskovskaya Z.E., Savelieva G.N. Peridotites from the Kamchatsky mys: evidence of oceanic mantle melting near a hotspot. *Russian Geology and Geophysics*, 2014, vol. 55, no. 12, pp. 1395–1403.

*Received: 23 June 2016.*

#### Information about the authors

**Alexey N. Yurichev**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk State University.

**Alexey I. Chernyshov**, Dr. Sc., professor, head of the department, National Research Tomsk State University.

УДК 621.314

## ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ (ОМП) В КАБЕЛЬНО-ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Иванова Елена Алексеевна<sup>1</sup>,  
elshka.ivanova@gmail.com

Лозина Наталья Георгиевна<sup>1</sup>,  
loz2000@mail.ru

<sup>1</sup> ОАО «Научно-исследовательский институт по передаче электроэнергии постоянным током высокого напряжения», Россия, 194223, Санкт-Петербург, ул. Курчатова, 14/А.

*Предпосылки и актуальность развития технологий постоянного тока высокого напряжения для российской электроэнергетики обусловлены особенностями ее работы и условиями функционирования Единой энергетической системы (ЕЭС) России. Внедрение электроэнергетических систем постоянного тока позволит решить ряд существующих на сегодняшний день в ЕЭС России проблем, таких как энергоснабжение нефтяных платформ и территорий с доступом через водные преграды, подключение возобновляемых источников энергии к ЕЭС и к локальным энергосистемам, а также другие известные проблемы. Актуальность представленной работы обусловлена необходимостью повышения точности определения места повреждения (ОМП) в линиях постоянного тока (ПТ) и отсутствием в отечественной практике устройств и средств ОМП на неоднородных линиях ПТ.*

**Цель работы:** повышение точности алгоритма спектрального метода для решения задачи ОМП в линиях электропередачи постоянного тока; вывод формулы нахождения неизвестного расстояния до места замыкания на линии ПТ, позволяющей связать частоту переходного процесса разряда линии через место к. з., параметры линии на единицу длины, длину короткозамкнутого участка линии, а также учесть наличие неповрежденного однородного участка в схеме замещения электропередачи.

**Методы исследования.** Для вывода формулы, позволяющей решить задачу ОМП в линии ПТ спектральным способом, использовались аналитические методы исследования. При исследовании точности предлагаемого спектрального метода ОМП в линии постоянного тока использовались методы математического моделирования.

**Результаты.** Предложен спектральный метод для решения задачи нахождения длины короткозамкнутого участка линии ПТ, состоящей из кабельного и воздушного участков с учетом установленных по концам линии реакторов и фильтров высших гармоник. Предложена схема замещения однородного неповрежденного участка линии – схема искусственной линии с сосредоточенными параметрами. Получена формула, позволяющая рассчитать расстояние до места повреждения в зависимости от частоты, преобладающей в спектре напряжения на поврежденном полюсе линии, погонных параметров линии ПТ и параметров схемы замещения. Оценена погрешность предлагаемого способа ОМП, вносимая неизвестной величиной переходного сопротивления  $R_n$  в месте к.з.

### Ключевые слова:

Линия электропередачи, электропередача постоянного тока, короткое замыкание, определение места повреждения, переходное сопротивление, спектральный метод, волновой метод.

В мировой практике применение передач постоянного тока (ППТ) обосновано получением определенных системных эффектов, которые на сегодняшний день могут выражаться в том числе в следующем [1]:

- повышение уровня устойчивости систем переменного тока и уменьшение объема управляющих воздействий;
- отсутствие необходимости синхронизации работы электростанций;
- большее значение предельной передаваемой мощности;
- при превышении длины линии постоянного тока (ПТ) некоторого критического значения  $l_{кр}$  ( $l_{кр} = 450$  км [2]) затраты на передачу электроэнергии по линии ПТ оказываются существенно ниже, чем при передаче электроэнергии по высоковольтной линии (ВЛ) переменного тока при равных условиях надежности;
- меньшая зона отчуждения земли для трассы линии – ширина ВЛ ПТ примерно в 1,5 раза меньше ширины ВЛ переменного тока той же пропускной способности, что очень важно для густонаселенных и лесных регионов.

Эти эффекты в определенной степени могут быть реализованы в Единой энергетической системе (ЕЭС) России.

Предпосылки и актуальность развития технологий постоянного тока высокого напряжения для отечественной электроэнергетики обусловлены [3] следующими внутренними объективными условиями ее функционирования, особенностями ЕЭС России как крупнейшей электроэнергетической системы, а также особенностями работы технологически изолированных электроэнергетических систем:

- проблема ограничения токов короткого замыкания в мегаполисах;
- проблема энергоснабжения нефтяных платформ и территорий с доступом через водные преграды;
- удаленность объектов генерации и потребителей;
- проблема подключения возобновляемых источников энергии к ЕЭС и к локальным энергосистемам;
- значительный износ и старение существующего сетевого оборудования;



- большие потери при передаче электроэнергии в распределительных сетях;
- проблема модернизации и развития ЭЭС, возникающая при последовательном присоединении к ЭЭС объединенной энергосистемы Востока и ряда изолированных энергосистем.

Сложности объединения на переменном токе с крупными зарубежными энергосистемами из-за различий в системах регулирования частоты и мощности, других систем автоматики, разных стандартов частоты, наличия водных преград, больших расстояний и др. являются предпосылками к использованию техники постоянного тока для связи ЭЭС России с энергосистемами других государств.

Применение технологий ППТ и эксплуатация протяженных линий ПТ делает проблему точного определения места повреждения (ОМП) при коротких замыканиях (к. з.) на таких линиях особенно актуальной.

Аварийные режимы, в частности короткие замыкания в электропередачах ПТ, требуют особого внимания, поскольку вопросы изменения схем и режимов работы сетей ПТ в аварийных условиях и алгоритмы действия защит и устройств обнаружения места к. з. являются совершенной новой задачей, необходимой для исследования и изучения. Для получения полной и достоверной информации о процессах, протекающих во всех значимых элементах электропередачи ПТ и электроэнергетической системе (ЭЭС) в целом при всевозможных нормальных, аварийных и послеаварийных режимах их работы, используется метод математического моделирования энергосистем в режиме реального времени [4, 5].

На сегодняшний день наиболее широкое распространение получили методы ОМП для линий ПТ на основе анализа распространения электромагнитной волны вдоль линии (волновые методы). Алгоритм такого метода ОМП основывается на определении времени прохождения волны тока и/или напряжения короткозамкнутого участка линии. Наиболее распространенным способом обработки информативных сигналов волны тока и напряжения в мировой практике является дискретное вейвлет-преобразование (DWT), предложенное в конце 90-х гг. учеными Ф. Магнаго из аргентинского университета Universidad Nacional de Rio Cuarto и А. Абурам [6, 7] из бостонского исследовательского института Northeastern University, позволяющее проводить анализ сигналов с локализованными переходными процессами. При решении задачи ОМП на линии ПТ на основе дискретного вейвлет-преобразования основной проблемой является точность определения времени прохождения электромагнитной волной короткозамкнутого участка линии. Недостоверность определения этого параметра может быть связана с наличием искажений фронтов волн в линии ПТ.

Причиной искажения электромагнитных волн являются возникающие в них помехи, наведенные от второй полупериода (в случае биполярной линии ПТ), а также высшие гармонические составляющие в кривой напряжения, генерируемые преобразовательными подстанциями ПТ. Выделение фронтов волн также может быть осложнено искажениями, связанными с существенным затуханием электромагнитной волны в контуре «провод-земля», а также из-за влияния неоднородностей вдоль трассы линии ПТ. Для более точной фиксации прихода волн от места к. з. на преобразовательную подстанцию расчет вейвлет-коэффициентов оптимизируют с помощью различных способов, таких как, например, разложение функции по вейвлет-пакету (WPD) с помощью радиальной базисной функции нейронной сети [8].

Несмотря на попытку решить проблему точной фиксации прихода электромагнитной волны на конечную преобразовательную подстанцию, методы ОМП на базе теории бегущих волн требуют высокой частоты дискретизации исследуемого сигнала, а их реализация оказывается существенно более дорогой, чем реализация импедансных методов ОМП.

Кроме того, существующие традиционные волновые методы ОМП на линиях ПТ имеют другие недостатки [9], например:

- при к. з. в момент времени, близкий к моменту перехода напряжения через ноль, бегущие волны, генерируемые в месте повреждения, будут малоразличимыми;
- при возникновении близкого повреждения разница во времени прихода прямой и отраженной волн будет малоразличима.

Эти факторы могут сделать практически невозможной интерпретацию информации, доступной в первые несколько миллисекунд после прихода на преобразовательную подстанцию первой волны тока или напряжения.

В [10] предложен метод ОМП для ВЛ постоянного тока, основанный на оценке сопротивления короткозамкнутой линии – импедансный метод, обычно применяемый для линий переменного тока. Однако, как и для линий переменного тока, при увеличении переходного сопротивления в месте к. з. (как правило, неизвестной величины) точность ОМП в этом случае существенно снижается.

Применяемые на сегодняшний день в линиях ПТ методы ОМП на волновом принципе являются в основном двусторонними [11, 12], т. е. анализируют информацию, поступающую на обе подстанции, расположенные по концам ВЛ. Такой метод ОМП требует обеспечения надежного канала связи для обмена информацией между подстанциями, а также максимально точной синхронизации аварийных осциллограмм.

В [13] предложен способ ОМП на линии ПТ, основанный на оценке частотного спектра аварийного напряжения линии, и выделения из этого спек-

тра частоты с максимальной амплитудой. Согласно [13], колебания напряжения линии, возникающие при разряде ЛЭП через место к. з. и сопровождающиеся резким снижением напряжения аварийной полуцепи, можно смоделировать колебательным процессом в контуре, состоящем из включенных параллельно индуктивности  $L_X$  и емкости  $C_X$  короткозамкнутого участка линии, при учете эквивалентной индуктивности  $L'_\Pi$  преобразователя, которая определяется суммой индуктивностей линейного реактора и преобразовательных трансформаторов (рис. 1).

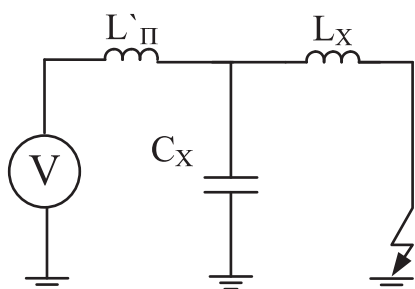


Рис. 1. Эквивалентная схема замещения короткозамкнутого участка линии ПТ при к. з. с нулевым переходным сопротивлением

Fig. 1. Equivalent circuit of the short-circuited HVDC line segment with zero transient resistance

Частота колебаний в схеме рис. 1 определяется из выражения

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{\text{экв}}C_X}}, \quad (1)$$

где  $L_{\text{экв}} = \frac{L'_\Pi L_X}{L'_\Pi + L_X}$  – эквивалентная индуктивность преобразователя и короткозамкнутого участка линии.

Параметры  $L_X$  и  $C_X$  короткозамкнутого участка линии зависят от длины этого участка:

$$\begin{aligned} L_X &= \frac{2}{\pi} L_{0X} l_X; \\ C_X &= \frac{2}{\pi} C_{0X} l_X, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $L_{0X}$ ,  $C_{0X}$  – погонные параметры однородного участка линии ПТ в контуре «провод-земля»;  $l_X$  – неизвестная длина замкнутого участка линии ПТ до места короткого замыкания.

В формулах (2) суммарные емкость и индуктивность эквивалентного контура рис. 1 уменьшены в  $2/\pi$  раза с целью обеспечения равенства частоты колебаний при замене реальной линии с распределенными параметрами схемой замещения по рис. 1 с сосредоточенными параметрами.

Подстановка (2) в (1), последующее возведение в квадрат и решение квадратного уравнения относительно расстояния до места замыкания в линии ПТ дает следующее выражение:

$$l_X = \frac{1 + \sqrt{1 + 16\pi^2 K_1^2 K_2^2}}{16\pi K_1^2 K_2^2}, \quad (3)$$

где  $K_1 = \frac{L'_\Pi}{L_{0X}}$ ,  $K_2 = \frac{f_0}{V_0}$ ,  $V_0 = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}}$  – скорость рас-

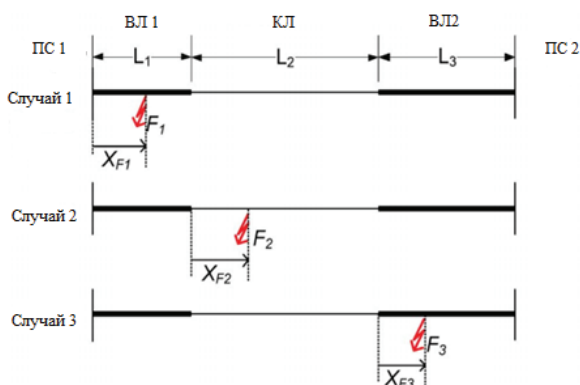
пространения электромагнитной волны в контуре «провод-земля» на частоте  $f_0$ .

Макет устройства, реализованного на этом методе, проходил испытания на ППТ Волгоград–Донбасс (длина линии ПТ 473 км) [14]. В целом испытания подтвердили работоспособность метода ОМП, погрешность в расчете расстояния до места к. з. на линии ПТ достигала 5–8 % от длины короткозамкнутого участка. С целью повышения эксплуатационных характеристик устройства предлагается усовершенствование алгоритма ОМП для ВЛ постоянного тока на базе спектрального метода.

При определении расстояния до места повреждения в [13] не учитывается наличие переходного сопротивления  $R_\Pi$  в месте к. з., что соответствует, например, случаю падения провода на землю или замыкания гирлянды изоляторов на стальную заземленную опору в нормальном режиме. Также при выводе формулы (3) не учитывается наличие включенных на полюсах линии ПТ фильтров высших гармоник (ФВГ), устанавливаемых на большинстве зарубежных электропередач постоянного тока и разрабатываемых в проектах отечественных электропередач постоянного тока. Устройства фильтрации высших гармоник служат для обеспечения низкого уровня помех в близлежащих линиях связи и других коммуникациях, чувствительных к наведенным помехам. Вывод формулы (3) сделан в предположении к. з. на однородной линии ПТ, состоящей из воздушного участка, параметры которого одинаковы по всей длине линии ПТ.

В случае, когда электропередача ПТ, в соответствии с проектом, пересекает водную преграду, в мировой практике для строительства такой электропередачи применяют, прежде всего, кабельные линии ПТ. Однако стоимость 1 км кабельной линии, как правило, в несколько раз превышает стоимость 1 км воздушной линии. Поэтому после пересечения водной преграды нередко кабельные участки ППТ дополняются воздушными участками (например, ППТ между Данией и Норвегией через пролив Скагеррак – 240 км, ППТ Baltic Cable между Германией и Швецией – 250 км, связь Feno-Skan между Финляндией и Швецией – 233 км).

В зарубежной практике вопрос разработки средств и устройств ОМП в неоднородных кабельно-воздушных линиях затронут, например, в [15, 16]. В качестве короткозамкнутой линии ПТ рассматривалась линия, состоящая из двух воздушных и одного кабельного участков. На рис. 2 приведены возможные варианты повреждения на такой линии с точки зрения места возникновения к. з.



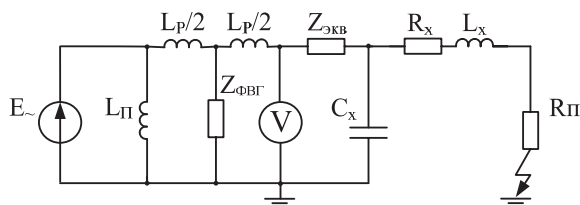
**Рис. 2.** Варианты к. з. в линии ПТ, состоящей из одного кабельного и двух воздушных участков

**Fig. 2.** Possible short-circuit cases in HVDC line, containing cable and overhead segments

Предлагаемый в [15] метод ОМП основывается на теории бегущих волн и реализуется с помощью вычисления конечных вейвлет-коэффициентов. Предлагаемые на сегодняшний день зарубежными компаниями приборы ОМП, разработанные на базе принципов, изложенных в [15, 16], являются дорогостоящими и требуют установки на каждой преобразовательной подстанции со стороны линии постоянного тока дополнительного оборудования (дифференцирующих трансформаторов, позволяющих точно зафиксировать фронт электромагнитной волны, приходящий от места к. з.).

В отечественной практике устройства ОМП для неоднородных линий ПТ, участки которых имеют неодинаковые погонные параметры и могут быть расположены несимметрично относительно выпрямительной и инверторной подстанций, отсутствуют вовсе.

В [17] предлагается рассмотреть спектральный метод ОМП для кабельно-воздушной неоднородной линии ПТ, по концам которой установлены ФВГ, включенные в среднюю точку сглаживающих реакторов. При этом схема моделирования замкнутой линии выглядит в соответствии с рис. 3.



**Рис. 3.** Схема замещения неоднородной линии ПТ при к. з. на одном из участков

**Fig. 3.** Equivalent circuit of the HVDC line, containing cable and overhead segments, during short-circuit in one segment

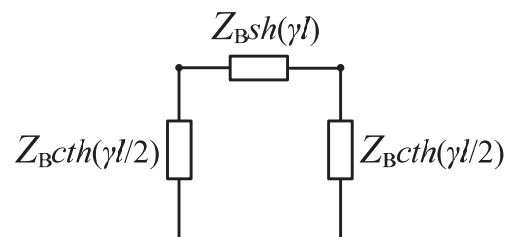
Для решения задачи ОМП в кабельно-воздушной линии ПТ необходимо учитывать неповрежденный однородный участок линии, расположенный между участком с другими погонными параметрами и преобразовательной подстанцией, на

котором произошло к. з. При этом короткозамкнутый участок линии (рис. 3) представляется эквивалентной схемой линии с сосредоточенными параметрами. Следование данному положению требует при рассмотрении к. з. на неоднородной линии ПТ представить неповрежденный однородный участок линии также эквивалентной схемой с сосредоточенными параметрами, в отличие от схемы, предложенной в [17], где неповрежденный однородный участок определялся по формуле

$$Z_{\text{ЭКВ}}(P) = Z_c(P) \text{cth}(\gamma l), \quad (4)$$

где  $Z_c(P)$  – операторное выражение волнового сопротивления неповрежденного однородного участка линии;  $l$  – длина неповрежденного однородного участка линии;  $\gamma$  – коэффициент распространения волны в однородном неповрежденном участке линии.

В соответствии с данными аргументами схема замещения неповрежденного однородного участка линии ПТ представляет собой схему искусственной линии с сосредоточенными параметрами [18, 19] (рис. 4).



**Рис. 4.** Схема замещения однородного неповрежденного участка линии ПТ

**Fig. 4.** Equivalent circuit of the HVDC line unfaultered segment

На рис. 4  $Z_B$  – волновое сопротивление однородного участка линии,  $l$  – длина однородного участка линии,  $\gamma$  – коэффициент распространения волны в однородном неповрежденном участке линии.

$$Z_c = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}; \quad \gamma = j\omega \sqrt{L_0 C_0}, \quad (5)$$

где  $L_0$ ,  $C_0$  – погонные параметры однородного участка линии;  $\omega$  – круговая частота.

При выполнении условия резонанса в контуре короткозамкнутой линии эквивалентное сопротивление контура оказывается бесконечно большим. Это соответствует нулевому значению проводимости контура, в выражение для которой входят в том числе погонный параметры неповрежденного участка линии ПТ, частота переходного процесса в контуре и искомое расстояние до места замыкания. Определив выражение для проводимости контура и приравняв числитель полученного выражения к нулю, представляется возможным найти из данного уравнения длину  $l_x$  короткозамкнутого участка линии ПТ.

Для расчета длины короткозамкнутого участка неоднородной линии ПТ на основе операторного метода определяется проводимость контура рис. 5,



в котором неповрежденный однородный участок линии представлен по схеме рис. 4. На рис. 5

$$Z_1 = Z_B \operatorname{cth}\left(\frac{\gamma l}{2}\right); \quad Z_2 = Z_B \operatorname{sh}(\gamma l).$$

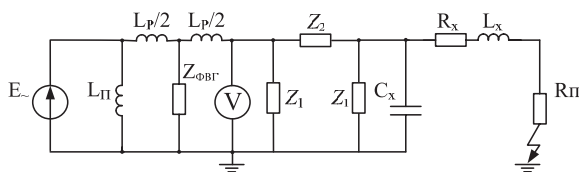


Рис. 5. Схема замещения неоднородной линии ПТ при к. з. одного из участков линии

Fig. 5. Equivalent circuit of the HVDC line, containing cable and overhead segments, at short-circuit

Схема рис. 5 преобразуется в схему в операторном виде рис. 6, где  $Y_{Пс}$  – эквивалентная проводимость преобразовательной подстанции,  $Z_{л}$  – эквивалентное сопротивление короткозамкнутого участка линии.

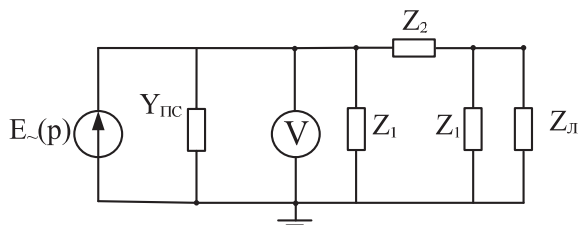


Рис. 6. Эквивалентная схема неоднородной линии ПТ, состоящей из двух участков

Fig. 6. Equivalent circuit of the HVDC line, containing one cable and one overhead segment

При усилении частоты в рассматриваемом колебательном контуре короткозамкнутой линии, т. е. возникновении резонанса в данном колебательном контуре, проводимость контура становится равной нулю:  $Y_{ЭКВ} = 0$ . Числитель эквивалентной проводимости  $Y_{ЭКВ}$  контура замкнутой линии в этом случае представляет собой квадратное уравнение относительно расстояния  $l_x$  до места к. з.:

$$\begin{aligned} & \frac{2}{\pi} p C_0 Z_1 \left[ \left( R_0 + \frac{2}{\pi} p L_0 \right) (Z_2 Y_{ФП} + DF) \right] l_x^2 + \\ & + \left[ \left( R_0 + \frac{2}{\pi} p L_0 \right) (Z_1 Y_{ФП} F + DE) + \right. \\ & \left. + \frac{2}{\pi} p C_0 Z_1 R_{П} (Z_1 Z_2 Y_{ФП} + DF) \right] l_x + \\ & + F (Z_1 Y_{ФП} R_{П} + D Z_1) + Y_{ФП} + D R_{П} E = 0, \end{aligned} \quad (6)$$

где

$$E = 2Z_1 + Z_2; \quad F = Z_1 + Z_2.$$

Искомое расстояние  $l_x$  до места замыкания в этом случае определяется как вещественная часть корня полученного квадратного уравнения:

$$l_{xч} = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}, \quad \text{км}, \quad (7)$$

где

$$\begin{aligned} a &= \frac{2}{\pi} p C_0 Z_1 \left[ \left( R_0 + \frac{2}{\pi} p L_0 \right) (Z_2 Y_{ФП} + DF) \right]; \\ b &= \left( R_0 + \frac{2}{\pi} p L_0 \right) (Z_1 Y_{ФП} F + DE) + \\ &+ \frac{2}{\pi} p C_0 Z_1 R_{П} (Z_1 Z_2 Y_{ФП} + DF); \\ c &= F Z_1 (Y_{ФП} R_{П} + D) + Y_{ФП} + D R_{П} E. \end{aligned}$$

Здесь  $a, b, c$  – коэффициенты в комплексной форме;  $p = -\alpha_0 + j2\pi f_0$  – оператор;  $f_0$  – частота с максимальной амплитудой в спектре напряжения поврежденного полюса электропередачи ПТ;  $D = 1 + p L_p' Y_{ВП}$ ;  $Y_{ВП} = Y_{ФВГ} + Y_{П}$ ;  $Y_{ФВГ}$  – проводимость ФВГ на стороне постоянного тока в операторной форме;  $Y_{П}$  – проводимость преобразователя постоянного тока с учетом индуктивности реактора, включенного между преобразователем и ФВГ постоянного тока, и эквивалентной индуктивности преобразовательных трансформаторов;  $R_{П}$  – величина переходного сопротивления в контуре замыкания;  $L_p'$  – индуктивность реактора, включенного между ФВГ на стороне постоянного тока и линией ПТ;  $L_0, C_0, R_0$  – параметры на 1 км длины однородного участка линии в контуре «провод-земля» на частоте  $f_0$ ;  $\alpha_0$  – параметр, определяющий затухание колебательного процесса разряда линии через место замыкания.

Для оценки величины  $\alpha_0$  предлагается прологарифмировать кривую напряжения поврежденного полюса линии. Поскольку затухание сигнала носит экспоненциальный характер, операция логарифмирования позволяет получить линейно убывающую функцию от времени вида

$$u = A \exp(-\alpha t). \quad (8)$$

Угловой коэффициент найденной функции, вычисленный, например, методом наименьших квадратов [20], представляет собой искомый коэффициент затухания.

В качестве прототипа модели кабельно-воздушной линии ПТ рассматривалась биполярная линия длиной 108 км (41 км – кабельный участок, 67 км – воздушный участок), напряжением  $\pm 300$  кВ и пропускной мощностью 1000 МВт с металлическим возвратом постоянного тока.

При замыканиях полюса линии ПТ на землю характер и в том числе частота переходного процесса зависят от параметров линии и параметров земли. Кабельный и воздушный участки линии ПТ моделировались в программно-вычислительном комплексе ЕМТР для расчета электромагнитных переходных процессов по цепочечной схеме [21, 22].

Для проверки предлагаемого алгоритма в модели неоднородной линии ПТ проводился опыт к. з. на воздушном участке линии на разном расстоянии  $l_{к.з.}$  от стыка двух участков линии – кабельного и воздушного. При этом оценивался частотный спектр аварийного напряжения линии, осциллографируемого на конце линии со стороны кабель-

ного участка, в спектре напряжения выявлялась частота  $f_{\text{модель\_макс}}$  с максимальной амплитудой. Далее при подстановке частоты  $f_{\text{модель\_макс}}$  в формулу (7) определялось расчетное расстояние  $l_{\text{расч}}=l_{\text{хч}}$  до места к. з. Частота  $f_{\text{модель\_макс}}$ , определенная при разложении в ряд Фурье кривой напряжения на осциллограмме аварийного процесса в модели линии, сравнивалась с расчетным значением частоты  $f_{\text{расч}}$ . Для нахождения  $f_{\text{расч}}$  в выражение (6) подставляется выражение для оператора  $p=-\alpha_0+j2\pi f_0$ , а в качестве длины  $l_x$  короткозамкнутого однородного участка – задаваемое при имитации аварийного процесса на модели расстояние  $l_{\text{к.з.}}$  от стыка кабельного и воздушного участков линии до места замыкания на воздушном участке. Искомое расчетное значение частоты  $f_0=f_{\text{расч}}$  определяется как вещественная часть корня квадратного уравнения:

$$f_0 = f_{\text{расч}} = \frac{-b_f + \sqrt{b_f^2 - 4a_f c_f}}{2a_f}, \quad (9)$$

где

$$a_f = 16pC_0L_0Z_1l_{\text{к.з.}}^2;$$

$$b_f = \frac{2}{\pi} j \left[ 4\alpha + 2\pi l_{\text{к.з.}} \left( \tilde{N}_0 l_x Z_1 R_0 (Z_2 Y_{\text{ФП}} + DF) + L_0 (Z_1 Y_{\text{ФП}} F + DE) + R_f C_0 (Z_1 Z_2 Y_{\text{ФП}} + DF) \right) \right];$$

$$c_f = \frac{4}{\pi^2} \alpha^2 \tilde{N}_0 l_{\text{к.з.}} Z_1 R_0 + \frac{2}{\pi} \alpha l_{\text{к.з.}} \left( \tilde{N}_0 l_x Z_1 R_0 (Z_2 Y_{\text{ФП}} + DF) + L_0 (Z_1 Y_{\text{ФП}} F + DE) + R_f C_0 (Z_1 Z_2 Y_{\text{ФП}} + DF) \right) + FZ_1 (Y_{\text{ФП}} R_{\text{П}} + D) + Y_{\text{ФП}} + DR_{\text{П}} E.$$

Полученные результаты сравнения частоты аварийного процесса и расстояния до места к. з., определенные в модели и расчетным образом, приведены в таблице.

**Таблица.** Сравнение частоты аварийного процесса и расстояния до места к. з., полученных в модели и расчетным образом

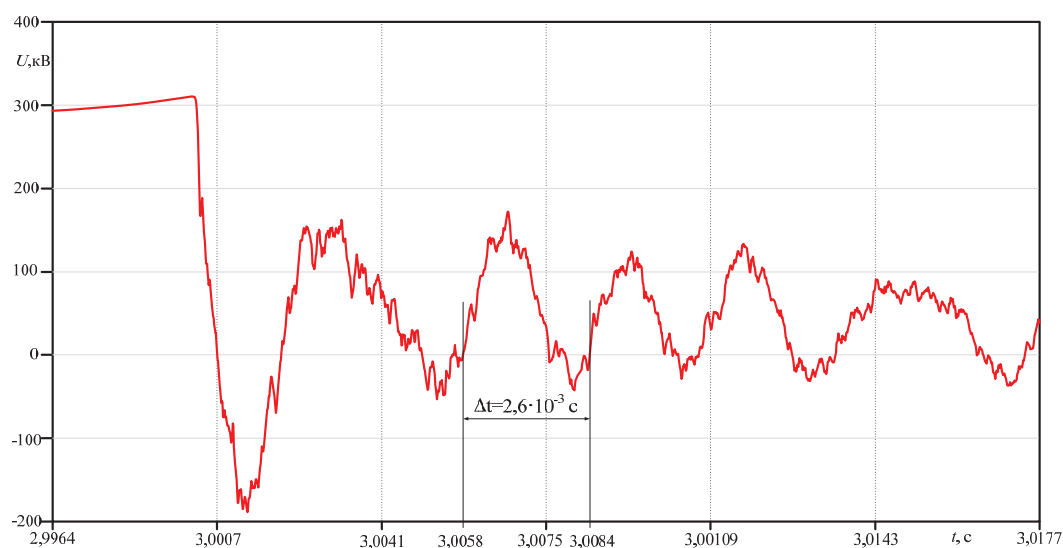
**Table.** Comparison of the transient frequency and fault distance obtained in the HVDC line model and by calculating

$l_{\text{кз}}, \text{ км}$ $l_{\text{шс}}, \text{ km}$	$f_{\text{модель\_макс}}, \text{ Гц}$ $f_{\text{модель\_макс}}, \text{ Hz}$	$f_{\text{расч}}, \text{ Гц}$ $f_{\text{расч}}, \text{ Hz}$	$l_{\text{расч}}, \text{ км}$ $l_{\text{расч}}, \text{ km}$
12,41	384	382	12,25
24,82	292	296	25,6
37,22	251	250,5	37,1
49,63	221	222	50,1
62,04	204	202	60,6

Из таблицы видно, что максимальное отклонение частоты, полученной расчетным образом по формуле (9) при подстановке заданного на модели расстояния  $l_{\text{к.з.}}$  до места замыкания, составляет 4 Гц. Максимальная погрешность определения по формуле (7) расстояния до места замыкания составляет  $\delta=2,1\%$  от длины короткозамкнутого однородного участка линии.

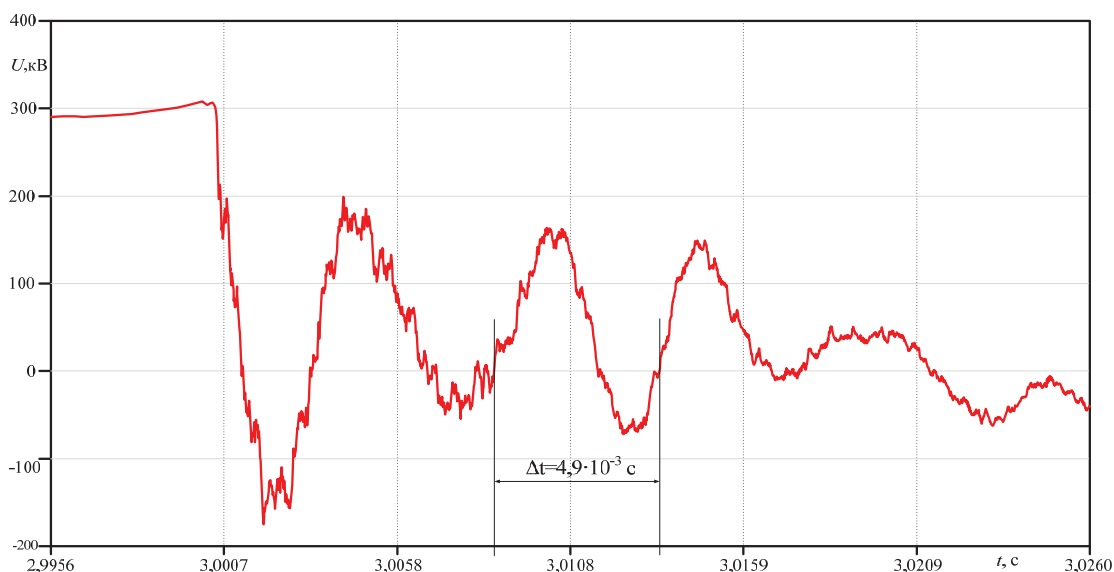
На рис. 7 и 8 приведены кривые напряжения, фиксируемого на поврежденном полюсе линии со стороны кабельного участка линии ПТ, при замыкании воздушного участка линии ПТ.

Таким образом, информация о частоте затухающих колебаний при переходном процессе разряда в короткозамкнутой линии ПТ позволяет определить расстояние до места повреждения. При этом погонные параметры линии могут быть рассчитаны по



**Рис. 7.** Кривая аварийного напряжения со стороны кабельного участка при к. з. на воздушном участке линии ПТ на расстоянии 12,41 км от стыка кабельного и воздушного участков линии ПТ

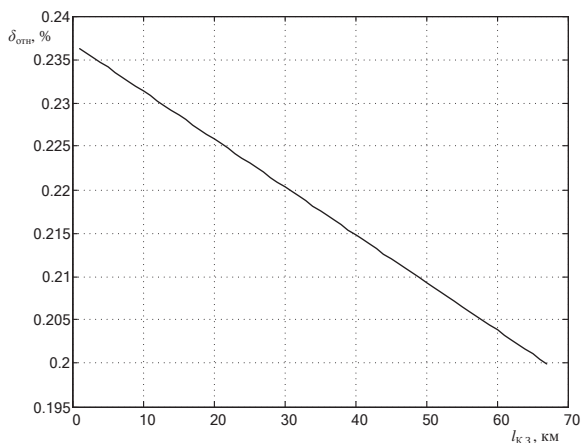
**Fig. 7.** Transient voltage curve obtained from the cable segment side during the overhead segment short-circuit on the 12,41 km distance from the cable and overhead segments junction point



**Рис. 8.** Кривая аварийного напряжения со стороны кабельного участка при к. з. на воздушном участке линии ПТ на расстоянии 62,04 км от стыка кабельного и воздушного участков линии ПТ

**Fig. 8.** Transient voltage curve obtained from the cable segment side during the overhead segment short-circuit on the 62,04 km distance from the cable and overhead segments junction point

геометрическому расположению проводов на опоре, а частота колебаний в короткозамкнутой линии может быть определена исходя из спектрального (частотного) анализа аварийного напряжения ВЛ.



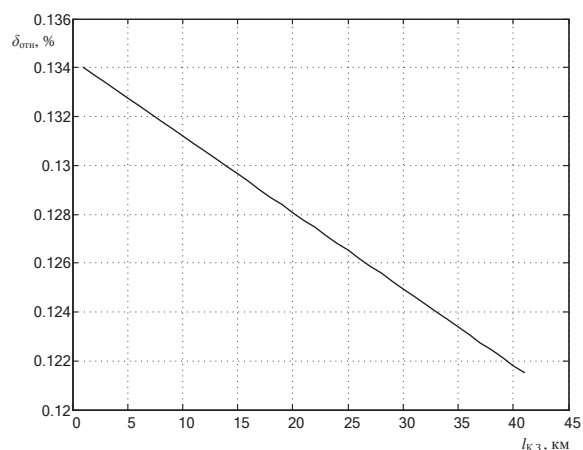
**Рис. 9.** Относительная погрешность предлагаемого метода ОМП при к. з. на воздушном участке линии ПТ через переходное сопротивление  $R_{п}=30$  Ом

**Fig. 9.** Relative error of the proposed LFL method during short-circuit in the HVDC line overhead segment with the 30 Ohm transient resistance

На схемах моделирования короткозамкнутой линии ПТ (рис. 3, 5) показано переходное сопротивление  $R_{п}$  в контуре замыкания. Величина  $R_{п}$  может принимать как наиболее вероятное значение сопротивления заземления опоры линии – в случае возникновения перекрытия линии на опору, так и сопротивления контура протекания тока

к. з. – например, в случае возникновения перекрытия линии на деревья. В отличие от сопротивления заземления опоры ВЛ, величина которого определяется в ПУЭ и находится в пределах 10–30 Ом, сопротивление дерева является величиной неизвестной и может быть выше указанных значений.

На рис. 9 и 10 приведены относительные погрешности алгоритма ОМП на базе спектрального метода при к. з. на воздушном участке линии ПТ (рис. 9) и при к. з. на кабельном участке линии ПТ (рис. 10) через переходное сопротивление 30 Ом.



**Рис. 10.** Относительная погрешность предлагаемого метода ОМП при к. з. на ВЛ 110 кВ через переходное сопротивление  $R_{п}=30$  Ом

**Fig. 10.** Relative error of the proposed LFL method during short-circuit in the HVDC line cable segment with the 30 Ohm transient resistance

На рис. 9 видно, что погрешность спектрально-го метода ОМП, обусловленная наличием переходного сопротивления в месте к. з. величиной порядка 30 Ом, не превышает 0,24 % от длины короткозамкнутого воздушного участка линии постоянного тока. Для кабельного участка линии постоянного тока, как показано на рис. 10, данная погрешность не превышает 0,14 %.

#### Выводы

Для повышения точности ОМП на ВЛ постоянного тока предлагается проводить детальный анализ частотных составляющих аварийных сигналов по концам ВЛ. В качестве информативного сигнала рассматривается напряжение поврежденного полюса электропередачи ПТ.

Расчет расстояния до места замыкания через переходное сопротивление линии ПТ производит-

ся с учетом двухчастотного фильтра высших гармоник на стороне постоянного тока, включенного в среднюю точку линейного реактора. Для этой цели определяется полная эквивалентная проводимость колебательного контура линии и преобразовательной подстанции.

Учет однородного неповрежденного участка линии при выводе формул для расчета эквивалентной проводимости колебательного контура неоднородной короткозамкнутой линии предлагается производить путем замещения его эквивалентной схемой искусственной линии с сосредоточенными параметрами.

Погрешность предлагаемого метода ОМП, обусловленная наличием переходного сопротивления неизвестной величины в месте к. з., для кабельного и воздушного участков линии не превышает 0,25 % от длины короткозамкнутого однородного участка линии.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Суслова О.В. Современное состояние технологий электропередачи постоянным током и расширение областей их применения в мировой электроэнергетике (по материалам 45-й сессии СИГРЭ) // Известия НТЦ Единой энергетической системы. – 2014. – № 2 (71) – С. 154–164.
2. HVDC Transmission: Power Conversion Applications in Power Systems / С.-К. Kim, V.K. Sood, G.-S. Jang, S.-J. Lim, S.-J. Lee. – Singapore: Wiley-IEEE Press, 2009. – DOI: 10.1002/9780470822975.ch2
3. Бальбердин Л.Л. Развитие техники электропередачи постоянным током высокого напряжения в отечественной энергетике. Вклад НИИПТ в теорию и практику создания ППТ и ВПТ (краткий исторический очерк) // Известия НТЦ Единой энергетической системы. – 2013. – № 2 (69). – С. 130–148.
4. Ruban N.Yu., Gusev A.S., Pishchulin A.Yu. Application of Detailed Phase Comparison Protection Models for the Analysis of its Operation in Networks with Facts Devices // MATEC Web of Conferences 37. – Tomsk, September 28 – October 2, 2015. – P. 1–5.
5. Разработка гибридных моделей высоковольтных передач постоянного тока для задач всережимного анализа больших энергосистем / А.В. Прохоров, А.С. Васильев, Н.Ю. Рубан, Р.А. Уфа // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 324. – № 4. – С. 123–132.
6. Abur A., Magnago F.H. Fault location using wavelets // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1998. – № 13 (4). – P. 1475–1480.
7. Abur A., Magnago F.H. Use of time delays between modal components in wavelet based fault location // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2000. – № 22 (6). – P. 397–403.
8. Cui H., Tu N. HVDC Transmission Line Fault Localization Base on RBF Neural Network with Wavelet Packet Decomposition // 12<sup>th</sup> International Conference on Service Systems and Service Management (ICSSSM). – Guangzhou, 22–24 June, 2015. – P. 1–4.
9. S-transform based pilot protection method for HVDC transmission lines / Zh. Li, G. Zou, T. Du, W. Yang // 5<sup>th</sup> International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT). – Changsha, 26–29 November 2015. – P. 1667–1672.
10. Shukr M., Thomas D.W.P., Zanchetta P. VSC-HVDC transmission line faults location using active line impedance estimation // 2<sup>nd</sup> IEEE ENERGYON Conference&Exhibition. – Florence, 9–12 September, 2012. – P. 244–248.
11. Chen P., Xu B., Li Jing. A Traveling Wave Based Fault Locating System for HVDC Transmission Lines // International Conference on Power System Technology. – Chongqing, 22–26 October, 2006. – P. 1–4.
12. Nanayakkara O.M.K.K., Rajapakse A.D., Wachal R. Traveling-wave-based line fault location in star-connected multiterminal HVDC systems // IEEE Power & Energy Society General Meeting. – Vancouver, BC, 21–25 July, 2013. – P. 1.
13. Спектральный метод определения места повреждения на линии постоянного тока / К.А. Герцик, М.И. Мазуров, С.И. Минкин, А.Х. Шлайфштейн // Сб. научных трудов «Автоматизированные системы управления технологическими процессами крупных подстанций, электропередач и вставок постоянного тока». – Л.: Изд-во Энергоатомиздат, 1991. – С. 27–34.
14. Испытания прибора для обнаружения места короткого замыкания на линии электропередачи постоянного тока Волгоград–Донбасс / К.А. Герцик, А.Г. Замятин, М.И. Мазуров, В.Т. Минин, С.И. Минкин // Электрические станции. – 1992. – № 12. – С. 45–53.
15. Nanayakkara O.M.K.K., Rajapakse A.D., Wachal R. Location of DC Line faults in conventional HVDC systems with segments of cables and overhead lines using terminal measurements // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2012. – V. 27. – № 1. – P. 279–288.
16. Thailand-Malaysia HVDC Line Fault Locator System Upgrade / S. Mekkhachai, N.A.A. Ramon, W. Erickson, R. Wachal // HVDC Users Conference. – Shanghai, 23–25 October, 2011. – P. 1–4.
17. Иванова Е.А., Лозина Н.Г., Мазуров М.И. Определение места повреждения в линии электропередачи постоянного тока на базе спектрального метода // Энерго-Эксперт. – 2014. – № 5 (46). – С. 16–19.
18. Атабеков Г.И. Теоретические основы электротехники. Часть первая. Линейные электрические цепи. – М.: Изд-во «Энергия», 1966. – 318 с.
19. Евдокунин Г.А. Электрические системы и сети. – СПб.: Изд-во «Синтез Бук», 2011. – 286 с.
20. Линник Ю.В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений. – 2-е изд. – М.: Изд-во «Физматгиз», 1962. – 349 с.
21. Поссе А.В. Схемы и режимы электропередач постоянного тока. – Л.: Изд-во «Энергия», 1973. – 302 с.
22. Левинштейн М.Л. Операционное исчисление в задачах электротехники. – 2-е изд., доп. – Л.: Изд-во «Энергия», 1972. – 360 с.

Поступила 29.06.2016 г.

#### **Информация об авторах**

**Иванова Е.А.**, младший научный сотрудник ОАО «Научно-исследовательский институт по передаче электроэнергии постоянным током высокого напряжения».

**Лозинова Н.Г.**, кандидат технических наук, доцент, заместитель генерального директора, заведующая НИО-1, ОАО «Научно-исследовательский институт по передаче электроэнергии постоянным током высокого напряжения».



UDC 621.314

## LINE FAULT LOCATION FEATURES IN THE HVDC LINES CONTAINING CABLE AND OVERHEAD SEGMENTS

Elena A. Ivanova<sup>1</sup>,  
eleshka.ivanova@gmail.com

Nataliya G. Lozinova<sup>1</sup>,  
loz2000@mail.ru

<sup>1</sup> JSC High voltage direct current power transmission research institute,  
14/A, Kurchatov Street, Saint-Petersburg, 194223, Russia.

The background and relevance of HVDC technology development for Russian electric power system is caused by its operating features and functioning conditions of the Russian Unified Power System (UPS). Using HVDC systems can solve a number of problems, existing nowadays in Russian UPS, such as power supplement of oil platforms and territories accessed through the water barriers, the connection of renewable energy sources to the UPS and to local power grids and others known problems. The relevance of the discussed issue is caused by the need of improving the accuracy of the fault location in the HVDC transmission lines and by the absence of that line fault location (LFL) devices in Russian energy development practice.

**The main aim** of the study is to improve the accuracy of the spectrum method algorithm for LFL issue for the HVDC lines; to develop the formula of the unknown fault distance determination relying on the transient frequency, HVDC line parameters and the length of HVDC line faulted segment with consideration of an unfaulted segment in the equivalent circuit of the HVDC system.

**The methods used in the study.** The authors have used the analytical research methods for determining the formula, which allows solving the problem of LFL in DC line using spectrum method. While investigating the accuracy of the proposed LFL spectrum method the mathematical modeling techniques were used.

**The results.** The authors proposed the LFL spectrum method solving the issue of fault distance determination in the HVDC line containing cable and overhead segments. This method considers the HVDC line containing also smoothing reactors and high harmonic filters. The authors proposed as well the equivalent circuit of the HVDC line unfaulted segment – the equivalent line lumped model. The formula to determine LFL distance, in dependence of the main frequency in the transient voltage spectrum, line parameters and equivalent circuit parameters, was obtained. Inaccuracy of the proposed method, injected by the undetermined value of transient resistance, was estimated.

### Key words:

Electrical power transmission line, HVDC transmission line, short circuit, line fault location, transient resistance, spectrum method, travelling wave method.

### REFERENCES

- Suslova O.V. State-of-the-art of HVDC power transmissions and development of their application in the global power industry (review of 45<sup>th</sup> CIGRE session reports). *STC of Unified Power System Proceedings*, 2014, no. 2 (71), pp. 154–164. In Rus.
- Kim C.-K., Sood V. K., Jang G.-S., Lim S.-J., Lee S.-J. *HVDC Transmission: Power Conversion Applications in Power Systems*. Singapore, Wiley-IEEE Press, 2009. DOI: 10.1002/9780470822975.ch2
- Balyberdin L.L. Development of technology of an electricity transmission by HVDC in native power system. Contribution of NIPT to the theory and practice of creation of HVDC and HVDC back-to-back (short historical sketch). *STC of Unified Power System Proceedings*, 2013, no. 2 (69), pp. 130–148. In Rus.
- Ruban N. Yu., Gusev A.S., Pishchulin A. Yu. Application of Detailed Phase Comparison Protection Models for the Analysis of its Operation in Networks with Facts Devices. *MATEC Web of Conferences*. Tomsk, 2015. pp. 1–5.
- Prokhorov A.V., Vasilev A.S., Ruban N. Yu. Synthesis of a hybrid model of the VSC FACTS devices and HVDC technologies. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 324, no. 4, pp. 123–132. In Rus.
- Abur A., Magnago F.H. Fault location using wavelets. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1998, no. 13 (4), pp. 1475–1480.
- Abur A., Magnago F.H. Use of time delays between modal components in wavelet based fault location. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2000, no. 22 (6), pp. 397–403.
- Cui H., Tu N. HVDC Transmission Line Fault Localization Base on RBF Neural Network with Wavelet Packet Decomposition. *12<sup>th</sup> International Conference on Service Systems and Service Management (ICSSSM)*. Guangzhou, 2015. pp. 1–4.
- Li Zh., Zou G., Du T., Yang W. S-transform based pilot protection method for HVDC transmission lines. *5<sup>th</sup> International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT)*. Changsha, 2015. pp. 1667–1672.
- Shukr M., Thomas D. W. P., Zanchetta P. VSC-HVDC transmission line faults location using active line impedance estimation. *2<sup>nd</sup> IEEE ENERGYON Conference&Exhibition*. Florence, 2012. pp. 244–248.
- Chen P., Xu B., Li Jing A Traveling Wave Based Fault Locating System for HVDC Transmission Lines. *International Conference on Power System Technology*. Chongqing, 2006, pp. 1–4.
- Nanayakkara O.M.K.K., Rajapakse A.D., Wachal R. Traveling-wave-based line fault location in star-connected multiterminal HVDC systems. *IEEE Power & Energy Society General Meeting*. Vancouver, BC, 2013. p. 1.
- Gertsik K.A., Mazurov M.I., Minkin C.I., Shlayshsteyn A.Kh. Spektralny metod opredeleniya mesta povrezhdeniya na linii postoyannogo toka [Spectrum line fault location method in the HVDC transmission line]. *Avtomatizirovannye sistemy upravleniya tekhnologicheskimi protsessami krupnykh podstantsii, elektroperedach i vstavok postoyannogo toka* [Automated control systems of the procedures at major substations, power transmission and HVDC link]. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1991, pp. 27–34.

14. Gertsik K.A., Zamyatin A.G., Mazurov M.I., Minin V.T., Minin S.I. Ispytaniya pribora dlya obnaruzheniya mesta korotkogo zamykaniya na linii elektroperedachi postoyannogo toka Volgograd–Donbass [Tests of the device to detect line fault location point in the Volgograd–Donbass HVDC transmission line]. *Elektricheskie stantsii*, 1992, no. 12, pp. 45–53.
15. Nanayakkara O.M.K.K., Rajapakse A.D., Wachal R. Location of DC line faults in conventional HVDC systems with segments of cables and overhead lines using terminal measurements. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2012, vol. 27, no. 1, pp. 279–288.
16. Mekkhachai S., Ramon N.A.A., Erickson W., Wachal R. Thailand-Malaysia HVDC Line Fault Locator System Upgrade. *HVDC USERS CONFERENCE*. Shanghai, 2011. pp. 1–4.
17. Ivanova E.A., Lozinova N.G., Mazurov M.I. Opredelenie mesta povrezhdeniya v linii elektroperedachi postoyannogo toka na baze spektralnogo metoda [Line fault location algorithm in the HVDC line based on the spectrum method]. *EnergoEkspert*, 2014, no. 5 (46), pp. 16–19.
18. Atabekov G.I. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki. Ch. 1. Lineinye elektricheskie tsepi* [Theoretical foundations of electrical engineering. P. 1. Linear electric circuits]. Moscow, Energiya Publ., 1966. 318 p.
19. Evdokunin G.A. *Elektricheskie sistemy i seti* [Electrical systems and networks]. Saint-Petersburg, Sintez Buk Publ., 2011. 286 p.
20. Linnik Yu.V. *Metod naimenshikh kvadratov i osnovy matematiko-statisticheskoy teorii obrabotki nablyudeniy* [Least square method and fundamentals of the math-statistical theory of observation analysis]. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1962. 349 p.
21. Posse A.V. *Skhemy i rezhimy elektroperedach postoyannogo toka* [Schemes and operating modes of the HVDC systems]. Leningrad, Energiya Publ., 1973. 302 p.
22. Levinshcheyn M.L. *Operatsionnoe ischislenie v zadachakh elektrotekhniki* [Operational calculus for electrical engineering issues]. Leningrad, Energiya Publ., 1972. 360 p.

Received: 29 June 2016.

#### Information about the authors

**Elena A. Ivanova**, junior researcher, High voltage direct current power transmission research institute.

**Nataliya G. Lozinova**, Cand. Sc., deputy general manager, associate professor, High voltage direct current power transmission research institute.

УДК 532.5.032+532.516.5+532.574.7+532.528+532.582.32

## РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КАВИТАЦИОННОГО ОБТЕКАНИЯ ГИДРОКРЫЛА NACA0015

**Сентябов Андрей Васильевич**<sup>1,2,3</sup>,  
sentyabov\_a\_v@mail.ru

**Тимошевский Михаил Викторович**<sup>1,2</sup>,  
timoshevskiy.mv@gmail.com

**Первунин Константин Сергеевич**<sup>1,2</sup>,  
pervunin@itp.nsc.ru

**Гаврилов Андрей Анатольевич**<sup>1,2,3</sup>,  
gavand@yandex.ru

**Маркович Дмитрий Маркович**<sup>1,2,4</sup>,  
dmark@itp.nsc.ru

**Дектерёв Александр Анатольевич**<sup>1,2,3</sup>,  
dekterev@mail.ru

<sup>1</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 1.

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

<sup>3</sup> Сибирский федеральный университет, Россия, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79.

<sup>4</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Одним из основных возобновляемых источников энергии являются гидроэнергетические ресурсы, используемые для выработки электрической энергии на гидроэлектростанциях. Существенную научную и техническую проблему для проектирования оборудования гидроэлектростанций представляет собой кавитация, обусловленная большими скоростями течения воды вблизи лопастей рабочего колеса. Появление кавитации характерно и для других турбомашин, насосов, гидравлического оборудования, движителей судов и т. д. Кавитация приводит к снижению энергетической эффективности и повышенному износу оборудования. Потребности моделирования турбулентного обтекания лопастных систем, работа которых сопровождается кавитацией, требуют развития современных численных методов, способных с приемлемой точностью предсказывать возникновение кавитации и описывать динамику течения.

**Цель работы:** исследование кавитационного течения в окрестности модельного гидропрофиля NACA0015 с помощью экспериментальных и численных методов, сопоставление результатов моделирования с данными измерений, анализ влияния модели турбулентности на результаты расчета течения в пограничном слое со стороны разрежения гидрокрыла.

**Методы исследования.** Пространственная структура и динамика кавитационных каверн изучалась с помощью высокоскоростной визуализации, по данным которой также производилась оценка интегральных параметров каверн. Двумерные распределения средней скорости и турбулентных характеристик вблизи гидрокрыла были получены методом анемометрии по изображениям частиц (PIV) как в одно- (некавитирующих), так и в двухфазных (кавитирующих) течениях. При численном моделировании течений использовались методы вычислительной гидродинамики, основанные на решении уравнений Рейнольдса для турбулентного течения с помощью метода контрольного объема на трехмерной сетке из гексаэдральных ячеек. Учет дисперсной фазы (кавитационных пузырей и их скоплений) производился путем решения уравнения переноса доли пара. Турбулентность описывалась с помощью двухпараметрической модели  $k-\omega$  SST, дифференциальной модели переноса рейнольдсовых напряжений (RSM) и метода моделирования отсоединенных вихрей (DES).

**Результаты.** В экспериментах был получен полный набор данных, позволяющих проводить прямой анализ результатов измерений и численного моделирования, а также сравнение расчетных моделей между собой. Выполненные расчеты показали, что даже в случае небольшой паровой каверны за передней кромкой гидропрофиля для корректного описания присоединения потока к поверхности ниже по течению требуется привлечение метода замыкания второго порядка – дифференциальной модели переноса рейнольдсовых напряжений. Когда размер каверны становится большим, нестационарность потока является определяющим фактором турбулентного переноса. Моделирование с использованием вихреразрешающих методов позволило выявить периодическую динамику паровой каверны на низких частотах. Присоединение потока за каверной в нестационарном случае также лучше предсказывается моделью переноса рейнольдсовых напряжений.

### **Ключевые слова:**

Гидроэлектростанция, кавитация, частичные парогазовые каверны, нестационарность, гидрокрыло, NACA0015, турбулентность, высокоскоростная визуализация, PIV, численное моделирование, RSM, DES.



## Введение

Одним из наиболее востребованных и энергоемких возобновляемых источников энергии являются естественные мощные потоки воды, например полноводные реки и реки с большим перепадом высот, на которых преимущественно и строятся классические плотинные гидроэлектростанции. Высокие скорости течения в проточных трактах гидротурбин приводят к появлению кавитации, развитию нестационарных явлений и механическому износу рабочих механизмов и конструкций, что негативным образом сказывается на их эффективности и безопасности. Кавитация, возникающая со стороны разрежения лопастей рабочего колеса и лопаток направляющего аппарата турбомашин, серьезно снижает гидравлические характеристики гидроагрегатов и приводит к эрозионному износу поверхности их элементов [1, 2]. Появление паровой каверны в значительной степени изменяет структуру всего течения, модифицируя пограничный слой, приводя к возникновению отрывных зон и, как следствие, развитию крупномасштабных нестационарностей, которые определяют турбулентный перенос импульса и распределение паровой фазы в потоке в различные моменты времени. Таким образом, кавитация существенно усложняет задачу моделирования турбулентных течений, так как распространенные простые и малозатратные с точки зрения вычислительных ресурсов инженерные модели турбулентности не позволяют в полной мере и с приемлемой точностью описывать данный вид течений, поскольку разрабатываются и калибруются на относительно простых сдвиговых течениях. Соответственно, при моделировании кавитирующих течений необходимо учитывать изменение параметров паровой каверны в динамике. Это, в свою очередь, требует применения нестационарных методов расчета, таких как URANS (Unsteady Reynolds-Averaged Navier–Stokes Equations, т. е. нестационарные усредненные по Рейнольдсу уравнения Навье–Стокса) или гибридных – RANS/LES (Large Eddy Simulation, т. е. метод моделирования крупных вихрей), позволяющих явно разрешать крупномасштабные нестационарные процессы. В то же время турбулентный пограничный слой, будучи изначально квазидвумерным, подвергается действию трехмерных эффектов из-за наличия каверны и, как следствие, может сильно отличаться от однофазного случая. Так, вследствие образования каверны и инициирования ею отрыва ниже по потоку может наблюдаться сильная анизотропия турбулентных напряжений. Данное обстоятельство можно корректно учесть в семействе дифференциальных моделей переноса рейнольдсовых напряжений (RSM – Reynolds Stress Model), которые до настоящего времени еще не получили такого широкого распространения, как двухпараметрические модели турбулентности ( $k$ - $\varepsilon$  и  $k$ - $\omega$ ). Еще более перспективными являются нестационарные расчеты с ис-

пользованием данного подхода [3], которые, однако, являются весьма требовательными к вычислительным ресурсам.

Вообще говоря, существующие методы моделирования кавитирующих течений достаточно разнообразны. Однако до сих пор не существует универсального подхода, который одинаково хорошо описывал бы все кавитационные явления. В настоящее время наиболее широкое распространение получили модели, в которых двухфазная система рассматривается как сплошная среда, состоящая из двух компонент (жидкости и пара) и имеющая непрерывное распределение плотности. Свойства такой двухфазной смеси пространственно неоднородны и зависят от локального значения объемной доли пара. С другой стороны, с прикладной точки зрения кавитация наилучшим образом описывается моделями квазигомогенной двухфазной среды, в которых рассматриваются процессы образования пара, его переноса и конденсации, с помощью которых можно отслеживать изменение неравновесного состояния двухфазной системы во времени. В основе этих моделей лежит уравнение переноса объемной или массовой доли одной из фаз, включающее источниковое слагаемое, которое описывает испарение и конденсацию. Соотношения, связывающие скорость массообмена между фазами с параметрами течения, суть модель кавитации. Скорость паровой фазы в уравнениях переноса, как правило, считается равной скорости смеси. Это справедливо, поскольку парообразование и конденсация пара – быстротекающие, в сравнении с характерными временами задачи, процессы.

Все модели кавитации, в основе которых лежит уравнение переноса, можно разделить на два основных класса в соответствии с тем, какой фактор определяет термодинамически неравновесное состояние двухфазной системы. В моделях первого типа принимается, что давление пара, так же как и давление жидкости на границе паровой каверны, равно локальному осредненному давлению среды и отличается от давления насыщенного пара. Причиной неравновесности является конечная (пусть и большая по сравнению с другими процессами) скорость испарения и/или конденсации пара, определяемая молекулярно-кинетическими процессами на границе раздела фаз. К этой группе относятся популярные модели Kunz et al. [4] и Merkle et al. [5]. Их особенностью является применение двух разных стратегий для моделирования образования и конденсации паровой фазы. Модели второго типа основаны на решении уравнения Рэлея–Плессета, описывающего динамику размера одиночного парового пузырька [6]. При их построении уравнение Рэлея–Плессета упрощается и принимается, что каждый пузырек в области кавитации расширяется или схлопывается так же, как одиночный пузырек в неограниченном объеме жидкости, а давление на бесконечном удалении от пузырька равно локальному осредненному давлению.

нию. При этом пар в пузырьке считается насыщенным, и, следовательно, равновесие между процессами испарения и конденсации считается установившимся. Между тем давление паровой фазы отличается от локального осредненного давления среды.

Модели обеих групп требуют для своего завершения и однозначного формулирования привлечения некоторых эмпирических соображений. Для первой группы неопределенной остается удельная поверхность контакта фаз, для второй – средний радиус кавитационных пузырьков либо распределение пузырьков по размерам. Так, в модели Singhal [7, 8], относящейся ко второму классу, средний радиус пузырьков берется равным максимально возможному размеру, который определяется соотношением сил гидродинамического сопротивления и поверхностного натяжения. На практике в зависимости от решаемой задачи эмпирические коэффициенты в моделях кавитации могут иметь значения, отличные от используемых при их формулировке. Например, в [9] показано, что три разных модели, коэффициенты которых были адаптированы по экспериментальным данным, дают достаточно близкие результаты и обеспечивают примерно одинаковую точность при решении задачи о развитии пленочной кавитации на гидропрофиле. Это связано с тем, что локальная концентрация пара устанавливается достаточно быстро в независимости от модели кавитации, так как характерное время массообмена, которое можно оценить по радиусу пузырька, для задач кавитационного обтекания гидропрофиля много меньше характерных гидродинамических временных масштабов, таких как время обтекания, период срыва вихрей и время жизни энергонесущих вихрей. Тем самым объясняется то обстоятельство, что столь разные модели дают качественно схожие результаты.

Помимо массообмена (испарения и конденсации) большую роль в технологических процессах, сопровождающихся кавитацией, играет турбулентный перенос. Моделирование турбулентности в таких течениях критически важно из-за сложной трехмерной структуры, отрывов и присоединения потока, нестационарности течения и т. д. В данной статье проводится анализ результатов численного моделирования кавитационного обтекания гидрокрыла NACA0015 [10, 11] моделями турбулентности различного уровня в сравнении с экспериментальными данными: двухпараметрической моделью  $k-\omega$  SST (Shear Stress Transport), дифференциальной моделью переноса рейнольдсовых напряжений (RSM) и методом моделирования отсоединенных вихрей (DES). Основной акцент сделан на исследованиях влияния паровой каверны на развитие турбулентного пограничного слоя со стороны разрежения гидропрофиля.

### Описание эксперимента

Экспериментальные исследования проводились на кавитационном стенде Института теплофизики СО РАН, подробное описание которого дано в [12]. Рабочий канал стенда длиной 1,3 м и поперечным сечением  $a \times b = 80 \times 250$  мм был оснащен смотровыми окнами для проведения визуальных наблюдений. Перед рабочим каналом располагался конфузور длиной 790 мм, профилированный полиномом четвертой степени. Степень поджатия конфузора (отношение площади входного к площади выходного сечения) составляла 16. Начальный уровень турбулентности на входе в рабочий канал  $\tilde{u}_0/U_0$  не превышал 1 %. На входе и выходе рабочего канала производился контроль статического давления: отверстие для отбора давления для датчика  $P_1$  находилось на расстоянии 80 мм от входного сечения, для датчика  $P_2$  – на расстоянии 70 мм от выходного сечения. Отверстия для отбора давления обоих датчиков располагались в центральном поперечном сечении рабочего канала на большей его стороне. За рабочим каналом следовал диффузор с углом раскрытия  $3,5^\circ$  на меньшую сторону (а) и параллельными стенками на большую сторону (b).

Объектом исследования выступало гидрокрыло серии NACA0015 с длиной хорды  $C=100$  мм, изготовленное из латуни со средним уровнем шероховатости 1,5 мкм. Согласно номенклатуре данной серии профиль крыла NACA00xx является симметричным и описывается формулой:

$$y_f(x_f) = 5t_f C \left[ \begin{array}{l} 0,2969\sqrt{\frac{x_f}{C}} - 0,1260\left(\frac{x_f}{C}\right) - \\ -0,3516\left(\frac{x_f}{C}\right)^2 + 0,2843\left(\frac{x_f}{C}\right)^3 - \\ -0,1036\left(\frac{x_f}{C}\right)^4 \end{array} \right],$$

где  $x_f$  – расстояние от передней кромки вдоль главной хорды;  $y_f$  – полуширина крыла при данном  $x_f$ ;  $t_f$  – отношение максимальной ширины крыла к длине главной хорды  $C$ . Последние две цифры номенклатуры выражают  $t_f$  в процентах, то есть для NACA0015  $t_f=0,15$ . Гидрокрыло крепилось консольным образом к большей стенке рабочего канала. Ось крепления и вращения проходила через геометрический центр гидропрофиля и была расположена по центру канала на расстоянии 770 мм от его входа.

В качестве рабочей жидкости была использована дистиллированная вода. Дегазация воды с целью уменьшения концентрации растворенного в ней воздуха не проводилась. Число Рейнольдса  $Re$ , рассчитанное по среднерасходной скорости тече-

ния  $U_0$  и хорде гидрокрыла  $C$ , изменялось в пределах  $1...8 \cdot 10^6$ . Среднерасходная скорость определялась как  $U_0 = Q / (a \times b)$ , где  $Q$  – объемный расход жидкости. Для определения значения расхода  $Q$  проводились измерения средней скорости течения методом PIV в центральном сечении рабочего канала на расстоянии порядка  $1C$  вверх по потоку от передней кромки гидрокрыла, которые затем усреднялись по всему сечению. Расход  $Q$  рассчитывался как произведение получившейся среднерасходной скорости и площади сечения рабочего канала:  $S = a \times b = 0,02 \text{ м}^2$ . Число кавитации – безразмерный параметр, характеризующий режим кавитационного обтекания и являющийся отношением разницы статического давления на входе в рабочий канал и давления насыщенных паров воды к напору потока:  $\sigma = (p_1 - p_{\text{vap}}) / (\rho U_0^2 / 2)$ , где  $\rho$  – плотность воды,  $p_1$  – значение давления на входе в рабочий канал, измеренное датчиком  $P_1$ ,  $p_{\text{vap}}$  – давление насыщенных паров воды.

Скорость течения измерялась методом анемометрии по изображениям частиц (Particle Image Velocimetry – PIV) в сечении, проходящем через центральную продольную плоскость рабочего канала вдоль большей его стороны. Толщина лазерного «ножа», сформированного цилиндрической линзой, составляла около  $0,8 \text{ мм}$ . Размер измерительной области был примерно  $124 \times 124 \text{ мм}$ . Для проведения PIV-измерений в поток добавлялись трассеры, покрытые флуоресцентным красителем (средний размер  $10 \text{ мкм}$ , диапазон длин волн излучения  $550...700 \text{ нм}$ ). Для улучшения качества регистрируемых изображений перед расчетом полей скорости исходные данные последовательно подвергались двум процедурам предварительной обработки: вычит среднего поля интенсивности и маскирование. При расчете полей скорости учитывалась локальная концентрация трассеров. Валидация рассчитанных векторных полей осуществлялась поочередно тремя процедурами: валидация по соотношению сигнал/шум, адаптивная медианная фильтрация и кластерная валидация. Более подробное описание условий применения метода PIV и параметров обработки данных дано в [12]. В результате проведенных измерений были получены пространственные распределения средней скорости и турбулентных характеристик течения в области над крылом (со стороны разрежения).

#### Описание расчетной модели

Моделирование кавитирующего течения вблизи гидрокрыла NACA0015 осуществлялось в программном пакете Ansys Fluent и было основано на решении трехмерных уравнений Рейнольдса, описывающих турбулентное течение несжимаемой жидкости, с помощью метода контрольного объема в переменных скорость–давление. Для моделирования кавитации к уравнениям Рейнольдса добавляется уравнение переноса доли пара. Свойства двухфазной смеси зависят от локального значения

объемной доли пара  $\alpha_v$ , в частности ее плотность  $\rho$  определяется как плотность двухкомпонентной среды через плотности отдельных фаз:

$$\rho = \alpha_v \rho_v + (1 - \alpha_v) \rho_L,$$

где  $\rho_v$  и  $\rho_L$  – плотности пара и жидкости соответственно. Уравнение переноса объемной доли пара имеет вид

$$\frac{\partial(\rho \alpha_v)}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{v} \alpha_v) = R_e - R_c,$$

где  $\mathbf{v}$  – вектор скорости,  $t$  – время, а в правой части находятся объемные скорости испарения ( $R_e$ ) и конденсации ( $R_c$ ). Для определения последних применялась модель Zwart–Gerber–Belamri [13], основанная на упрощенном уравнении Рэлея–Плессета. В ней скорости парообразования и конденсации обратно пропорциональны среднему радиусу кавитационных зародышей  $R_0$ , который принимается постоянным:

$$R_e = F^v \frac{3(1 - \alpha_v) \alpha_{nuc} \rho_v}{R_0} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{|p_{\text{vap}} - p|}{\rho_L}}, \quad p_{\text{vap}} < p,$$

$$R_c = F^c \frac{3 \alpha_v \rho_v}{R_0} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{|p_{\text{vap}} - p|}{\rho_L}}, \quad p_{\text{vap}} > p,$$

где  $\alpha_{nuc}$  – объемная доля зародышей;  $F^c$  и  $F^v$  – эмпирические константы;  $R_0$  – радиус зародышей;  $p$  – давление. Для решения задач настоящего исследования были взяты следующие параметры: радиус зародышей  $R_0 = 5 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ , объемная доля зародышей  $\alpha_{nuc} = 5 \cdot 10^{-4}$ , значения констант  $F^c = 0,01$ ,  $F^v = 50,0$ .

Расчетная область представляла собой часть рабочего канала длиной  $1150 \text{ мм}$ . Вход в расчетную область был расположен на расстоянии  $690 \text{ мм}$  вверх по потоку от геометрического центра крыла, что соответствовало положению датчика давления  $P_1$ . Выход из расчетной области совпадал с положением датчика давления  $P_2$  (рис. 1). Высота и ширина расчетной области были, соответственно, равны высоте и ширине рабочего канала:  $b = 250 \text{ мм}$  и  $a = 80 \text{ мм}$ . Направление осей также указано на рис. 1. Угол наклона хорды гидрокрыла к направлению течения (к оси  $x$ ) составлял  $\alpha = 3^\circ$  (угол атаки).

Расчетная сетка состояла из 3 млн гексаэдральных ячеек (рис. 2). Вблизи крыла был выделен пристеночный слой со сгущением узлов сетки к поверхности, а в остальной области течения была выбрана более разреженная блочно-структурированная сетка С-типа со сгущением узлов в области следа за крылом. Безразмерное расстояние от поверхности гидрокрыла до первого расчетного узла составляло  $y^+ \sim 1$ , то есть пограничный слой разрешался полностью, включая вязкий подслой. Поперек направления течения (по ширине рабочего канала) расчетная сетка была разбита на 30 ячеек со сгущением узлов к боковым стенкам канала, на которых использовались стандартные пристеночные функции. На входе в расчетную область задавались распределения компонент средней скорости



сти и турбулентных характеристик, которые были получены из расчета потока на предшествующем участке гидравлического контура, включающем в себя конфузور и часть рабочего канала (рис. 3). Для расчетов на этом участке была взята расчетная сетка структурированного типа из 16,5 тыс. гексаэдральных ячеек. На выходе из расчетной области фиксировалось абсолютное статическое давление, соответствовавшее измеряемому датчиком  $P_2$  давлению на стенке (рис. 1). Свойства рабочей жидкости, в соответствии с условиями эксперимента, были взяты при температуре 30 °C (табл. 1).

В настоящей работе применялись две RANS-модели турбулентности, а именно  $k-\omega$  SST [14] и дифференциальная модель переноса рейнольдсовых напряжений (RSM) на основе уравнения для удельной скорости диссипации турбулентной энергии  $\omega$  [15] в стационарном и нестационарном вариантах, а также метод моделирования отсоединенных вихрей (DES) на основе модели  $k-\omega$  SST [16]. Выбор модели RSM был обусловлен тем обстоятельством, что в данном CFD-пакете только модель на основе уравнения для  $\omega$  позволяет рассчитывать турбулентный пограничный слой с разрешением вязкого подслоя ( $y^+ \sim 1$ ).

Связь полей скорости и давления осуществлялась с помощью процедуры SIMPLEC (Semi-Impli-

cit Method for Pressure-Linked Equations Consistent, т. е. полунейвный метод для связанных давлением уравнений, согласованный [17–19]). Для аппроксимации конвективных членов в уравнении переноса импульса применялась противопоточная схема второго порядка для методов RANS и ограниченная центрально-разностная схема второго порядка для метода DES, а для уравнений переноса турбулентных характеристик и доли пара – противопоточная схема первого порядка. Нестационарные расчеты проводились с шагом по времени  $10^{-4}$  с, что соответствует максимальному числу Куранта  $C_{CFL} < 10$  и примерно в 70 раз меньше пролетного времени  $C/U_0$ . Аппроксимация по времени осуществлялась с помощью неявной схемы первого порядка.

**Таблица 1.** Свойства рабочей жидкости (дистиллированная вода)

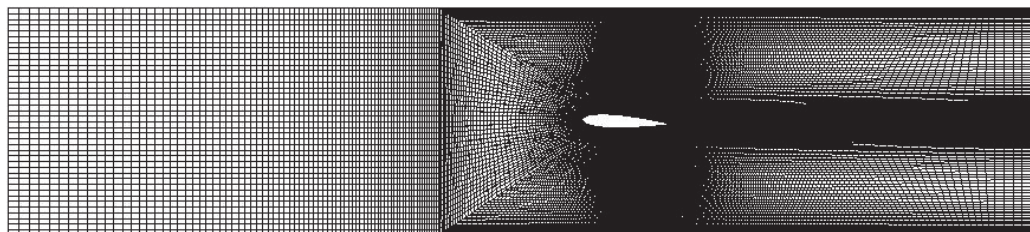
**Table 1.** Properties of the operating liquid (distilled water)

Давление насыщенных паров Saturated vapor pressure	$p_{\text{пар}}$ , кПа (kPa)	4,2
Плотность Density	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup> (kg/m <sup>3</sup> )	995,6
Динамическая вязкость Dynamic viscosity	$\mu$ , Па·с (Pa·s)	$0,79 \cdot 10^{-3}$



**Рис. 1.** Схема рабочего канала с установленным в него гидрокрылом (масштаб выдержан) и относительное положение расчетной области

**Fig. 1.** Scheme of the test section containing the test foil (to scale) and relative position of the computation domain



**Рис. 2.** Расчетная сетка, состоящая из 3 миллионов ячеек, в окрестности гидрокрыла NACA0015 при угле атаки  $\alpha = 3^\circ$

**Fig. 2.** Computation mesh consisting of 3 million cells around the NACA0015 hydrofoil at the attack angle of  $\alpha = 3^\circ$

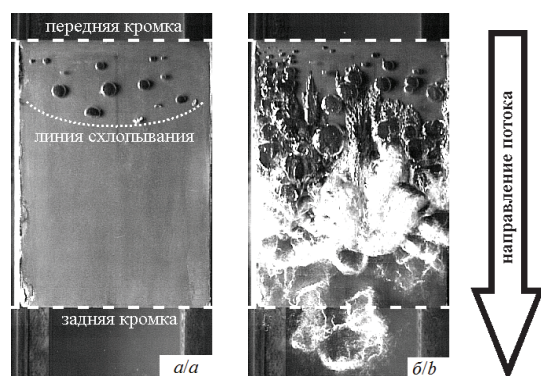
**Рис. 3.** Геометрия конфузора для расчета входных условий: а) вид сбоку; б) вид сверху; в) соответствующая расчетная сетка

**Fig. 3.** Shape of the nozzle to calculate the inlet conditions: a) side view; b) top view; c) corresponding computation mesh

**Таблица 2.** Параметры исследованных режимов течения при  $\alpha=3^\circ$

**Table 2.** Parameters of the flow regimes under investigation at  $\alpha=3^\circ$

$\sigma$	$U_0$ , м/с (m/s)	$p_1$	$p_2$	$Q$ , м <sup>3</sup> /с (m <sup>3</sup> /s)	Картина течения Flow pattern
		кПа/кПа	кПа/кПа		
1,26	11,55	88	80	0,231	Однофазный поток Single-phase flow
0,99	12,28	79	70	0,246	Пузырьковая кавитация Bubble cavitation
0,78	13,16	72	61	0,263	Нестационарный режим Nonsteady state



**Рис. 4.** Мгновенные фотографии (вид сверху) кавитационных зон со стороны разрежения гидрокрыла NACA0015 при  $\alpha=3^\circ$  для режимов: а) пузырьковой кавитации ( $\sigma=0,99$ ); б) нестационарной присоединенной каверны ( $\sigma=0,78$ )

**Fig. 4.** Instantaneous photographs (top view) of the cavitation areas on the suction side of the NACA0015 hydrofoil at  $\alpha=3^\circ$  for the regimes of: a) traveling bubble cavitation ( $\sigma=0,99$ ); b) unsteady attached cavity ( $\sigma=0,78$ )

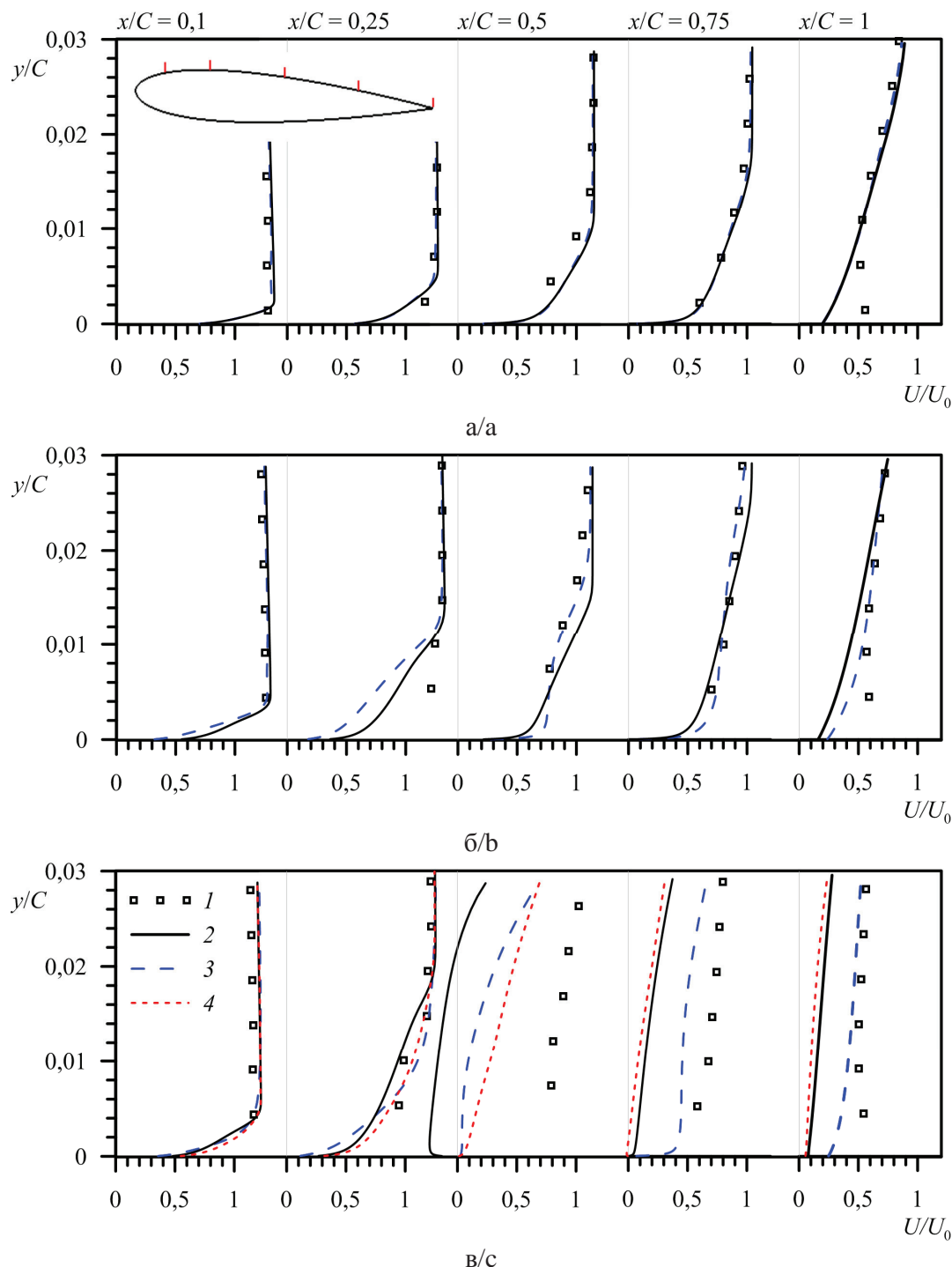
## Результаты

Рассматриваемые режимы течения приведены в табл. 2 и расположены в порядке уменьшения числа кавитации  $\sigma$ . Первый режим ( $\sigma=1,26$ ) является докавитационным (однофазным) и позволяет рассмотреть модель без учета кавитации. Вторым режимом ( $\sigma=0,99$ ) соответствует зарождению кавитации. В эксперименте в этом режиме была зарегистрирована пузырьковая кавитация (рис. 4, а). При  $\sigma=0,78$  кавитационная зона распространяется ниже по течению по сравнению с предыдущим случаем, так что область замыкания каверны оказывается над задней половиной крыла (рис. 4, б). При этом каверна на данном режиме является неустойчивой и периодически пульсирует, характерное число Струхала (безразмерная частота осцилляций каверны) для данного режима составляет:  $St=fU_0/C=0,07$ . На докавитационном режиме ( $\sigma=1,26$ ) и при зарождении кавитации ( $\sigma=0,99$ ) проводились стационарные расчеты с использованием RANS-моделей:  $k-\omega$  SST и RSM. В нестационарном случае ( $\sigma=0,78$ ) помимо модели  $k-\omega$  SST был также использован метод DES на основе модели  $k-\omega$  SST. Модель RSM не позволила получить стационарного решения, поэтому был проведен нестационарный расчет.

На представленных ниже графиках начало координат соответствует положению передней кромки гидрокрыла при нулевом угле атаки. Сравнение результатов численного и экспериментального моделирования проводилось в нескольких поперечных (вертикальных) сечениях:  $x/C=0,1; 0,25; 0,5;$

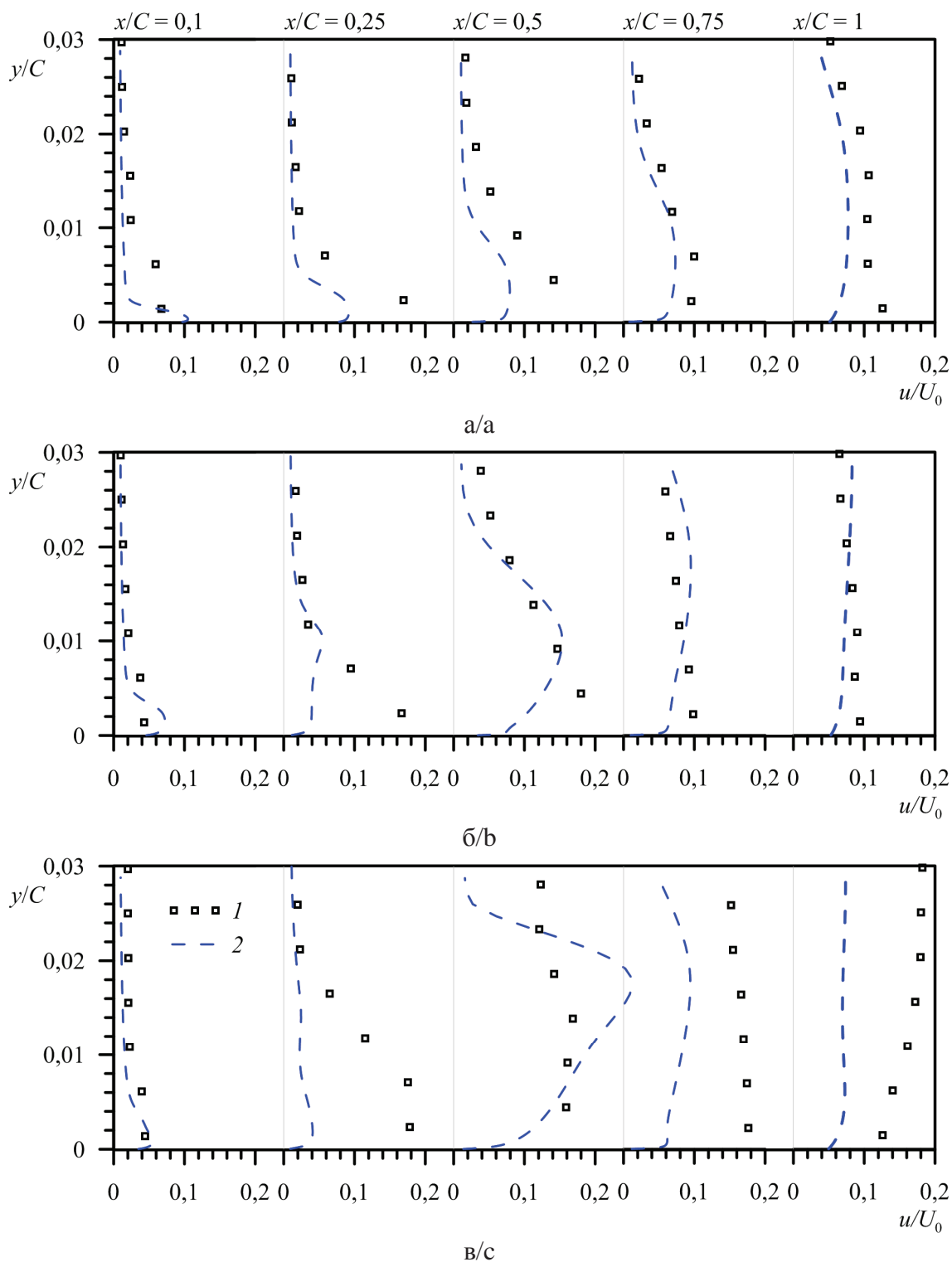
0,75; 1, где  $x$  – расстояние от передней кромки (при нулевом угле атаки) вдоль потока. На рис. 5–8 приведены распределения продольной компоненты средней и двух (продольной и по-

перечной) компонент флуктуационной составляющей скорости, а также сдвиговые турбулентные напряжения (корреляция пульсаций продольной и поперечной составляющих скорости) для всех рас-



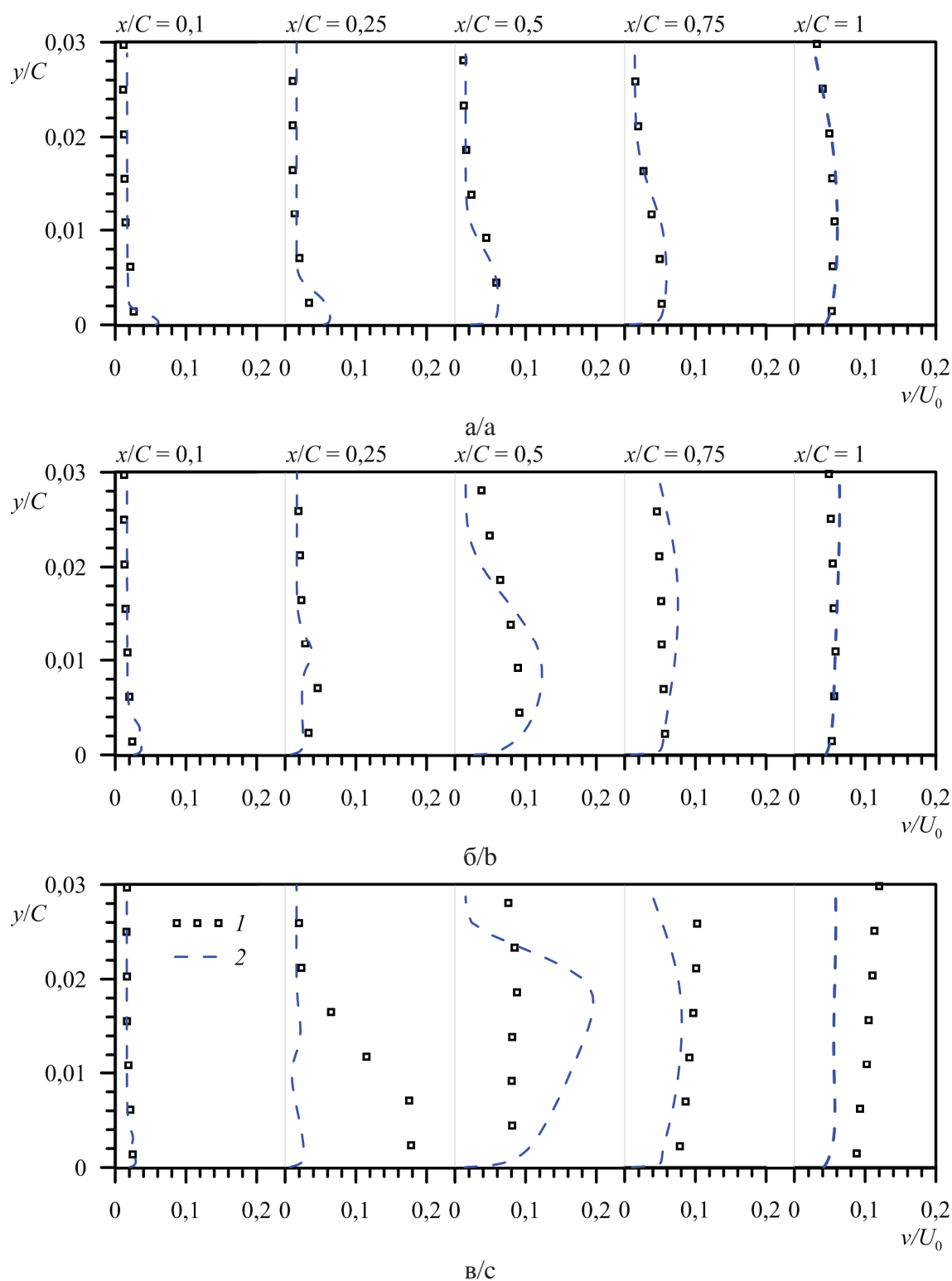
**Рис. 5.** Эволюция продольной компоненты средней скорости вниз по потоку на различных режимах кавитационного обтекания гидрокрыла NACA0015 при  $\alpha=3^\circ$  (1 – эксперимент, 2 –  $k-\omega$  SST, 3 – RSM, 4 – DES): а)  $\sigma=1,26$  (докавитационный режим); б)  $\sigma=0,99$  (пузырьковая кавитация); в)  $\sigma=0,78$  (нестационарная каверна)

**Fig. 5.** Downstream evolution of the longitudinal component of mean velocity for different regimes of cavitating flow around the NACA0015 hydrofoil at  $\alpha=3^\circ$  (1 – experiment, 2 –  $k-\omega$  SST, 3 – RSM, 4 – DES): а)  $\sigma=1,26$  (non-cavitating flow); б)  $\sigma=0,99$  (traveling bubbles); в)  $\sigma=0,78$  (unsteady cavity)



**Рис. 6.** Эволюция продольной компоненты флуктуационной составляющей скорости (среднеквадратичные значения) вниз по потоку на различных режимах кавитационного обтекания гидрокрыла NACA0015 при  $\alpha=3^\circ$  (1 – эксперимент, 2 – RSM): а)  $\sigma=1,26$  (докавитационный режим); б)  $\sigma=0,99$  (пузырьковая кавитация); в)  $\sigma=0,78$  (нестационарная каверна)

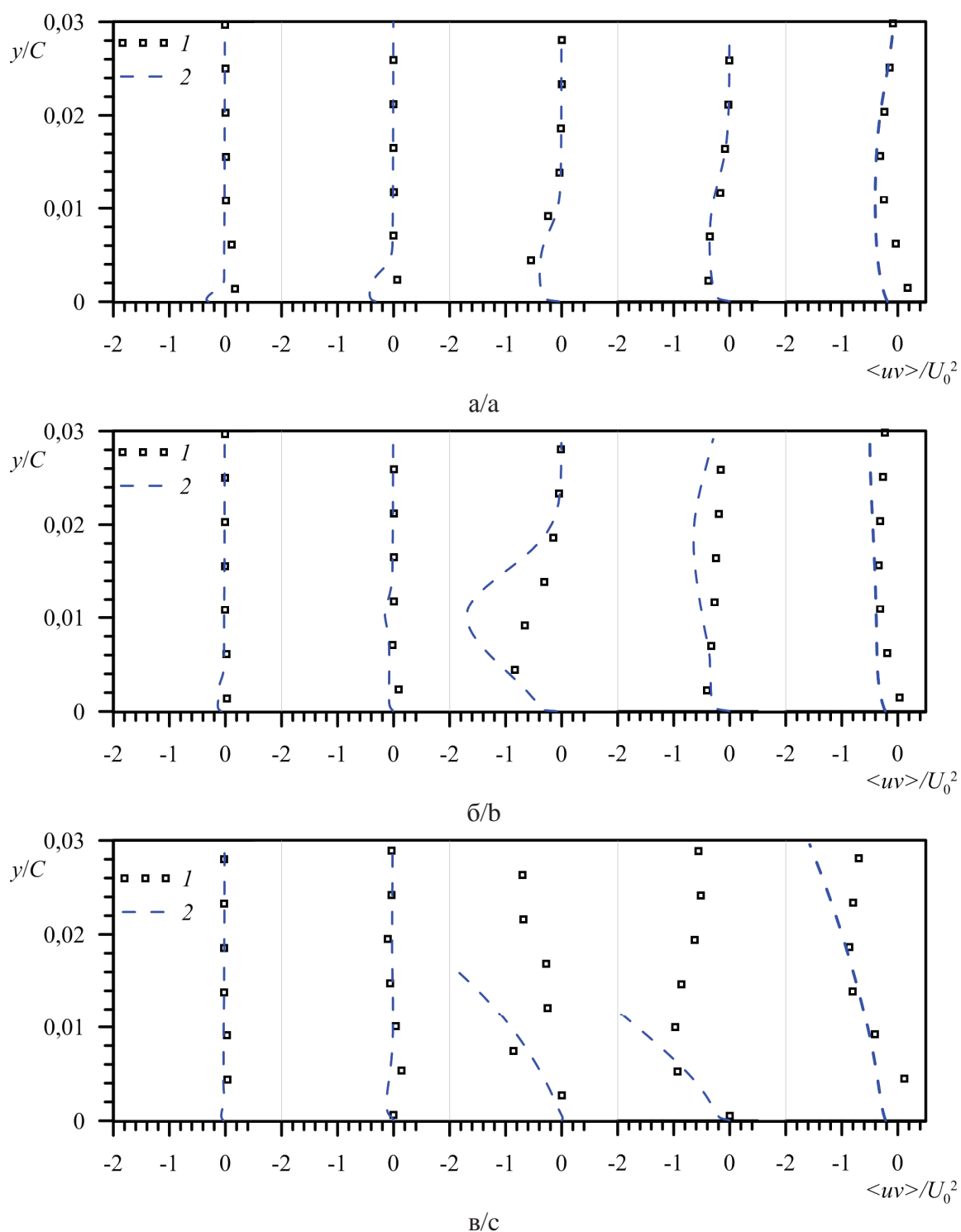
**Fig. 6.** Downstream evolution of the longitudinal component of fluctuating velocity (r.m.s. values) for different regimes of cavitating flow around the NACA0015 hydrofoil at  $\alpha=3^\circ$  (1 – experiment, 2 – RSM): а)  $\sigma=1,26$  (non-cavitating flow); б)  $\sigma=0,99$  (traveling bubbles); в)  $\sigma=0,78$  (unsteady cavity)



**Рис. 7.** Эволюция поперечной компоненты флуктуационной составляющей скорости (среднеквадратичные значения) вниз по потоку на различных режимах кавитационного обтекания гидрокрыла NACA0015 при  $\alpha=3^\circ$  (1 – эксперимент, 2 – RSM): а)  $\sigma=1,26$  (докавитационный режим); б)  $\sigma=0,99$  (пузырьковая кавитация); в)  $\sigma=0,78$  (нестационарная каверна)

**Fig. 7.** Downstream evolution of the transversal component of fluctuating velocity (r.m.s. values) for different regimes of cavitating flow around the NACA0015 hydrofoil at  $\alpha=3^\circ$  (1 – experiment, 2 – RSM): а)  $\sigma=1,26$  (non-cavitating flow); б)  $\sigma=0,99$  (traveling bubbles); в)  $\sigma=0,78$  (unsteady cavity)





**Рис. 8.** Эволюция сдвиговых турбулентных напряжений вниз по потоку на различных режимах кавитационного обтекания гидрокрыла NACA0015 при  $\alpha=3^\circ$  (1 – эксперимент, 2 – RSM): а)  $\sigma=1,26$  (докавитационный режим); б)  $\sigma=0,99$  (пузырьковая кавитация); в)  $\sigma=0,78$  (нестационарная каверна)

**Fig. 8.** Downstream evolution of the turbulent shear stresses for different regimes of cavitating flow around the NACA0015 hydrofoil at  $\alpha=3^\circ$  (1 – experiment, 2 – RSM): а)  $\sigma=1,26$  (non-cavitating flow); б)  $\sigma=0,99$  (traveling bubbles); в)  $\sigma=0,78$  (unsteady cavity)

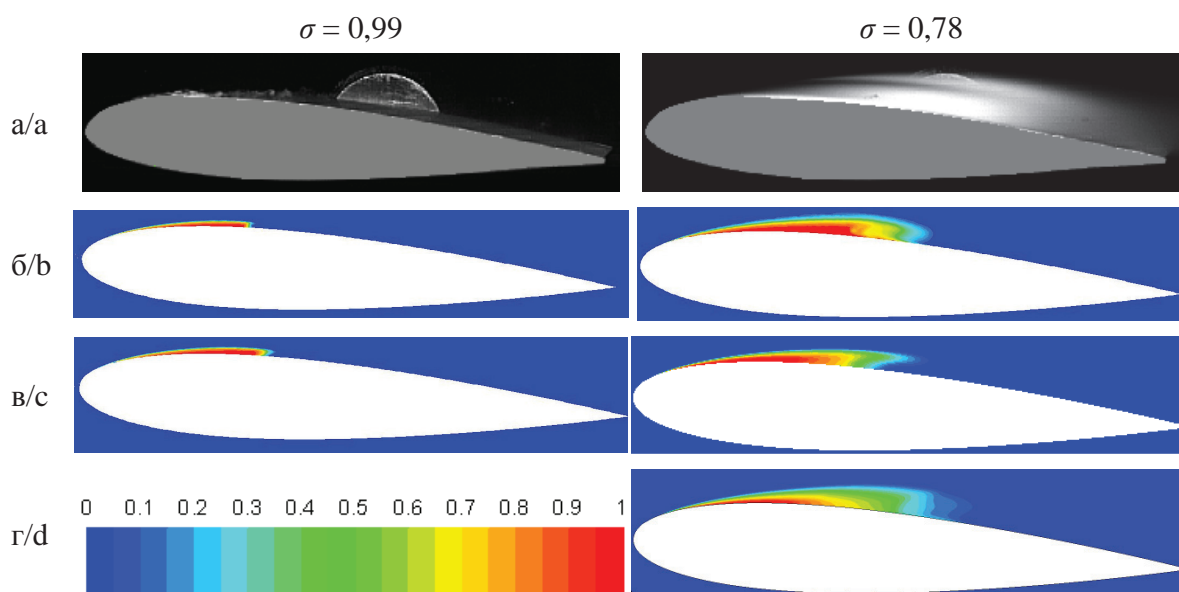
смотренных режимов течения. Поскольку числа Рейнольдса велики, толщина пограничного слоя для докавитационного течения крайне мала и не превышает 3 % от длины хорды крыла. В сечении  $x/C=0,1$  она сопоставима с пространственным разрешением метода PIV. Однако ниже по течению толщина погранслоя возрастает, и экспериментальные данные начинают охватывать область турбулентного подслоя.

Как можно видеть на рис. 5, а, на докавитационном режиме ( $\sigma=1,26$ ) рассчитанные профили скорости достаточно хорошо совпадают с измеренными экспериментально. В целом результаты модели RSM и  $k-\omega$  SST почти не отличаются. Для модели RSM во всех сечениях максимум продольной компоненты скорости немного ниже, чем для модели  $k-\omega$  SST. Уровень турбулентных пульсаций в набегающем потоке является очень низким (как в расчете, так и в эксперименте), что подтверждают графики пульсаций компонент скорости в сечениях  $x/C=0,1$  и  $0,25$  (рис. 6, а и 7, а). Уровень пульсаций продольной компоненты скорости вблизи стенки в расчете ниже, чем в эксперименте для сечений  $x/C=0,25$  и  $0,5$ . Для последующих сечений это различие уменьшается. При этом в данном режиме ( $\sigma=1,26$ ) абсолютное локальное давление вблизи гидропрофиля не достигает давления насыщенных паров, что соответствует экспериментальным данным.

При уменьшении числа кавитации до  $\sigma=0,99$  в расчетах моделями  $k-\omega$  SST и RSM абсолютное давление падает локально (над головной частью крыла) ниже давления насыщенных паров и за передней кромкой гидропрофиля формируется небольшая паровая каверна, занимающая область от

$x/C \approx 0,04$  до примерно  $0,37$ . В задней части паровой каверны образуется возвратное течение, а поток присоединяется к поверхности крыла при  $x/C \approx 0,37$ . Положение и форма каверны согласуются с экспериментальными результатами, при этом она оказывается немного длиннее для модели RSM (рис. 9, табл. 3) за счет формирования «хвоста» в задней части каверны. Профили скорости в сечении  $x/C=0,1$  почти не отличаются для моделей RSM и  $k-\omega$  SST и соответствуют эксперименту (рис. 5, б). Сечение  $x/C=0,25$  проходит через паровую каверну, имеющую в этом месте толщину около 1,5 мм, поэтому вблизи стенки точность расчетных и экспериментальных результатов ниже, чем в однофазном потоке. В сечении  $x/C=0,5$  начинается развитие вновь присоединенного пограничного слоя. Модель RSM показывает над второй половиной крыла перегиб профилей продольной компоненты скорости, что совпадает с экспериментальными данными, в отличие от результатов модели  $k-\omega$  SST ( $x/C=0,5$  и  $0,75$ , рис. 5, б). Этот перегиб можно объяснить интенсивным турбулентным перемешиванием в этой области (рис. 8, б) вследствие присоединения потока. Уровень турбулентных пульсаций компонент скорости, полученный в расчете, соответствует эксперименту (рис. 6, б и 7, б), за исключением очень тонкого пограничного слоя вблизи передней кромки ( $x/C=0,1$ ) и области внутри паровой каверны ( $x/C=0,25$ ).

При дальнейшем понижении числа кавитации до  $\sigma=0,78$  течение становится нестационарным вследствие развития крупномасштабной неустойчивости паровой каверны, которая приводит к появлению отрывной зоны ниже по течению. Расчет течения для данного режима с помощью модели



**Рис. 9.** Осредненные по времени распределения объемной доли пара в центральном продольном сечении для разных режимов кавитационного обтекания гидрокрыла NACA0015 при  $\alpha=3^\circ$ : а) эксперимент; б)  $k-\omega$  SST; в) RSM; г) DES

**Fig. 9.** Time-averaged distributions of vapor volume fraction in central longitudinal section for different regimes of cavitating flow around the NACA0015 hydrofoil at  $\alpha=3^\circ$ : а) experiment; б)  $k-\omega$  SST; в) RSM; г) DES

$k-\omega$  SST показывает, что паровая каверна существует от  $x/C \approx 0,025$  до  $x/C \approx 0,55$  и имеет толщину 4 мм ( $x/C=0,5$ ). В хвостовой части каверны и сразу за ней располагается зона рециркуляции, простирающаяся до  $x/C \approx 0,58$ . В то же время экспериментально определенная средняя длина каверны превышает значения, полученные в расчете (табл. 3), вследствие, предположительно, большего содержания растворенного в воде воздуха. В сечениях  $x/C=0,25$  и  $0,5$ , в связи с наличием пара в этой области, наблюдается расхождение экспериментальных и расчетных графиков скорости (рис. 5, в). После присоединения потока расчет моделью  $k-\omega$  SST показывает медленный рост продольной компоненты скорости. В расчете моделью RSM наблюдалась другая динамика – вследствие высоких турбулентных напряжений (рис. 8, в), продольная компонента скорости быстро растет, приближаясь к значению в ядре потока.

**Таблица 3.** Длина присоединенной каверны на гидрокрыле NACA0015 при  $\alpha=3^\circ$ , полученная разными способами

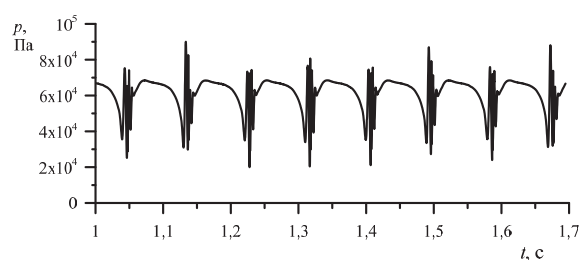
**Table 3.** Length of an attached cavity on the NACA0015 hydrofoil at  $\alpha=3^\circ$  determined in different ways

$\sigma$	$L_c/C$	Эксперимент/Experiment	$k-\omega$ SST	RSM	DES
0,99		0,28	0,3	0,33	–
0,78		0,66	0,53	0,53	0,63

Для корректного моделирования нестационарной паровой каверны требуется привлечение методов, разрешающих в той или иной степени крупномасштабные нестационарные структуры. Так, расчет методом DES для режима  $\sigma=0,78$  демонстрирует периодическое изменение размеров каверны (рис. 10) с периодом  $T=0,09$  с (в эксперименте период составляет  $T=0,086$  с). В результате средний размер каверны получился несколько больше, чем в стационарном расчете с использованием модели  $k-\omega$  SST (рис. 9, табл. 3), и ближе к экспериментальным данным, а граница каверны в хвостовой части размывается. Распределение скорости вблизи передней кромки, полученное методом DES, близко и к стационарному расчету, и к эксперименту (рис. 5, в). Как и в случае других моделей турбулентности, внутри паровой области в сечении ( $x/C=0,25$ ) наблюдается существенное расхождение расчета и эксперимента. Над второй половиной крыла (ниже по течению) внутри пограничного слоя распределение скорости, полученное методом DES, почти не отличается от результатов модели  $k-\omega$  SST, поскольку в этой области работает RANS-подмодель метода DES, т. е. собственно та же модель  $k-\omega$  SST.

Как результат DES-моделирования, получена нестационарная динамика паровой каверны и зарегистрирован сход вихрей за ней (рис. 11). На начальном этапе формирования присоединенной паровой каверны ее форма близка к двумерной. Когда

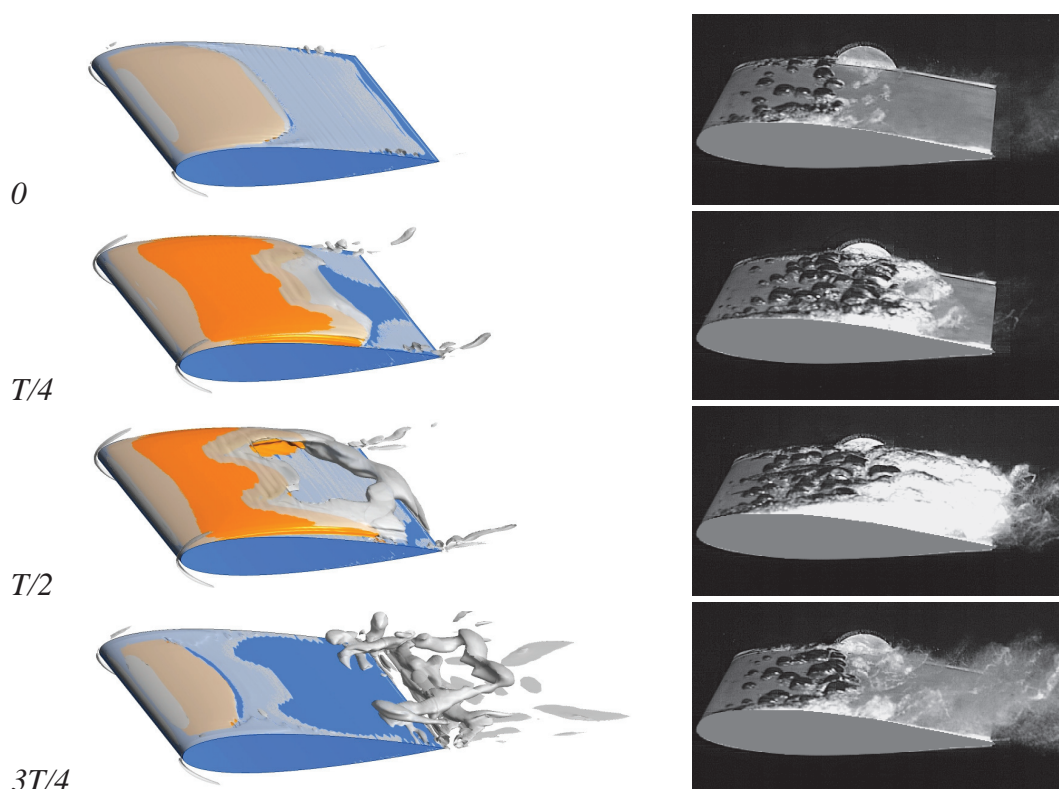
длина каверны приближается к максимальной, за ней формируется отрыв потока и рециркуляционное течение ( $T/4$ ). Затем каверна теряет квазидвумерную форму: длина паровой области становится значительно больше в центре и вблизи стенок ( $T/2$ ). Это происходит в результате развития неустойчивости рециркуляционного течения, а также вследствие ограниченности пространства – влияния боковых стенок канала. При этом наблюдается отрыв крупномасштабного вихря и формирование вторичных вихревых структур вблизи задней кромки. На следующем этапе ( $3T/4$ ) вторичные вихри уносятся основным потоком, а длина каверны уменьшается до  $L_c/C=1/4$ . После этого каверна начинает снова увеличиваться в размерах и весь процесс целиком повторяется.



**Рис. 10.** Временная диаграмма локального давления вблизи задней кромки гидрокрыла NACA0015 при  $\alpha=3^\circ$ ,  $\sigma=0,78$ , полученная методом DES

**Fig. 10.** Time history of local pressure near the trailing edge of the NACA0015 hydrofoil at  $\alpha=3^\circ$ ,  $\sigma=0,78$  computed by DES

Неустойчивость расчета для режима  $\sigma=0,78$  не позволяет получить стационарное решение с помощью модели RSM, поэтому было проведено нестационарное моделирование. В нестационарном расчете методом переноса рейнольдсовых напряжений и в расчете RANS моделью  $k-\omega$  SST (табл. 3, рис. 9) длины паровых каверн практически совпадают. Однако присоединение потока за каверной описывается гораздо лучше моделью RSM, чем моделями  $k-\omega$  SST и DES (рис. 5, в), поскольку модель RSM воспроизводит высокий уровень турбулентных напряжений, сохраняющийся после присоединения потока. Величина продольной компоненты скорости в пограничном слое за каверной быстро увеличивается, что совпадает с экспериментальными данными (сечения  $x/C=0,75$  и 1). Уровень пульсаций продольной компоненты скорости в этих сечениях ниже, чем в эксперименте, но в случае поперечной компоненты соответствует экспериментальным данным. Несмотря на то, что течение в пограничном слое хорошо описывается с помощью модели RSM, она не позволяет разрешить образование вихрей позади паровой каверны и их дальнейший унос вниз по течению основным потоком. Сама каверна периодически осциллирует с частотой около 2 Гц, а пульсации давления, получаемые методом DES (рис. 10), методом RSM не разрешаются.



**Рис. 11.** Изоповерхности доли пара (отмечены оранжевым) и вихри (показаны серым), визуализированные с помощью  $q$ -критерия (слева) в сравнении с экспериментальными изображениями (справа) в различные моменты времени периода пульсаций присоединенной каверны и отрыва кавитационных облаков при обтекании гидрокрыла NACA0015 при  $\alpha=3^\circ$ ,  $\sigma=0,78$ . Моделирование методом DES

**Fig. 11.** Isosurfaces of vapor volume fraction (depicted by orange) and vortices (shown by grey) visualized by the  $q$ -criterion (left) in comparison with experimental images (right) at different instants of the period of the sheet cavity pulsations and cavitation cloud shedding around the NACA0015 hydrofoil at  $\alpha=3^\circ$ ,  $\sigma=0,78$ . Modeling by the DES approach

### Заключение

Проведенные экспериментальные исследования, выполненные с использованием современных оптических методик, позволяют не только выявить новые эффекты (например, [12], [20]), но и получать количественные базы данных тестирования для численных моделей турбулентного кавитационного течения. Результаты численного исследования показывают, что уже в режимах с присутствием небольшой паровой каверны нахождение скорости и турбулентных пульсаций в пограничном слое за ней требует привлечения метода замыкания второго порядка – дифференциальной модели переноса рейнольдсовых напряжений. При больших размерах паровой каверны нестационарность потока, наблюдаемая в эксперименте, становится определяющим фактором для выбора математической модели. Так, для модели RSM уже невозможно получить стационарное решение. Моделирование с помощью вихреразрешающих методов

позволяет воспроизвести низкочастотную периодическую динамику паровой каверны. В результате осредненная граница паровой каверны размывается: вблизи передней кромки всегда присутствует паровая каверна, а над серединой крыла время от времени появляются кавитационные облака, которые отрываются от каверны и схлопываются ниже по потоку. Присоединение потока за каверной на этом режиме также лучше описывается с помощью модели RSM, но уже в нестационарном варианте. При этом, хотя модель переноса рейнольдсовых напряжений хорошо воспроизводит среднюю скорость и турбулентные характеристики, она не позволяет разрешить динамику присоединенной каверны и крупномасштабный перенос доли пара. По этой причине длина паровой каверны, получаемая моделью RSM, существенно меньше.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 14–29–00203, руководитель – проф. К. Хангялич) в НГУ.*



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кривченко Г.И. Гидравлические машины: турбины и насосы. – М.: Энергия, 1978. – 320 с.
2. Franc J.-P., Michel J.-M. Fundamentals of Cavitation. – Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2004. – 324 p.
3. Гаврилов А.А., Дектерёв А.А., Сентябов А.В. Моделирование закрученных течений с когерентными структурами с помощью нестационарной модели переноса рейнольдсовых напряжений // Известия Российской академии наук: Механика жидкости и газа. – 2015. – № 4. – С. 11–24.
4. A preconditioned Navier–Stokes method for two-phase flows with application to cavitation prediction / R.F. Kunz, D.A. Boger, D.R. Stinebring, T.S. Chyczewski, J.W. Lindau, H.J. Gibling, S. Venkateswaran, T.R. Govindan // Computers & Fluids. – 2000. – V. 29. – № 8. – P. 849–875.
5. Merkle C.L., Feng J.Z., Buelow P.E. Computational modeling of the dynamics of sheet cavitation // Proc. of the 3<sup>rd</sup> International Symposium on Cavitation. – Grenoble, France, 1998. – P. 307–311.
6. Brennen C.E. Fundamentals of multiphase flows. – Cambridge: Cambridge University Press, 2005. – 410 p.
7. Singhal A.K., Vaidya N., Leonard A.D. Multidimensional simulation of cavitating flows using a PDF model for phase change // Proc. of the 1997 ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting. – Vancouver, British Columbia, Canada, 1997. – P. 1–8. – Paper № FEDSM97–3272.
8. Mathematical basis and validation of the full cavitation model / A.K. Singhal, M.M. Athavale, H. Li, Y. Jiang // ASME Journal of Fluids Engineering. – 2002. – V. 124. – № 3. – P. 617–624.
9. Morgut M., Nobile E., Bilus I. Comparison of mass transfer models for the numerical prediction of sheet cavitation around a hydrofoil // International Journal of Multiphase Flow. – 2011. – V. 37. – P. 620–626.
10. Numerical study of unsteady cavitation on 2D NACA0015 hydrofoil using free/open source software / V. Hidalgo, X. Luo, B. Ji, A. Aguinaga // Chinese Science Bulletin. – 2014. – V. 59. – № 26. – P. 3276–3282.
11. Effect of cavitation on the structure of the boundary layer in the wake of a partial cavity / C. Sarraf, Y.A. Bouziad, H. Djeridi, M. Farhat, F. Deniset, J.-Y. Billard // Proc. of the 6<sup>th</sup> International Symposium on Cavitation. – Wageningen, the Netherlands, 2006. – P. 9.
12. Кавитация на пластине с закругленной носовой частью и гидрокрыле NACA0015: визуализация и измерение скорости / А.Ю. Кравцова, Д.М. Маркович, К.С. Первунин, М.В. Тимошевский, К. Ханъялич // Известия Российской академии наук: Энергетика. – 2014. – № 4. – С. 96–106.
13. Zwart P.J., Gerber A.G., Belamri T. A two-phase flow model for predicting cavitation dynamics // Proc. of the 5<sup>th</sup> International Conference on Multiphase Flow. – Yokohama, Japan, 2004. – P. 11 – Paper № 152.
14. Menter F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications // AIAA Journal. – 1994. – V. 32. – № 8. – P. 1598–1605.
15. Wilcox D.C. Turbulence modeling for CFD. – La Canada, CA: DCW Industries Inc., 1998. – 479 p.
16. Strelets M. Detached eddy simulation of massively separated flows // Proc. of the 39<sup>th</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. – Reno, Nevada, USA, 2001. – P. 18. – Paper № AIAA2001–0879.
17. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости: пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 124 с.
18. Ferziger J.H., Peric M. Computational methods for fluid dynamics. – Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2002. – 423 p.
19. Численное моделирование вихревой интенсификации теплообмена в пакетах труб / Ю.А. Быстров, С.А. Исаев, Н.А. Кудрявцев, А.И. Леонтьев. – СПб.: Судостроение, 2005. – 392 с.
20. Особенности кавитационного обтекания уменьшенной модели направляющих лопаток радиально-осевой турбины / М.В. Тимошевский, С.А. Чуркин, А.Ю. Кравцова, К.С. Первунин, Г.А. Семёнов, Д.М. Маркович, К. Ханъялич // Известия Томского политехнического университета: Инжиниринг георесурсов. – 2015. – Т. 326. – № 6. – С. 79–94.

Поступила 29.07.2016 г.

## Информация об авторах

**Сентябов А.В.**, кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук; инженер физического факультета Новосибирского национального исследовательского государственного университета; старший преподаватель кафедры теплофизики Сибирского федерального университета.

**Тимошевский М.В.**, инженер-исследователь Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук; старший лаборант физического факультета Новосибирского национального исследовательского государственного университета.

**Первунин К.С.**, младший научный сотрудник Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук; младший научный сотрудник физического факультета Новосибирского национального исследовательского государственного университета.

**Гаврилов А.А.**, кандидат физико-математических наук, ведущий инженер Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук; ведущий инженер физического факультета Новосибирского национального исследовательского государственного университета; доцент кафедры теплофизики Сибирского федерального университета.

**Маркович Д.М.**, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, заместитель директора Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук; профессор физического факультета Новосибирского национального исследовательского государственного университета; профессор Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Дектерёв А.А.**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук; старший научный сотрудник физического факультета Новосибирского национального исследовательского государственного университета; заведующий кафедрой теплофизики Сибирского федерального университета.

UDC 532.5.032+532.516.5+532.574.7+532.528+532.582.32

## NUMERICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF CAVITATION FLOW AROUND NACA0015 HYDROFOIL

**Andrey V. Sentyabov**<sup>1,2,3</sup>,  
sentyabov\_a\_v@mail.ru

**Mikhail V. Timoshevskiy**<sup>1,2</sup>,  
timoshevskiy.mv@gmail.com

**Konstantin S. Pervunin**<sup>1,2</sup>,  
pervunin@itp.nsc.ru

**Andrey A. Gavrilov**<sup>1,2,3</sup>,  
gavand@yandex.ru

**Dmitriy M. Markovich**<sup>1,2,4</sup>,  
dmark@itp.nsc.ru

**Aleksandr A. Dekterev**<sup>1,2,3</sup>,  
dekterev@mail.ru

<sup>1</sup> Kutateladze Institute of Thermophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
1, Lavrentyev Avenue, Novosibirsk, 630090, Russia;

<sup>2</sup> Novosibirsk State University,  
2, Pirogov Street, Novosibirsk, 630090, Russia;

<sup>3</sup> Siberian Federal University,  
79, Svobodny Avenue, Krasnoyarsk, 660041, Russia.

<sup>4</sup> National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

*Hydropower resources, used for power generation in hydraulic power plants, are one of the major renewable energy sources. A significant scientific and technical challenge for designing the equipment of hydroelectric power plants is cavitation caused by high velocity of water flow near the runner blades. Cavitation is also typical for other turbomachinery, pumps, hydraulic equipment, ship propulsors, etc. Cavitation leads to decrease in energy efficiency and increased wear of equipment. The needs in modeling turbulent flow around blade assemblies, the operation of which is accompanied by cavitation, require the development of modern numerical approaches capable of forecasting the cavitation occurrence and describing flow dynamics with satisfactory accuracy.*

**The main aim** of the research is to investigate cavitation flow in a vicinity of NACA0015 hydrofoil by means of experimental and numerical methods, to compare the simulation and measurement results, to analyze the effect of turbulence model on calculation of the boundary layer flow over the suction side of a hydrofoil.

**The methods used in the study.** The spatial structure and dynamics of partial gas-vapor cavities were studied by high-speed imaging which was also used to estimate integral parameters of the cavities. Two-dimensional distributions of mean velocity and turbulent characteristics around the hydrofoil were measured by Particle Image Velocimetry (PIV) in both single- (non-cavitating) and two-phase (cavitating) flows. In numerical simulation of flows the authors have applied the methods of computational fluid dynamics based on solving the Reynolds equations for turbulent flow, using the control volume approach on a three-dimensional mesh consisting of hexahedral cells. The dispersed phase (cavitation bubbles and their clouds) was calculated by solving the equation of vapor fraction transfer. Turbulence was described by means of  $k-\omega$  SST two-equation model, differential model of the Reynolds stress transfer (RSM) and the detached eddy simulation method (DES).

**The results.** The authors obtained full set of data in the experiments. The data allow direct analysis of the results of numerical modeling and measurements and comparing the computational models. The carried out calculations showed that, even in the case of a small vapor cavity behind the leading edge of the hydrofoil, the use of the second-order closure method – differential model of the Reynolds stress transfer – was required to describe correctly the flow reattachment to the wall downstream. When the cavity became long, the flow unsteadiness was a determinant factor of turbulent transfer. Modeling with the eddy-resolving approaches allowed identifying the periodic dynamics of vapor cavities at low frequencies. In an unsteady case, the flow reattachment downstream of the cavity was better predicted by the model of the Reynolds stress transfer.

### **Key words:**

Hydraulic power plant, cavitation, partial vapor-gas cavities, unsteadiness, hydrofoil, NACA0015, turbulence, high-speed imaging, PIV, numerical modeling, RSM, DES.

*The research was financially supported by the Russian Science Foundation (grant no. 14–29–00203, professor K. Hanjalic is the head) in Novosibirsk State University.*

## REFERENCES

1. Krivchenko G.I. *Gidravlicheskie mashiny: turbiny i nasosy* [Hydraulic machines: turbines and pumps]. Moscow, Energiya publ., 1978. 320 p.
2. Franc J.-P., Michel J.-M. *Fundamentals of Cavitation*. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 2004. 324 p.
3. Gavrillov A.A., Dekterev A.A., Sentyabov A.A. Modeling swirling flows with coherent structures using the unsteady Reynolds-stress-transport model. *Fluid Dynamics*, 2012, no. 4, pp. 11–24. In Rus.
4. Kunz R.F., Boger D.A., Stinebring D.R., Chyczewski T.S., Lindau J.W., Gibeling H.J., Venkateswaran S., Govindan T.R. A preconditioned Navier-Stokes method for two-phase flows with application to cavitation prediction. *Computers & Fluids*, 2000, vol. 29, no. 8, pp. 849–875.
5. Merkle C.L., Feng J.Z., Buelow P.E. Computational modeling of the dynamics of sheet cavitation. *Proc. of the 3<sup>rd</sup> International Symposium on Cavitation*. Grenoble, France, 1998. pp. 307–311.
6. Brennen C.E. *Fundamentals of multiphase flows*. Cambridge, Cambridge University Press, 2005. 410 p.
7. Singhal A.K., Vaidya N., Leonard A.D. Multidimensional simulation of cavitating flows using a PDF model for phase change. *Proc. of the 1997 ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting*. Vancouver, British Columbia, Canada, 1997. pp. 1–8, Paper FEDSM97–3272.
8. Singhal A.K., Athavale M.M., Li H., Jiang Y. Mathematical basis and validation of the full cavitation model. *ASME Journal of Fluids Engineering*, 2002, vol. 124, no. 3, pp. 617–624.
9. Morgut M., Nobile E., Bilus I. Comparison of mass transfer models for the numerical prediction of sheet cavitation around a hydrofoil. *International Journal of Multiphase Flow*, 2011, vol. 37, pp. 620–626.
10. Hidalgo V., Luo X., Ji B., Aguinaga A. Numerical study of unsteady cavitation on 2D NACA0015 hydrofoil using free/open source software. *Chinese Science Bulletin*, 2014, vol. 59, no. 26, pp. 3276–3282.
11. Sarraf C., Bouziad Y.A., Djeridi H., Farhat M., Deniset F., Billard J.-Y. Effect of cavitation on the structure of the boundary layer in the wake of a partial cavity. *Proc. of the 6<sup>th</sup> International Symposium on Cavitation*. Wageningen, the Netherlands, 2006. p. 9.
12. Kravtsova A.Yu., Markovich D.M., Pervunin K.S., Timoshevskii M.V., Hanjalić K. Cavitation on a semicircular leading-edge plate and NACA0015 hydrofoil: visualization and velocity measurement. *Thermal Engineering*, 2014, vol. 61, no. 14, pp. 1007–1014. In Rus.
13. Zwart P.J., Gerber A.G., Belamri T. A two-phase flow model for predicting cavitation dynamics. *Proc. of the 5<sup>th</sup> International Conference on Multiphase Flow*. Yokohama, Japan, 2004. p. 11, Paper 152.
14. Menter F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA Journal*, 1994, vol. 32, no. 8, pp. 1598–1605.
15. Wilcox D.C. *Turbulence modeling for CFD*. La Canada, CA, DCW Industries Inc., 1998. 479 p.
16. Strelets M. Detached eddy simulation of massively separated flows. *Proc. of the 39<sup>th</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*. Reno, Nevada, USA, 2001. p. 18, Paper AIAA2001–0879.
17. Patankar S. *Chislennyye metody resheniya zadach teploobmena i dinamiki zhidkosti* [Numerical methods for solving problems on heat transfer and fluid dynamics]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1984. 124 p.
18. Ferziger J.H., Peric M. *Computational methods for fluid dynamics*. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2002. 423 p.
19. Bystrov Yu.A., Isaev S.A., Kudryavtsev N.A., Leontyev A.I. *Chislennoe modelirovanie vikhrevoy intensifikatsii teploobmena v paketakh trub* [Numerical simulation of vortical intensification of heat transfer in pipe packages]. Saint-Petersburg, Sudostroenie Publ., 2005. 392 p.
20. Timoshevskiy M.V., Churkin S.A., Kravtsova A.Yu., Pervunin K.S., Semenov G.A., Markovich D.M., Hanjalić K. Features of cavitation flow around a scaled-down model of guide vanes of a Francis turbine. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2015, vol. 326, no. 6, pp. 79–94. In Rus.

Received: 29 July 2016.

## Information about the authors

**Andrey V. Sentyabov**, Cand. Sc., junior researcher, Kutateladze Institute of Thermophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; engineer, Novosibirsk State University; senior lecturer, Siberian Federal University.

**Mikhail V. Timoshevskiy**, research engineer, Kutateladze Institute of Thermophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; senior laboratory assistant, Novosibirsk State University.

**Konstantin S. Pervunin**, junior researcher, Kutateladze Institute of Thermophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; junior researcher, Novosibirsk State University.

**Andrey A. Gavrillov**, Cand. Sc., leading engineer, Kutateladze Institute of Thermophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; leading engineer, Novosibirsk State University; associate professor, Siberian Federal University.

**Dmitriy M. Markovich**, Dr. Sc., corresponding member, Russian Academy of Sciences, deputy director, Kutateladze Institute of Thermophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; professor, Novosibirsk State University; professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Aleksandr A. Dekterev**, Cand. Sc., senior researcher, Kutateladze Institute of Thermophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; senior researcher, Novosibirsk State University; head of the department, Siberian Federal University.

УДК 621.311:519.2

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ ООО «ОМСКАЯ ЭНЕРГОСБЫТОВАЯ КОМПАНИЯ»

Потапов Виктор Ильич<sup>1</sup>,  
ivt@omgtu.ru

Грицай Александр Сергеевич<sup>1</sup>,  
aleksandr.gritsay@gmail.com

Тюньков Дмитрий Александрович<sup>1</sup>,  
dmitry.tyunkov@gmail.com

Синицин Глеб Эдуардович<sup>2</sup>,  
sinitzin@yandex.ru

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

<sup>2</sup> ООО «Омская энергосбытовая компания»,  
Россия, 644123, г. Омск, пр. Карла Маркса, 41/15.

**Актуальность работы** обусловлена требованиями действующего законодательства к прогнозированию электропотребления на рынке «на сутки вперед» для субъектов оптового рынка электроэнергии и мощности (ОРЭМ). Большая часть электроэнергии в России производится путем сжигания твердых полезных ископаемых. По данным отчета ОАО «Системный оператор Единой энергетической системы» за 2015 г. доля выработки электроэнергии по типам электростанций ЕЭС России составляет: 59,8 % – для тепловых электростанций, 15,6 % – для ветряных и солнечных электростанций, 19 % – для атомных электростанций и 5,6 % – для электростанций промышленных предприятий. При этом одной из основных задач, связанных с генерацией электрической энергии и ее потреблением, является задача поддержания баланса мощностей. С одной стороны, при увеличении плановой нагрузки могут возникнуть перебои в поставке электроэнергии, с другой стороны, уменьшение электропотребления приведет также к уменьшению КПД электростанций, и в конечном счете – к повышению стоимости на электроэнергию как для субъекта оптового рынка электроэнергии и мощности, так и для конечного потребителя. Увеличение точности прогнозирования электропотребления позволяет соблюдать баланс мощностей и эффективно использовать георесурсы для генерации электроэнергии, с учетом специфики потребителя. Для решения этих задач в России в 2004 г. был введен оптовый рынок электроэнергии и мощности, который функционирует и сейчас. В соответствии с правилами взаимодействия между субъектом оптового рынка электроэнергии и мощности и ОАО «АТС», субъекты оптового рынка электроэнергии и мощности обязаны осуществлять ежедневный почасовой прогноз в режиме «на сутки вперед». Для обеспечения качественного прогнозирования электропотребления субъектам оптового рынка электроэнергии и мощности необходимо подготовить нормативную базу, разработать методику построения прогноза электропотребления, а также просчитать риски, связанные с точностью используемых моделей. С одной стороны, сложность решаемой задачи характеризуется наличием данных по точкам поставки, так как не всегда субъект оптового рынка электроэнергии и мощности имеет возможность собрать данные о потреблении отдельных энергообъектов в почасовом режиме. С другой стороны, внедрение систем коммерческого учета позволяет решить эту проблему с вложением больших инвестиций на установку автоматизированной системы коммерческого учета электроэнергии, но, как правило, субъект оптового рынка электроэнергии и мощности идет на такие долгосрочно окупаемые затраты. Работа может быть полезна как специалистам энергосбытовых компаний, которые занимаются построением прогнозных моделей, так и специалистам субъектов оптового рынка электроэнергии и мощности, которые осуществляют прогнозы на оптовом рынке электроэнергии и мощности в режиме «на сутки вперед».

**Цель работы:** применение методики прогнозирования с использованием нейронной сети для построения прогностических моделей для ООО «Омская энергосбытовая компания».

**Методы исследования:** модели Холта–Винтерса, ARIMA, нейронные сети, температурно-ветровой индекс.

**Результаты.** Были рассмотрены методы построения прогностических моделей. Разработана методика построения прогноза ООО «Омская энергосбытовая компания» с использованием нейронной сети с учетом температурно-ветрового индекса и выделением общих типов дней по электропотреблению.

### Ключевые слова:

Анализ данных, нейронные сети, прогнозирование, электропотребление, оптовый рынок электроэнергии и мощности.

Алгоритмы построения краткосрочных прогнозов электропотребления (ЭП) на рынке на сутки вперед (РСВ) являются актуальными, а методы их реализации – востребованными для субъектов оптового рынка электроэнергии и мощности (ОРЭМ). В конечном счете от этого зависит экономический эффект субъекта ОРЭМ, а для энергос-

бытовой компании – и конечный тариф для потребителя. За время функционирования ОРЭМ было предложено большое количество методов краткосрочного прогнозирования ЭП. В начале функционирования ОРЭМ, в 2006 году, доля приобретаемой электроэнергии на рынке «на сутки вперед» составляла лишь 5 %, а эксперты не обладали ин-



струментами и достаточным опытом построения моделей краткосрочного прогнозирования ЭП, поэтому широкое распространение получили статистические методы. Особой популярностью пользовался метод Холта–Винтерса [1]. Этот метод не накладывает каких-либо сложных требований как ко входным данным, так и к его программной реализации и дает ожидаемые результаты, если в структуре данных есть сложившиеся тренд и сезонность. Существует большое количество разновидностей этого метода [2–4]. В работе [5] авторы предложили усовершенствовать метод путем одновременного использования сразу двух параметров сезонной компоненты – для дневного и недельного циклов.

В работе [6] авторы опираются на метод ARIMA (интегрированного скользящего среднего), которые являются усовершенствованием метода Холта–Винтерса. При этом в работе [7] авторы показывают, что точность таких методов оставляет желать лучшего и средняя ошибка составляет 9,59 %.

В работе [8] был предложен метод главных компонент для краткосрочного прогнозирования ЭП. Принцип данного метода состоит в преобразовании одномерного ряда в многомерный. После преобразования временной ряд рассматривается как набор простых составляющих – сезонных, суточных и шумовых компонентов ряда. В источнике [9] произведен анализ существующих методов прогнозирования и представлена их классификация.

В настоящее время, при построении краткосрочных прогнозов ЭП, широкое распространение получили методы структурных моделей, такие как нейронные сети, метод опорных векторов [10–14]. Существует большое количество подходов, связанных с формированием обучающей выборки, построением структуры нейронной сети, выбором функции активации нейронов. Как правило, субъект оптового рынка электроэнергии и мощности при составлении прогноза оперирует данными автоматизированной системы коммерческого учета электроэнергии (АСКУЭ) в формате XML 80020. Однако целесообразно использовать фактические данные метеоцентра.

Фрагмент ретроспективных данных ООО «Омская энергосбытовая компания» об ЭП, полученных путем преобразования макета XML 80020 в табличный вид, представлен в табл. 1.

**Таблица 1.** Ретроспективные данные ООО «Омская энергосбытовая компания» об электропотреблении

**Table 1.** Retrospective data of LLC «Omsk Energy Retail Company» on electric energy consumption

Дата Date	Час суток Hour	Температура, °С Temperature, °C	Электропотребление, МВт/ч Electricity load, MWh
01.01.2015	1:00AM	-12	718290,0
	2:00AM		695724,0
	3:0M		678426,0

Очевидно, что при разработке модели прогнозирования, целесообразно сгруппировать дни недели, схожие по ЭП. В работе [15] был предложен подход, позволяющий выделить следующие типы дней в неделе:

- рабочий день;
- выходной день;
- праздничный день.

Такой подход оправдан, поскольку характер ЭП по этим дням различается. Так, например, в рабочие дни ЭП в большей степени зависит от технологических процессов промышленных предприятий, планов выпуска продукции, графика рабочего времени, в то время как в выходные и праздничные дни больший вес имеют социальные явления, период светового дня и другие факторы.

Предложенная математическая модель прогнозируемого объема ЭП – это функция от следующих переменных:

$$V_{2\text{ээ}}(t) = \{M, N, T_{\text{cp}}, n, h, V_{1\text{ээ}}\},$$

где  $V_{2\text{ээ}}$  – объем потребления электроэнергии, который необходимо спрогнозировать в формате X-1 (на сутки вперед), МВт;  $t$  – часовой интервал времени;  $M$  – порядковый номер месяца в году;  $N$  – порядковый день месяца (необходим для отслеживания суточной динамики потребления энергии);  $T_{\text{cp}}$  – среднесуточная температура окружающего воздуха (данный параметр является важнейшим, от него напрямую зависит потребление электрической энергии), °С;  $n$  – порядковый номер дня в неделе;  $h$  – признак, указывающий на то, является ли день выходным или рабочим (при  $h=1$  – выходной день,  $h=0$  – рабочий день), как известно, динамика потребления электроэнергии сильно различается в выходной и рабочий день;  $V_{1\text{ээ}}$  – объем потребленной энергии за прошлые сутки, аналогичные текущему временному периоду, МВт.

При создании обучающей выборки входные сигналы нейронной сети представляются параметрами  $t, V_{1\text{ээ}}, N, T_{\text{cp}}, n, h$ , а эталонные значения – параметром  $V_{2\text{ээ}}$ . Фрагмент обучающей выборки данных об ЭП ООО «Омская энергосбытовая компания» показан в табл. 2.

**Таблица 2.** Фрагмент обучающей выборки для нейронной сети

**Table 2.** Fragment of a training sample for neural network

Дата Date	Входы нейросети Input of neural network					Выход нейросети Output of neural network	
	$t$	$V_{1\text{ээ}}$	$N$	$T_{\text{cp}}$	$n$	$h$	$V_{2\text{ээ}}$
1.04.16	1	1282	1	2	7	1	1296
	2	1282					1275
	3	1266					1260
	4	1254					1264
	5	1247					1251
	6	1244					1237

Структура нейронной сети для краткосрочного прогнозирования ЭП в режиме «на сутки вперед» представлена на рис. 1. Она состоит из 6 входных нейронов первого слоя, 5 нейронов скрытого слоя и 1 выходного нейрона. Функция активации нейрона – сигмоид [16]. Для настройки весов нейронной сети используется алгоритм обучения с учителем, известный как алгоритм обратного распространения ошибки [17, 18].

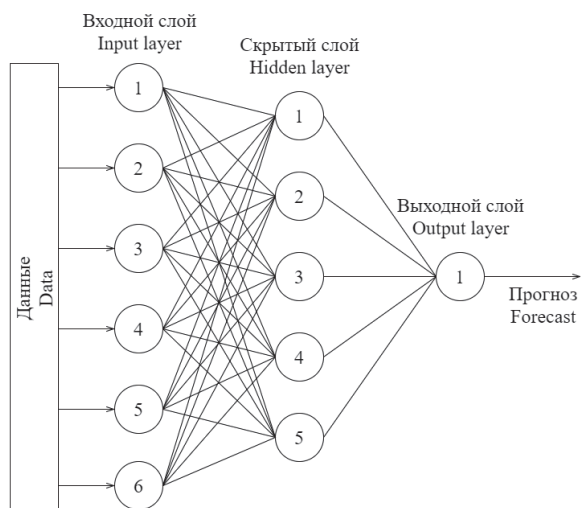


Рис. 1. Схема нейронной сети для построения прогноза ЭП

Fig. 1. Diagram of neural network for building forecast of electricity consumption

Количество нейронов входного слоя сети определяется входными параметрами, представленными в табл. 2. Метод определения количества нейронов скрытого слоя подробно рассмотрен в [19].

Алгоритм прогнозирования был реализован с использованием информационной аналитической системы Rapidminer, которая имеет свободно-распространяемую LGPL (Lesser General Public License) – версию системы. Исходный код платформы находится в открытом доступе. Кроме того, аналитическая платформа Rapidminer позволяет реализовать возможность разработки собственного оператора в виде разрабатываемого алгоритма модели, если представленных в системе операторов недостаточно. Расширение, реализующее алгоритм пользователя, в этом случае пишется на языке java в виде отдельно подключаемой библиотеки. Пример процесса прогнозирования ЭП с использованием аналитической системы Rapidminer представлен на рис. 2.

Реализованный алгоритм имеет модульную структуру. Для разработки собственного оператора необходимо реализовать объявленный в системе интерфейс. Более подробная информация об использовании интерфейса для расширения реализации представлена в [20].

На рис. 3 изображена UML-диаграмма построения прогноза ЭП с учетом температурно-ветрового индекса. Как было показано в [21], температурно-ветровой индекс целесообразно использовать при  $T_{cp} = -20...22$  °C и скорости ветра выше 2 м/с. Таким образом, при обеспечении этих условий значения температуры преобразуются и позволяют получить более точный прогноз ЭП на заданный период времени.

В блоке «Предварительная обработка» происходит проверка на условие применения температурно-ветрового индекса, и в случае необходимости данные о температуре окружающей среды преобразуются в температуру с учетом данного индекса.

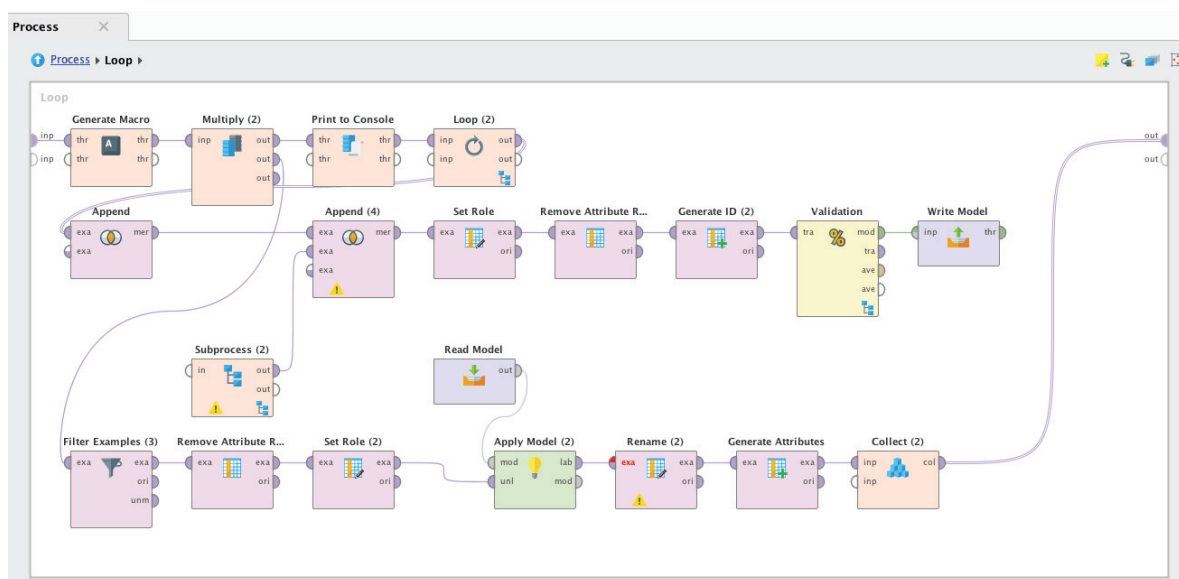


Рис. 2. Фрагмент алгоритма прогнозирования с использованием нейронной сети

Fig. 2. Fragment of prediction algorithm using neural network

са. Далее проверяется принадлежность к типу дня и из сформированной выборки данных выбираются только ретроспективные данные по выбранному типу дня. Фильтр 1 удаляет из обучающей выборки данные, относящиеся к праздничным и выходным дням, фильтр 2 – данные по рабочим дням и праздникам, фильтр 3 удаляет из выборки рабочие и выходные дни.

Количество данных в выборке определяется по формуле

$$S = 30M_{t1} \cdot 48 + 30M_{t2} \cdot T_c,$$

где  $M_{t1}$  – выборка из 30 дней до прогнозного дня текущего года;  $M_{t2}$  – выборка из 30 дней предыдущего года после прогнозного дня, включая аналогичный прогнозируемому день в прошлом году;  $T_c$  – количество дискретных равных интервалов, на которые разбиваются 24 часа (с дискретным интервалом 1 час). Необходимое количество дней (30) было найдено эмпирически.

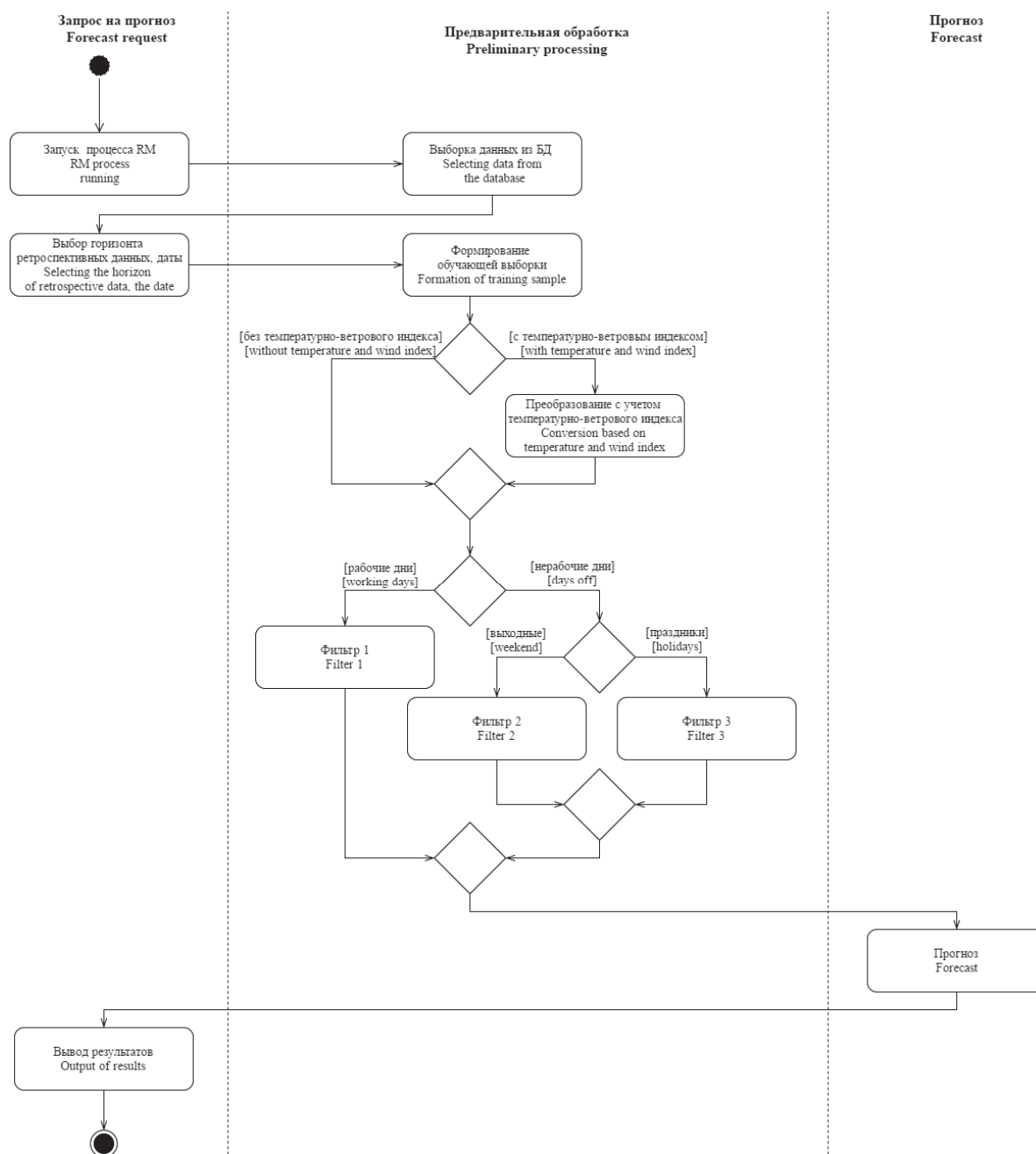


Рис. 3. UML-диаграмма метода прогноза с учетом температурно-ветрового индекса

Fig. 3. UML-diagram of the forecasting method considering temperature and wind index

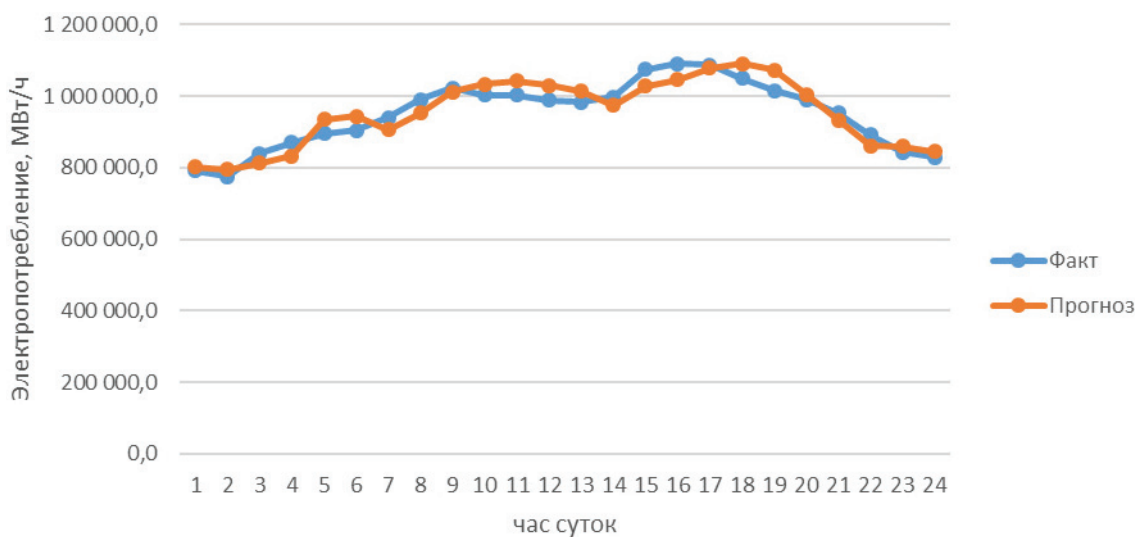


Рис. 4. Прогноз потребления на 19.06.2016 без учета температурно-ветрового индекса

Fig. 4. Forecast of consumption on 06/19/2016, excluding temperature and wind index

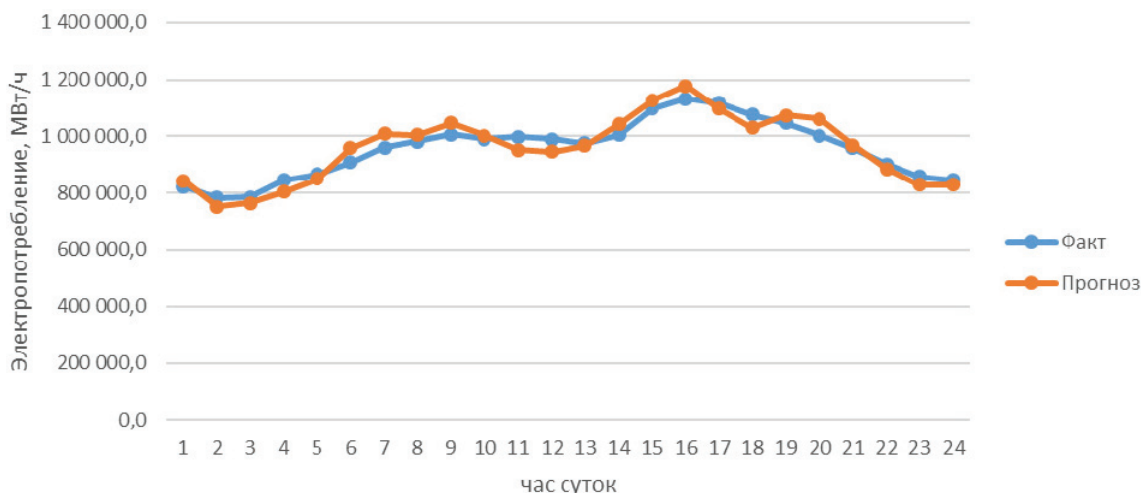


Рис. 5. Прогноз потребления на 17.01.2016 с учетом температурно-ветрового индекса

Fig. 5. Forecast of consumption on 01/17/2016, considering temperature and wind index

На рис. 4 и 5 отображены данные прогноза без учета температурно-ветрового индекса и с учетом соответственно.

#### Заключение

Как видно из данных, приведенных на рис. 4 и 5, используемая методика дает среднюю ошибку 3,0...3,3 % на интервале 1 год. Таким образом, рассмотренная методика может быть использована субъектом ОРЭМ без больших материальных затрат и основывается на общих статистических методах и методах структурных моделей. При этом субъекту ОРЭМ достаточно иметь ретроспективные данные ЭП в интервале не менее одного года, а также данные по средней температуре окру-

жающего воздуха и средней скорости ветра. Представленная методика прогнозирования электропотребления может использоваться субъектами ОРЭМ. При этом, возможно, потребуется эмпирическим путем сформировать обучающую выборку с учетом специфики электропотребления. В нашем случае в общем объеме электропотребления ООО «Омская энергосбытовая компания» 75 % приходится на юридические лица и 25 % – на физические. При этом следует учитывать тип дня, поскольку на специфику электропотребления, как было сказано выше, могут оказывать влияние социальные явления, и этот факт нужно также учитывать при разработке методики прогнозирования ЭП.



#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nur A.A., Maizah H.A., Norizan M. Electricity load demand forecasting using exponential smoothing methods // *World Applied Sciences Journal*. – 2013. – № 22 (11). – P. 1540–1543.
2. Исмагилов Т.С. Методы решения задачи прогнозирования в энергетике // *Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета*. – 2010. – Т. 14. – № 4 (39). – С. 93–96.
3. Taylor J.W., McSharry P.E. Short-term load forecasting methods: an evaluation based on European data // *IEEE Transactions on Power Systems*. – 2007. – № 22 (4). – P. 2213–2219.
4. Taylor J.W. Short-term load forecasting with exponentially weighted methods // *IEEE Transactions on Power Systems*. – 2012. – № 27 (1). – P. 458–464.
5. Drought forecasting based on the remote sensing data using ARIMA model / P. Han, P.X. Wang, S.Y. Zhand, D.H. Zhu // *Mathematical and Computer Modelling*. – 2011. – № 51 (11). – P. 1398–1403.
6. Jakasa T., Adroec I., Spreic P. Electricity price forecasting – ARIMA model approach // *Proc. of the 8 International Conference on the European Energy Market (EEM)*. – Zagreb, 2011. – P. 222–225.
7. Кирпичникова И.М., Соломаха К.Л. Исследование методов прогнозирования электропотребления сбытового предприятия // *Электротехнические системы и комплексы*. – 2014. – № 3 (24). – С. 39–43
8. Поляхов Н.Д., Приходько И.А., Ван Е. Прогнозирование электропотребления на основе метода опорных векторов с использованием эволюционных алгоритмов оптимизации // *Современные проблемы науки и образования*. – 2013. – № 2. URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=8962> (дата обращения: 05.07.2016).
9. Грицай А.С., Тюньков Д.А. Классификация методов краткосрочного прогнозирования электропотребления для субъектов ОРЭМ // *Актуальные вопросы энергетики: материалы Всероссийской научной конференции студентов, магистрантов, аспирантов*. – Омск, 2016. – С. 41–45.
10. Sansom D.C., Downs T., Saha T.K. Support vector machine based electricity price forecasting for electricity markets utilising projected assessment of system adequacy data // *Proceedings of the Sixth International Power Engineering Conference (IPEC2003)*. – Singapore, 2003. – P. 783–788.
11. Wang J., Zhou Y., Chen X. Electricity load forecasting based on support vector machines and simulated annealing particle swarm optimization algorithm // *Proc. of the IEEE International Conference on Automation and Logistics*. – Jinan, 2007. – P. 2836–2841.
12. Ertugrul O.F. Forecasting electricity load by a novel recurrent extreme learning machines approach // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. – 2016. – № 78. – P. 429–435.
13. Laboissiere L.A., Fernandes R.A.S., Lage G.G. Maximum and minimum stock price forecasting of Brazilian power distribution companies based on artificial neural networks // *Applied Soft Computing*. – 2015. – № 35. – P. 66–74.
14. Pai P.F., Hong W.C. Support vector machines with simulated annealing algorithms in electricity load forecasting // *Energy Conversion and Management*. – 2005. – № 46 (17). – P. 2669–2688.
15. Соловьева И.А., Дзюба А.П. Прогнозирование электропотребления с учетом факторов технологической и рыночной среды // *Научный диалог*. – 2013. – № 7 (19). – С. 97–113.
16. Рудной Г.И. Выбор функции активации при прогнозировании нейронными сетями // *Машинное обучение и анализ данных*. – 2011. – Т. 1. – №№ 1. – С. 16–39.
17. Swingler K. *Applying neural networks: a practical guide*. – Waltham, Morgan Kaufmann Publishers, 1996. 303 p.
18. Горелова А.В., Любимова Т.В. Алгоритм обратного распространения ошибки // *Наука и современность*. – 2015. – № 38. – С. 151–156.
19. Живых С.Ю. Исследование влияния количества слоев нейронов и их количества на поведение ошибки скорость обучения сети // *Молодежный научно-технический вестник*. – 2013. – № 7. URL: [http://sntbul.bmstu.ru/file/591185.html?\\_s=1](http://sntbul.bmstu.ru/file/591185.html?_s=1) (дата обращения: 05.07.2016).
20. How to Extend Rapidminer 5. URL: <https://rapidminer.com/wp-content/uploads/2013/10/How-to-Extend-RapidMiner-5.pdf> (дата обращения: 05.07.2016).
21. Дугин Д.Д., Грицай А.С. Использование температурно-ветрового индекса в задачах краткосрочного прогнозирования электропотребления // *Актуальные вопросы энергетики: материалы Всероссийской научной конференции студентов, магистрантов, аспирантов*. – Омск, 2016. – С. 51–56.

Поступила 07.07.2016 г.

#### Информация об авторах

**Потапов В.И.**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой информатики и вычислительной техники Омского государственного технического университета.

**Грицай А.С.**, старший преподаватель кафедры информатики и вычислительной техники Омского государственного технического университета.

**Тюньков Д.А.**, магистрант кафедры информатики и вычислительной техники Омского государственного технического университета.

**Синицин Г.Э.**, начальник управления по работе на рынках электроэнергии и мощности ООО «Омская энерго-бытовая компания».

UDC 621.311:519.2

## USING NEURAL NETWORK FOR BUILDING SHORT-TERM FORECAST OF ELECTRICITY LOAD OF LLC «OMSK ENERGY RETAIL COMPANY»

**Viktor I. Potapov<sup>1</sup>,**

ivt@omgtu.ru

**Aleksandr S. Gritsay<sup>1</sup>,**

aleksandr.gritsay@gmail.com

**Dmitry A. Tyunkov<sup>1</sup>,**

dmitry.tyunkov@gmail.com

**Gleb E. Sinitsin<sup>2</sup>,**

Sinitsin\_GYe@omesc.ru

<sup>1</sup> Omsk State Technical University,  
11, Mira Avenue, Omsk, 644050, Russia.

<sup>2</sup> LLC «Omsk Energy Retail Company»,  
41/15, Karl Marks Avenue, Omsk, 644123, Russia.

*Relevance of the research is caused by the requirements of current legislation to «day-ahead» forecast of energy consumption in the market for wholesale electricity and capacity market participants (WECM). Most of electricity in Russia is produced by combustion of solid minerals. According to the report of JSC «System Operator of Unified Energy System» for 2015 the share of electricity production by the types of UES power plants in Russia is: 59,8 % for thermal power plants, 15, 6 % for wind and solar power plants, 19 % for nuclear power plants and 5,6 % for captive power plants. At the same time, one of the main problems associated with electric energy generation and its consumption is the problem of power balance maintenance. On the one hand, power delivery interruptions may occur when increasing planned load, on the other hand decrease in electric energy consumption will reduce the efficiency of the power plants, and increase the cost of electricity for wholesale electricity and capacity market participants, and for the end user. High accuracy in forecasting electricity consumption allows keeping power balance and using geo assets effectively to generate electricity, taking into account the specific character of the consumer. To solve these problems the wholesale market was introduced in Russia in 2004. It currently operates. The relevance of the discussed issue is caused by the current legislation of forecasting electricity consumption in the day-ahead market to the wholesale electricity and capacity market participants. The wholesale electricity and capacity market was introduced in 2006, since that time, many companies received the status of the subject of WECM. According to the rules of interaction between the subject of wholesale electricity and capacity market participants and OJSC «ATS», the subjects of wholesale electricity and capacity market participants are required to carry out daily hourly «day-ahead» forecast. To ensure the quality of forecasting electricity consumption, the subjects of wholesale electricity and capacity market participants should prepare a regulatory framework, to develop methodology for building electricity consumption forecast and calculate the risks associated with the accuracy of the models used. On the one hand, the complexity of the problem solved is characterized by occurrence of aggregate data of supply points, as it is not always possible for the subject of wholesale electricity and capacity market participants to collect the data on individual consumption of power facilities in hourly mode. On the other hand, the introduction of commercial accounting system can solve this problem by embedding a large investment for installation of the automated commercial power system, but as a rule, the subject of wholesale electricity and capacity market participants goes to such a long-term cost-payback.*

**The main aim** of the study is to apply the forecasting methodology using neural network for building predictive models for LLC «Omsk Energy Retail Company».

**The methods used in the study:** Holt–Winters model, the ARIMA, neural networks, temperature and wind index.

**The results.** The authors have considered the methods of constructing the predictive models, the path of their evolution since the launch of wholesale electricity and capacity market participants, and developed the method of constructing the forecast of «Omsk Energy Retail Company» using neural network, taking into account the temperature and wind index and allocation of common types of days by electric energy consumption.

### Key words:

Data mining, neural network, forecasting, electricity load, wholesale electricity and capacity market.

### REFERENCES

1. Nur A.A., Maizah H.A., Norizan M. Electricity load demand forecasting using exponential smoothing methods. *World Applied Sciences Journal*, 2013, no. 22 (11), pp. 1540–1543.
2. Ismagilov T.S. Metody resheniya zadachi prognozirovaniya v energetike [Forecasting methods in power engineering]. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta*, 2010, vol. 14, no. 4 (39), pp. 93–96.
3. Taylor J.W., McSharry P.E. Short-term load forecasting methods: an evaluation based on European data. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2007, no. 22 (4), pp. 2213–2219.
4. Taylor J.W. Short-term load forecasting with exponentially weighted methods. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2012, no. 27 (1), pp. 458–464.
5. Han P., Wang P.X., Zhand S.Y., Zhu D.H. Drought forecasting based on the remote sensing data using ARIMA model. *Mathema-*

- tical and Computer Modelling*, 2011, no. 51 (11), pp. 1398–1403.
6. Jakasa T., Adroec I., Spric P. Electricity price forecasting – ARIMA model approach. *Proc. of the 8<sup>th</sup> International Conference on the European Energy Market (EEM)*. Zagreb, 2011. pp. 222–225.
  7. Kirpichnikova I.M., Solomakho K.L. Research of forecasting methods of electricity consumption in power enterprises. *Electrotechnical Systems and Complexes*, 2014, no. 3 (24), pp. 39–43. In Rus.
  8. Polyakhov N.D., Prikhodko I.A., Van E. Electric load forecasting based on support vector machine optimized by evolutionary algorithms. *Modern problems of science and education*, 2013, no. 2. In Rus. Available at: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=8962> (accessed 05 July 2016).
  9. Gritsay A.S., Tyunkov D.A. Klassifikatsiya metodov kratkosrochnogo prognozirovaniya elektropotrebleniya dlya subektov OREM [Classification methods for short-term electricity load forecasting for subjects of WECM]. *Aktualnye voprosy energetiki: materialy Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii studentov, magistrantov, aspirantov* [Relevant issues of power engineering: Proc. of All-Russia scientific conference for students, undergraduates, graduate students]. Omsk, 2016. pp. 41–45.
  10. Sansom D.C., Downs T., Saha T.K. Support vector machine based electricity price forecasting for electricity markets utilising projected assessment of system adequacy. *Proceedings of the Sixth International Power Engineering Conference (IPEC2003)*. Singapore, 2003. pp. 783–788.
  11. Wang J., Zhou Y., Chen X. Electricity load forecasting based on support vector machines and simulated annealing particle swarm optimization algorithm. *Proceeding of the IEEE International Conference on Automation and Logistics*. Jinan, 2007. pp. 2836–2841.
  12. Ertugrul O.F. Forecasting electricity load by a novel recurrent extreme learning machines approach. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2016, no. 78, pp. 429–435.
  13. Laboissiere L.A., Fernandes R.A.S., Lage G.G. Maximum and minimum stock price forecasting of Brazilian power distribution companies based on artificial neural. *Applied Soft Computing*, 2015, no. 35, pp. 66–74.
  14. Pai P.F., Hong W.C. Support vector machines with simulated annealing algorithms in electricity load forecasting. *Energy Conversion and Management*, 2005, no. 46 (17), pp. 2669–2688.
  15. Soloveva I.A., Dzyuba A.P. Prognozirovanie elektropotrebleniya s uchetom faktorov tekhnologicheskoy i rynochnoy sredy [Forecasting electric energy consumption with factors of process and market environment taken into account]. *Nauchnyi Dialog*, 2013, no. 7 (19), pp. 97–113.
  16. Rudnoy G.I. Vybór funktsii aktivatsii pri prognozirovanii neyronnymi setyami [Selecting the activation function when predicting neural networks]. *Journal of Machine Learning and Data Analysis*, 2011, vol. 1, no. 1, pp. 16–39.
  17. Swinger K. *Applying neural networks: a practical guide*. Waltham, Morgan Kaufmann Publishers, 1996. 303 p.
  18. Gorelova A.V., Lyubimova T.V. Algoritm obratnogo rasprostraneniya oshibki [Algorithm of backpropagation]. *Nauka i sovremennost*, 2015, no. 38, pp. 151–156.
  19. Zhivykh S.Yu. Issledovanie vliyaniya kolichestva sloev neyronov i ikh kolichestva na povedenie oshibki skorost' obucheniya seti [Research of influence of the number of layers of neurons and their number on the behavior of the speed of the network training error]. *Molodezhny nauchno-tekhnicheskii vestnik*, 2013, no. 7. Available at: [http://sntbul.bmstu.ru/file/591185.html?\\_\\_s=1](http://sntbul.bmstu.ru/file/591185.html?__s=1) (accessed 05 July 2016).
  20. *How to Extend Rapidminer 5*. Available at: <https://rapidminer.com/wp-content/uploads/2013/10/How-to-Extend-Rapid-Miner-5.pdf> (accessed 05 July 2016).
  21. Dugin D.D., Gritsay A.S. Ispolzovanie temperaturno-vetrovogo indeksa v zadachakh kratkosrochnogo prognozirovaniya elektropotrebleniya [Use of temperature and wind index in problems of short-term forecasting of power loading]. *Aktualnye voprosy energetiki: materialy Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii studentov, magistrantov, aspirantov* [Relevant issues of power engineering: Proc. of All-Russia scientific conference for students, undergraduates, graduate students]. Omsk, 2016. pp. 51–56.

Received: 7 July 2016.

#### Informations about the authors

**Viktor I. Potapov**, Dr. Sc., professor, head of the department, Omsk State Technical University.

**Aleksandr S. Gritsay**, senior professor, Omsk State Technical University.

**Dmitry A. Tyunkov**, graduate student, Omsk State Technical University.

**Gleb E. Sinitsin**, head of the department, LLC «Omsk Energy Retail Company».

УДК 378.147.88

## МЕТОД АВТОМАТИЗАЦИИ ОЦЕНКИ ИНДЕКСОВ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ И ИХ ИЗМЕНЕНИЯ ВО ВРЕМЕНИ ПО КОСМИЧЕСКИМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ ПРИ ОЦЕНКЕ СОСТОЯНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ В ОКРЕСТНОСТИ ПОЛИГОНОВ ТВЕРДЫХ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ

Казарян Маретта Леоновна<sup>1</sup>,  
marettak@bk.ru

Рихтер Андрей Александрович<sup>2</sup>,  
urfin17@yandex.ru

Шахраманьян Михаил Андраникович<sup>1,2</sup>,  
7283963@mail.ru.

<sup>1</sup> Владикавказский филиал Финансового университета при Правительстве Российской Федерации, Россия, 362001, г. Владикавказ, ул. Молодежная, 7.

<sup>2</sup> НИИ АЭРОКОСМОС, Россия, 105064, г. Москва, Гороховский пер., 4.

**Актуальность работы** обусловлена упрощением процедур получения и обработки космических изображений посредством автоматизации обработки и расчета тех или иных индексов подстилающей поверхности и их временных изменений. Предлагаемый метод позволяет с высокой скоростью и в широких масштабах обнаруживать признаки деградации почвы, в частности, объекты захоронения отходов размера, кратного пространственному разрешению снимков, расчетом соответствующих индексов подстилающей поверхности. Основным недостатком действующих методов детектирования объектов захоронения отходов состоит в том, что их поиск и обнаружение, оценка состояния окружающей среды осуществляются наземными «ручными» методами. Все это и, прежде всего, само выявление объектов дает низкую производительность работы в области мониторинга свалок. В результате внедрения метода автоматизации детектирования объектов захоронения отходов может быть существенно улучшена защита территории от воздействия негативных факторов. Данные факторы, в частности фактор замусоривания окружающей среды, с точки зрения космических изображений могут быть выражены в виде различных индексов подстилающей поверхности.

**Цель:** описание метода автоматического получения индексов подстилающей поверхности и их временных рядов с использованием космических изображений, привязанных к географической проекции UTM, и базы их метаданных.

**Методы исследования:** методы получения масок облачности (метод пороговой фильтрации) и регрессионного анализа (метод среднеквадратического отклонения) для проведения темпоральной обработки.

**Результаты.** Приведен алгоритм автоматической обработки, и описаны основные шаги его работы. Обозначена модель пересчета параметров изменения индексов подстилающей поверхности при добавлении новых значений коэффициентов спектральной яркости или удалении прежних. Работа алгоритма показана на примере расчета временных рядов NDVI заданной области наблюдения и применения метода для анализа данных обработки, в частности, автоматически просчитаны изображения NDVI окрестности полигона ТБО Торбеево Люберецкого района за период 2003–2011 гг. Проиллюстрированы структурные изменения биопродуктивности почвы в окрестности 4 муниципальных свалок городского округа Железнодорожный Московского региона: Кучино, Саввино, Лисьи Горы и Некрасовка.

### Ключевые слова:

Полигон ТБО, космическое изображение, индекс подстилающей поверхности, автоматизация, дистанционное зондирование, вегетационный индекс, мультимедиапрограмма.

### Введение

Проблема замусоривания многогранна и включает такие аспекты, как [1]: 1) среднестатистический рост площади замусоривания во времени (рост числа новых свалок и размера прежних); 2) технологическая сложность и дороговизна технологий рециклинга, отсутствие технологий для многих видов отходов [2]; 3) актуализация метода складирования на полигонах как основной формы утилизации отходов [3], который также в своей идее является сложным и дорогостоящим процессом; 4) низкий уровень «мусорной» морали и нравственности во многих странах мира, особенно в развивающихся [4]; 5) приведение замусоривания к разным формам деградации почвы, загрязнению воды и воздуха, уг-

нетению и гибели различных видов животных и растительных систем; 6) высокий уровень вероятности заболеваемости, в том числе хронической, жителей в окрестностях полигонов ТБО.

### Постановка задачи

Индексы подстилающей поверхности (ИПП) описывают те или иные характеристики поверхности земли для каждой точки космических изображений. Помимо коэффициентов спектральной яркости (КСЯ), для расчета ИПП могут быть использованы различные сторонние данные, такие как параметры погоды, почвы и др. Деградация почвы – одна из форм разрушения экосистем, и для ее оценки существует и разработано множество мето-



дов дистанционного зондирования [5–8]. Также как и другие характеристики поверхности, деградация почвы может быть описана ИПП [9, 10].



Рис. 1. Блок-схема алгоритма

Fig. 1. Block-scheme of algorithm

Во многих случаях требуется найти не только сами ИПП, но и их изменение во времени. В работах [11, 12] был описан метод оценки индексов реакции растительности (ИРР), а также степеней деградации почвы (СДП) как изменение ИРР во времени, показывающих реакцию растительности на те или иные внешние факторы, в частности жизненно важные факторы для растений – тепло, вода и свет.

Предлагается метод автоматизации расчета ИПП (ИРР) и их изменения во времени (СДП) на базе получения и обработки геопривязанных участков космических снимков того или иного типа, в частности Landsat 4, 5, 7, 8. В результате могут быть получены карты значений ИПП и их изменений во времени в режиме реального времени, т. е. при добавлении новых или удалении прежних участков.

#### Описание алгоритма

Блок-схема алгоритма показана на рис. 1. На входе – космические снимки, геопривязанные к проекции UTM, с наличием файлов с метаданными, такие как снимки низкого пространственного разрешения Landsat 1–8. Выходные данные – изображения ИПП и их изменение, в частности ИРР и СДП.

Процедура работы алгоритма происходит следующим образом. Задается прямоугольная область наблюдения в виде  $(x_1, y_1)$  и  $(x_2, y_2)$  – координаты нижней левой и верхней правой вершин прямоугольника в UTM. Из файла с метаданными каждого входного снимка выделяются необходимые: размер снимка, координаты вершин снимка и вырезаемого из него участка в UTM, момент времени съемки, тип снимка. В соответствии с матричными

и географическими координатами вырезаемого из снимка участка формируется массив из  $nb$ ,  $n < N$  изображений, где  $N$  – полное число снимков,  $n$  – число снимков, в которых есть пересечение с областью наблюдения,  $b$  – число каналов. Также формируется  $n$  масок облачности – бинарных изображений размеров участка (пиксель равен 1, если облачность есть, 0 – нет). Маски [13–14] могут быть получены на базе различных критериев, например  $NDVI < 0,1$  и  $q_1 > 150$  (выделение ярко выраженной облачности), где  $NDVI$  – нормализованный вегетационный индекс [15–16],  $q_1$  – КСЯ на 1-м канале пикселя.

Формирование массива изображений и масок облачности позволяет найти значение ИПП  $r$  в различных точках пространства и времени области наблюдения. При этом каждой точке пространства соответствуют свои временные ряды значений КСЯ на всех спектральных частотах (каналах снимков), включающие те временные точки, в которых для данной точки пространства маска облачности равна 0:

$$Q = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & \dots & q_{1k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ q_{b1} & q_{b2} & \dots & q_{bk} \end{bmatrix}, \quad T = [t_1 \quad t_2 \quad \dots \quad t_k],$$

где  $Q$  – временной ряд КСЯ,  $T$  – соответствующие отчеты времени съемки,  $k$  – число отчетов для данной точки пространства области наблюдения,  $q_{ij}$  – КСЯ изображения на  $i$ -м канале в  $t_j$ -й момент времени съемки.

Индекс  $p$ , характеризующий изменение ИПП (ИРР), может быть выражен по-разному, например как коэффициент линейного тренда временного ряда ИПП (СДП)  $R = [r_1 \ r_2 \ \dots \ r_k]$ :

$$p = \frac{a \cdot b - c \cdot d}{a \cdot e - c^2},$$

$$a = k, \quad b = \sum_{j=1}^k t_j r_j, \quad c = \sum_{j=1}^k t_j, \quad d = \sum_{j=1}^k r_j, \quad e = \sum_{j=1}^k t_j^2. \quad (1)$$

При добавлении новой точки  $rr'$

$$p' = \frac{a' \cdot b' - c' \cdot d'}{a' \cdot e' - c'^2}, \quad (2)$$

$$a' = a + m', \quad b' = b + m' \cdot t' \cdot r', \quad c' = c + m' \cdot t',$$

$$d' = d + m' \cdot r', \quad e' = e + m' \cdot t'^2, \quad (3)$$

где  $m'$  – маска облачности в данной точке (0 – есть, 1 – нет),  $t'$  – момент времени съемки для нового участка. То есть при добавлении к временному ряду ИПП нового изображения ИПП нет необходимости пересчитывать весь временной ряд (см. (1)), достаточно создать 5 матриц значений  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  и  $e$  и просто менять их при каждом новом вводимом изображении ИПП (см. (2) и (3)). По аналогии с добавлением новых изображений ИПП пересчитывается изображение значений  $p$  при удалении изображений ИПП. Для этого в (3) вместо сложения – вычитание добавляемых слагаемых.

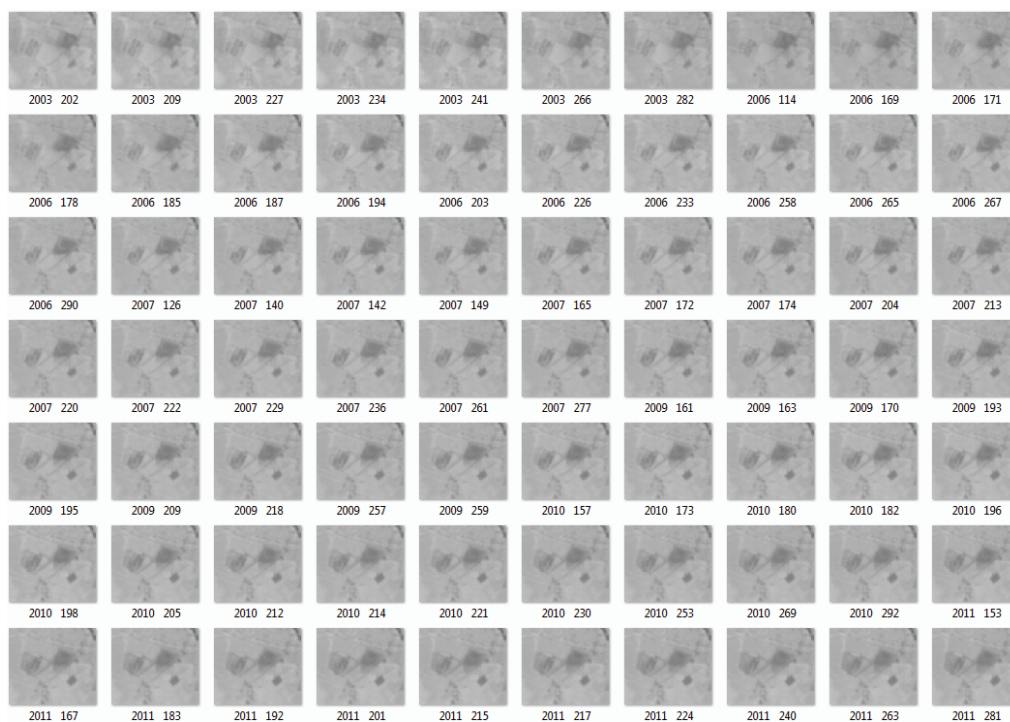


Рис. 2. Фрагмент массива изображений NDVI (полигон ТБО Торбеево, Люберецкий район Московского региона)

Fig. 2. Fragment of massive of NDVI images array (Torbeevo landfill, Lyubertsy district, Moscow region)

### Результаты работы алгоритма

Покажем результаты работы алгоритма на примере оценки NDVI и его изменения во времени.

На рис. 2 приведен фрагмент массива изображений NDVI в окрестности полигона ТБО Торбеево (названия файлов – 'Год/пробел/ДеньГода.tif'). Покадровый просмотр фильма в мультимедиапрограмме [17–18] данных загружаемых в нее изображений показал стабильное уменьшение NDVI на большей части окрестности свалки. Так, спектр изменений биопродуктивности  $dB = B_2 - B_1$ ,  $B_{1,2} = 1400 \cdot NDVI_{1,2}$  [гр/(м<sup>2</sup>·год)],  $NDVI > 0,1$  за период с  $t_1$  – август, 2001 г., по  $t_2$  – август, 2011 г., в окрестностях свалки Торбеево показан на рис. 3 [13, 19–20].

На рис. 4 даны изображения NDVI полигона (чем темнее пиксель, тем меньше биопродуктивность растительности), на (а)–(б) видны значительные ухудшения биопродуктивности за 10 лет.

Как видно на рис. 3, расположение максимума левее нулевой отметки  $dB$  (особенно в период зрелости фитомассы) свидетельствует об общем ухудшении состояния почвы и растительности за данный период времени в окрестности полигона ТБО Торбеево. Уменьшению биопродуктивности соответствует значительно большая площадь поверхности (чем увеличение) за счет расширения полигона в ширину и высоту, а также замещения природных объектов антропогенными, что влияет на продуктивность их окрестности. Как в характери-

стике плотности распределения, пик показывает средний стабильный уровень изменения биопродуктивности в окрестности свалки. Большая близость к нормальному распределению, чем, например, к распределению редких событий Пуассона (за счет пологости графика функции), показывает в общем закономерность, а не спонтанность процессов, т. е. наличие одного основного источника заражения.

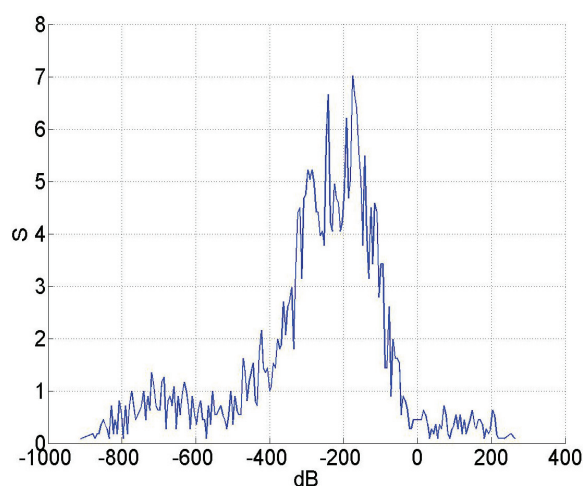
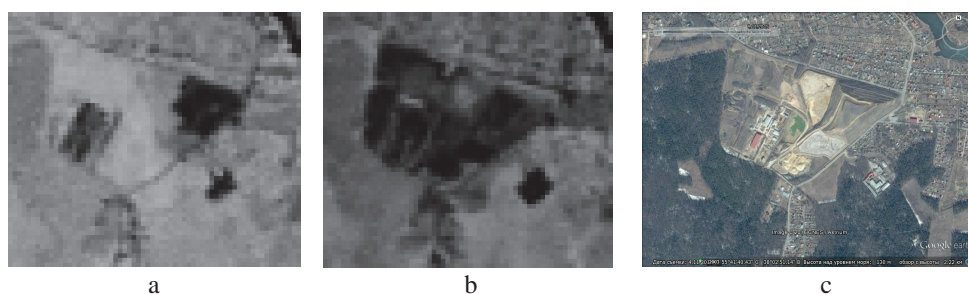


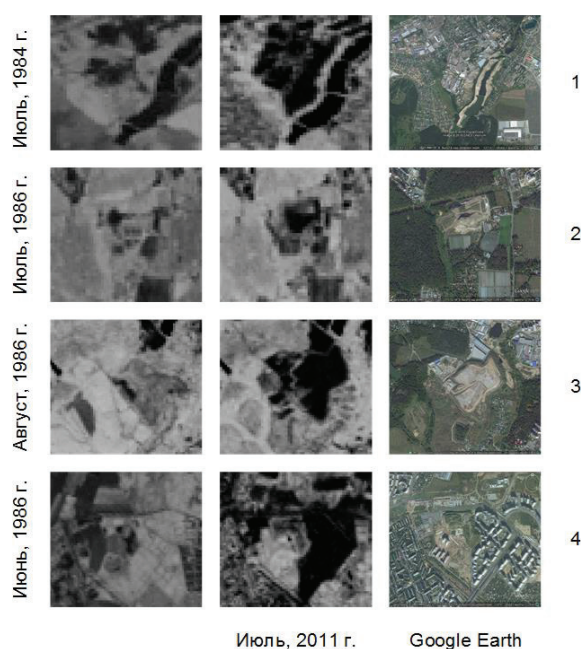
Рис. 3. Спектр изменений биопродуктивности за 2001–2011 гг., август;  $dB$  – гр/(м<sup>2</sup>·год),  $S$  – га (полигон ТБО Торбеево)

Fig. 3. Spectrum of solid productivity changes for 2001–2011, August;  $dB$  – g/(m<sup>2</sup>·year),  $S$  – ha (landfill Torbeevo)



**Рис. 4.** а) биопродуктивность в 2001 г. (август); б) биопродуктивность в 2011 г. (август); в) изображение Google Earth (полигон ТБО Торбеево)

**Fig. 4.** a) biological productivity in 2001 (August); b) biological productivity in 2011 (August); c) Google Earth image (landfill Torbeevo)



**Рис. 5.** Структурные изменения биопродуктивности в окрестности некоторых муниципальных свалок г.о. Железнодорожный Московского региона

**Fig. 5.** Structure changes of solid productivity in several municipal dumps of Zheleznodorozhny town, Moscow region

Площадь области стабильного ухудшения состояния растительности значительно больше площади улучшения состояния. Это выражено не только на территории, запечатанной технологическими объектами (зданиями, сооружениями, автодорогами и др.), но и на территории открытого типа (лес, поле, водоем и др.) – рис. 4, с. Закрытые и открытые территории (ареалы) способны воспроизводить биопродуктивность в некотором ограниченном диапазоне, который со временем стабильно сужается и смещается в область меньших значений. Многочисленные структурные изменения

окружающей среды, возникающие в процессе технологических операций на полигоне, приводят к зарегулированию биопродуктивности тех или иных территорий.

Данное «правило» действует на другие муниципальные свалки, расположенные в окрестности г.о. Железнодорожный (рис. 5), такие как полигон строительных отходов Саввино (1), рекультивируемый полигон Лисьи Горы (2), полигон ТБО Кучино (3), Некрасовка (4), а также полигоны ТБО Торбеево, Машково и Балластный карьер (не изображенные на рисунке).

На базе временного ряда NDVI можно проследить ход изменения биопродуктивности во времени. Например, между стадией активной эксплуатации полигона и реакцией на это окружающей природной среды имеет место переходной процесс [14–15]. Так, для полигона ТБО Кучино ошугимое уменьшение биопродуктивности почвы детектируется с 2001 г., через 5 лет после начала активной стадии эксплуатации. Запечатывание технологическими объектами окрестности и пополнение полигона ТБО Некрасовка (рис. 5) привело к потере устойчивости растительности к данным факторам и стабильному уменьшению ее биопродуктивности, начиная с 2003 г.

#### Заключение

Предлагаемый метод и алгоритм позволяет автоматизировать получение временных рядов значений КСЯ и индексов подстилающей поверхности, получаемых на базе КСЯ, с целью исследования данных космических изображений в пространстве и времени (сезонные и эволюционные изменения объектов того или иного типа). В частности, могут быть получены динамические параметры, т. е. характеристики местности, «растянутые» во времени, на базе статических (в «мгновенной» точке пространства).



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шахраманьян М.А., Рихтер А.А. Методы и технологии космического мониторинга объектов захоронения отходов в интересах обеспечения экологической безопасности территорий. – М.: Издательский центр РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2013. – 241 с.
2. Шубов Л.Я., Ставровский М.Е., Шехирев Д.В. Технология отходов мегаполиса. Технологические процессы в сервисе. – М.: ГОУВПО «МГУС», 2006. – 410 с.
3. Основные требования к полигону ТБО при складировании и сепарации отходов / В.А. Игнатьев, Е.В. Левин, В.Д. Баширов, Р.Ф. Сагитов, Н.Д. Федоринов // Научные исследования: от теории к практике: сборник материалов II Международной научно-практической конференции. – Чебоксары: Центр научного сотрудничества «Интерактив плюс», 2015. – С. 11–12.
4. Колесников С.И. Экология. – М.: Издательско-торговая корпорация «Дашков и К°»; Ростов н/Д: Наука-Пресс, 2007. – 384 с.
5. Анализ и прогноз урожайности зерновых в Волгоградской области / В.П. Алимova, В.В. Чикомазова, Т.А. Матвеева, Д.К. Агишева, С.А. Зотова // Международный студенческий научный вестник. – 2016. – № 3–3. – С. 406–407.
6. Spatiotemporal monitoring of soil salinization in irrigated Tadla Plain (Morocco) using satellite spectral indices / Abderrazak El Harti, Rachid Lhissou, Kareem Chokmani, Jamal-eddine Ouzemou, Mohamed Hassouna, El Mostafa Bachaoui, Abderrahmene El Ghmari // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. – August 2016. – V. 50. – P. 64–73.
7. Anchang J.Y., Ananga E.O., Ruiliang Pu. An efficient unsupervised index based approach for mapping urban vegetation from IKONOS imagery // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. – August 2016. – V. 50. – P. 211–220.
8. Estimation of arsenic in agricultural soils using hyperspectral vegetation indices of rice / Tiezhu Shi, Huizeng Liu, Yiyun Chen, Junjie Wang, Guofeng Wu // Journal of Hazardous Materials. – 5 May 2016. – V. 308. – P. 243–252.
9. Using NDVI to measure precipitation in semi-arid landscapes / A.N. Birtwistle, M. Laituri, B. Bledsoe, J.M. Friedman // Journal of Arid Environments. – August 2016. – V. 131. – P. 15–24.
10. Игнатьев В.Ю., Мурынин А.Б. Метод и алгоритмы прогнозирования сезонных характеристик областей антропогенного воздействия с использованием многолетних космических данных // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2015. – № 3. – С. 79–89.
11. Murynin A., Rihter A., Ignatiev V. Detection of the soil degradation areas on multispectral images by measuring the response of vegetation to salinity // Распознавание образов и анализ изображений. Новые информационные технологии: 11-я Международная конференция. – Самара, 23–28 сентября 2013. – С. 211–220.
12. Разработка метода оценки степени деградации почвы на основе данных долгосрочных наблюдений / А.А. Рихтер, М.А. Шахраманьян, М.Л. Казарян, А.Б. Мурынин // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 2–14. – С. 3095–3099.
13. Three-dimensional imaging approach using built-in lens mask lithography / Toshiki Tanaka, Hisao Kikuta, Hiroaki Kawata, Masaaki Yasuda, Masaru Sasago, Yoshihiko Hira // Microelectronic Engineering. – 1 June 2016. – V. 158. – P. 85–90.
14. Фисенко В.Т., Фисенко Т.Ю. Компьютерная обработка и распознавание изображений. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2008. – 192 с.
15. A new burn severity index based on land surface temperature and enhanced vegetation index / Zhong Zheng, Yongnian Zeng, Songnian Li, Wei Huang // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. – March 2016. – V. 45. – P. A. – P. 84–94.
16. Sensitivity analysis of vegetation indices to drought over two tallgrass prairie sites / Rajen Bajgain, Xiangming Xiao, Pradeep Wagle, Jeffrey Basara, Yuting Zhou // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – October 2015. – V. 108. – P. 151–160.
17. Qiming Zhou, Baolin Li, Bo Sun. Modelling spatio-temporal pattern of land use change using multitemporal remotely sensed imagery / Qiming Zhou, Baolin Li, Bo Sun // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2008. – V. XXXVII. – P. B7. – P. 729–734.
18. Рихтер А.А., Казарян М.Л., Шахраманьян М.А. Обработка космических изображений с использованием средств мультимедиа и ее применение в космическом мониторинге объектов захоронения отходов // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 8–2. – С. 328–332.
19. Головацкая Е.А., Алексеева М.Н., Дюкарев Е.А. Оценка биопроductивности болотных экосистем по дистанционным и наземным данным // Торфяники Западной Сибири и цикл углерода: прошлое и настоящее: материалы Четвёртого Международного полевого симпозиума; под ред. А.А. Титляновой и М.И. Дергачёвой. – Новосибирск, 2014. – С. 166–168.
20. Путилина В.С., Галицкая И.В., Юганова Т.И. Влияние органического вещества на миграцию тяжелых металлов на участках складирования твердых бытовых отходов: аналитический обзор. Серия: Экология. Вып. 76. – Новосибирск: ПНТБ СО РАН, 2005. – 100 с.

Поступила 21.06.2016 г.

## Информация об авторах

**Казарян М.Л.**, кандидат физико-математических наук, доцент, заведующая кафедрой математики и информатики Владикавказского филиала Финансового университета при Правительстве Российской Федерации.

**Рихтер А.А.**, инженер НИИ «АЭРОКОСМОС».

**Шахраманьян М.А.**, доктор технических наук, профессор кафедры математики и информатики Владикавказского филиала Финансового университета при Правительстве Российской Федерации; заместитель директора НИИ «АЭРОКОСМОС».



UDC 378.147.88

## METHOD FOR AUTOMATING ESTIMATION OF SURFACE INDICES AND THEIR TIME CHANGES USING SPACE IMAGES. APPLICATION OF THE METHOD IN ASSESSING THE ENVIRONMENT STATE IN THE VICINITY OF SOLID WASTE LANDFILLS

Maretta L. Kazaryan<sup>1</sup>,  
marettak@bk.ru

Andrey A. Rikhter<sup>2</sup>,  
urfin17@yandex.ru

Mikhail A. Shakhramanyan<sup>1,2</sup>,  
7283963@mail.ru

<sup>1</sup> Financial University at Government of the Russian Federation, Vladikavkaz Branch,  
7, Molodezhnaya street, Vladikavkaz, 362001, Russia.

<sup>2</sup> Research Institute «AEROCOSMOS»,  
4, Gorokhovskiy line, Moscow, 105064, Russia.

The relevance of the research is caused by simplification of receiving and processing satellite images through automation of processing and calculation of various indices of underlying surface, and their temporal changes. The proposed method allows detecting, with high speed and on a large scale, the signs of soil degradation, in particular, the waste disposal facilities of the size, multiple of images spatial resolution, calculating proper surface indices. The main drawback of the existing methods of detecting waste disposal sites is that their search, detection, environmental assessment are carried out by ground, "manual" methods, which gives low productivity and research in this area, first of all, their revealing. As a result of introduction of the automation detection method of waste disposal facilities the security of territory, affected by negative factors, expressed on the surface of the earth by various surface indices, and particularly by factor of littering the environment, can be improved significantly.

**The main aim** of the study is to develop a method for obtaining automatically the underlying surface indices and time series using satellite images linked to UTM geographical projection and their metadata.

**The methods used in the study:** methods of getting cloud masks (threshold filtering method) and regression analysis (method of standard deviation) for temporal processing.

**The results.** The paper introduces the algorithm of automatic data processing and describes the main steps of its operation. The authors define the model of conversion parameters of underlying surface indices change when adding new values of the spectral brightness coefficients or deleting the previous ones. The algorithm operation is shown by the example of calculation of NDVI time-series of the given observation area and their application to analyze the processing data, in particular, the NDVI images are automatically calculated in neighborhood landfill of Torbeevo Lyubertsky district for 2003–2011. The paper illustrates structural changes in soil bio-productivity with-in four municipal landfills of Zheleznodorozhny urban district in Moscow region: Kuchino, Savvino, Licyi Gory, Nekrasovka.

### Kew words:

Landfill, space image, underlying surface index, automation, remote sensing, vegetation index, multimedia program.

### REFERENCES

- Shachramanyan M.A., Richter A.A. *Metody i tekhnologii kosmicheskogo monitoringa obektov zakhoroneniya otkhodov v interesakh obespecheniya ekologicheskoy bezopasnosti territoriy* [Methods and techniques of space monitoring of waste disposal sites to ensure the ecological safety of territories]. Moscow, RGU nefti i gaza imeni I.M. Gubkin Press, 2013. 241 p.
- Shubov L.Ya., Stavrovskiy M.E., Shekhirev D.V. *Tekhnologiya otkhodov megapolisa. Tekhnologicheskie protsessy v servise* [Metropolis Waste Technology. Processes in service]. Moscow, GOUV-PO «MGUS» Publ., 2006. 410 p.
- Ignatev V.A., Levin E.V., Bashirov V.D., Sagitov R.F., Fedorinov N.D. *Osnovnye trebovaniya k poligonu TBO pri skladirovanii i separatsii otkhodov* [Basic requirements for landfill for waste storage and separation]. *Nauchnye issledovaniya: ot teorii k praktike: Sbornik materialov II Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Proc. II International Scientific and Practical Conference. Researches from theory to practice]. Moscow, 2015. pp. 11–12.
- Kolesnikov S.I. *Ekologiya* [Ecology]. Moscow, Dashkov i K0 Publ.; Rostov n/D, Nauka-Press, 2007. 384 p.
- Alimova V.P., Chikomazova V.V., Matveeva T.A., Agisheva D.K., Zotova S.A. *Analiz i prognoz urozhaynosti zernovykh v Volgogradskoy oblasti* [Analysis and forecast of grain yield in Volgograd region]. *Mezhdunarodny studencheskiy nauchny vestnik*, 2016, no. 3–3, pp. 406–407.
- Abderrazak El Harti, Rachid Lhissou, Karem Chokmani, Jamal-eddine Ouzemou, Mohamed Hassouna, El Mostafa Bachaoui, Abderrahmene El Ghmari. *Spatiotemporal monitoring of soil salinization in irrigated Tadla Plain (Morocco) using satellite spectral indices*. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, August 2016, vol. 50, pp. 64–73.
- Anchang J.Y., Ananga E.O., Ruiliang Pu. *An efficient unsupervised index based approach for mapping urban vegetation from IKONOS imagery*. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, August 2016, vol. 50, pp. 211–220.
- Tiezhu Shi, Huizeng Liu, Yiyun Chen, Junjie Wang, Guofeng Wu. *Estimation of arsenic in agricultural soils using hyperspectral vegetation indices of rice*. *Journal of Hazardous Materials*, 5 May 2016, vol. 308, pp. 243–252.
- Birtwistle A.N., Laituri M., Bledsoe B., Friedman J.M. *Using NDVI to measure precipitation in semi-arid landscapes*. *Journal of Arid Environments*, August 2016, vol. 131, pp. 15–24.

10. Ignatov V.Yu., Murynin A.B. Metod i algoritmy prognozirovaniya sezonnykh kharakteristik oblastey antropogennogo vozdeystviya s ispolzovaniem mnogoletnikh kosmicheskikh dannyykh [Method and prediction algorithms of seasonal performance of anthropogenic interference areas using long-term space data]. *Bulletin of the Russian Academy Sciences. Theory and control systems*, 2015, no. 3, pp. 79–89.
11. Murynin A., Richter A., Ignatov V. Detection of the soil degradation areas on multispectral images by measuring the response of vegetation to salinity. *11-ya mezhdunarodnaya konferentsiya. Raspoznavanie obrazov i analiz izobrazheniy: Nove informatsionnye tekhnologii* [Proc. 11<sup>th</sup> International Conference. Pattern recognition and image analysis: new information technologies]. Samara, 23–28 September, 2013. pp. 211–220.
12. Rikhter A.A., Shakhramanian M.A., Kazaryan M.L., Murynin A.B. Development of the method for assessing soil degradation degree based on long-term observations. *Fundamentalnye issledovaniya*, 2015, no. 2 (P. 14), pp. 3095–3099. In Rus.
13. Toshiki Tanaka, Hisao Kikuta, Hiroaki Kawata, Masaaki Yasuda, Masaru Sasago, Yoshihiko Hira. Three-dimensional imaging approach using built-in lens masklithography. *Microelectronic Engineering*, 1 June 2016, vol. 158, pp. 85–90.
14. Fisenko V.T., Fisenko T.Yu. *Kompyuternaya obrabotka i raspoznavanie izobrazheniy* [Computer processing and image recognition]. St-Petersburg, SPbGU ITMO Press, 2008. 192 p.
15. Zhong Zheng, Yongnian Zeng, Songnian Li, Wei Huang. A new burn severity index based on land surface temperature and enhanced vegetation index. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, March 2016, vol. 45, P. A, pp. 84–94.
16. Rajen Bajgain, Xiangming Xiao, Pradeep Wagle, Jeffrey Basara, Yuting Zhou. Sensitivity analysis of vegetation indices to drought over two tallgrass prairie sites. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, October 2015, vol. 108, pp. 151–160.
17. Qiming Zhou, Baolin Li, Bo Sun. Modelling spatio-temporal pattern of land use change using multitemporal remotely sensed imagery. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2008, vol. XXXVII, P. B7, pp. 729–734.
18. Rikhter A.A., Kazaryan M.L., Shakhramanian M.A. Processing space images using multimedia and its application in monitoring waste disposal objects. *Fundamentalnye issledovaniya*, 2015, no. 8–2, pp. 328–332. In Rus.
19. Golovatskaya E.A., Alekseeva M.N., Dyukarev E.A. Otsenka bioproduktivnosti bolotnykh ekosistem po distantsionnym i nazemnym dannym [Evaluation of bio-productivity of wetland ecosystems by remote and land-based data]. *Torfyanski Zapadnoy Sibiri i tsikl ugleroda: proshloe i nastoyashchee. Materialy Chetvertogo Mezhdunarodnogo polevogo simpoziuma*. [Proc. of Fourth International Field Symposium. Peat bogs of western Siberia and carbon cycle: past and future]. Eds. A.A. Titlyanova, M.I. Der-gacheva. Moscow, 2014. pp. 166–168.
20. Putilina V.S., Galitskaya I.V., Yuganova T.I. *Vliyaniye organicheskogo veshchestva na migratsiyu tyazhelykh metallov na uchastkakh skladirovaniya tverdykh bytovykh otkhodov: analiticheskiy obzor* [Influence of organic matter on of heavy metals migration in the areas of solid waste disposal: analytical review.]. *Ser. Ekologiya*, Vyp. 76, Novosibirsk: GPNTB SO RAN, 2005. 100 p.

*Received: 21 June 2016.*

#### Information about the authors

**Maretta L. Kazaryan**, PhD in Physics and Mathematics, associate professor, head of the department, Financial University at Government of the Russian Federation, Vladikavkaz Branch.

**Andrey A. Richter**, engineer, Research Institute «AEROCOSMOS».

**Michail A. Shakhramanian**, Dr. Sc., professor, Financial University at Government of the Russian Federation; deputy director, Research Institute «AEROCOSMOS».

УДК 553.98(571)

## ПАЛЕОКЛИМАТИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ РЕКОНСТРУКЦИИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ИСТОРИИ НЕФТЕМАТЕРИНСКОЙ БАЖЕНОВСКОЙ СВИТЫ АРКТИЧЕСКОГО РЕГИОНА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Искоркина Альбина Альбертовна<sup>1,2</sup>,  
iskorkina.a@mail.ru

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

<sup>2</sup> Томский филиал ФБУ «Территориальный фонд геологической информации по Сибирскому федеральному округу»,  
Россия, 634034, г. Томск, ул. Мокрушина, 9, стр. 16.

**Актуальность.** Земли Арктического региона Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции имеют уникальные палеоклиматические особенности, обуславливающие необходимость совершенствовать схемы и параметры количественной оценки ресурсов углеводородов объемно-генетическим методом, основанным на палеореконструкциях геотермического режима материнских отложений.

**Цель исследования:** обобщить известные данные о мезозойско-кайнозойском климате северной части Западной Сибири и оценить влияние факторов палеоклимата – векового хода температур на земной поверхности и неоплейстоценовых толщ мерзлоты – на расчетный геотермический режим нефтематеринских свит, определяющий подсчет плотности ресурсов.

**Объект исследования:** баженовские отложения мезозойско-кайнозойского разреза, вскрытого глубокой скважиной 11 на Арктической площади (п-ов Ямал).

**Методика исследования:** системный анализ и построение векового хода палеоклиматических параметров; палеотемпературное моделирование, учитывающее параметры седиментационной истории и истории теплофизических свойств осадочной толщи.

**Результаты.** Выполнена географическая и геохронологическая увязка данных о вековом ходе температур на поверхности Земли и динамики мощности неоплейстоценовой мерзлоты северной палеоклиматической зоны Западной Сибири; определен «арктический» вековой ход температур на поверхности Земли начиная с юрского времени и вековой ход мощностей мерзлых пород в четвертичное время. Установлено, что учет векового хода температур и толщи мерзлоты не позволяет адекватно восстановить термическую историю материнских отложений. Рекомендуется при определении ресурсов углеводородов объемно-генетическим методом на землях Арктического региона Западной Сибири применять «арктический» вековой ход температур и учитывать динамику толщи неоплейстоценовой мерзлоты мощностью 300–600 метров. В противном случае расчетные ресурсы углеводородов могут быть занижены на 40 %.

### Ключевые слова:

Палеоклимат, геотермический режим, баженовские отложения, ресурсы углеводородов, п-ов Ямал.

### Введение

Регионы Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции имеют уникальные палеоклиматические особенности [1–5]: 1) мезозойско-кайнозойский вековой ход температур, индивидуальный для региональных палеоклиматических зон; 2) разномасштабные процессы формирования и деградации неоплейстоценовых толщ вечномерзлых пород; 3) зонально и периодические формирующиеся позднечетвертичные ледниковые покровы. В плейстоцене произошло глобальное событие – резкое похолодание климата. Это могло привести к снижению, существенной нестационарности температурного поля во всем осадочном разрезе [6].

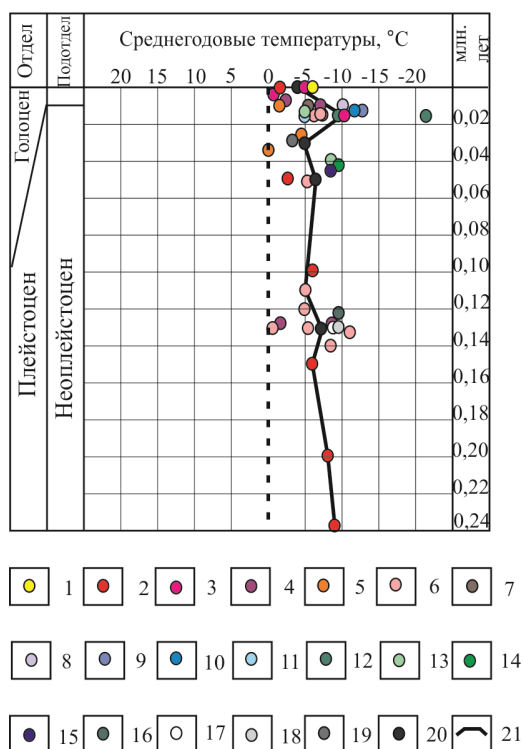
Количественная оценка перспектив нефтегазоносности – оценка плотности ресурсов углеводородов и районирование регионов, крупных территорий и зон нефтегазонакопления – выполняется объемно-генетическим методом (бассейновое моделирование). Количество генерированных углеводородов (УВ) рассчитывается на основе реконструкции геотемпературного режима нефтематеринских отложений [7, 8].

Накоплен значительный исследовательский материал, показывающий влияние факторов пале-

оклимата на температурный режим осадочно-вулканогенных и магматических комплексов [9–12]. Опубликованы работы [13 и др.], доказывающие значимость мезозойско-кайнозойского векового хода температур земной поверхности на термическую историю непосредственно нефтематеринских отложений.

Ученые и специалисты, занимающиеся моделированием термической истории осадочных бассейнов Западной Сибири и других нефтегазоносных провинций, учитывают вековой ход температур на поверхности Земли [14–16 и др.]. Этот ход температур можно условно назвать «стандартным», так как применяется единообразно для разных региональных палеоклиматических зон Сибири.

В работах [17, 18] показано, что при определении ресурсов УВ объемно-генетическим методом на землях юго-востока Западной Сибири предпочтительно применять региональный («местный» [17]) вековой ход температур на земной поверхности, построенный для южной палеоклиматической зоны Западной Сибири. Это позволяет более корректно учесть историю главной фазы нефтеобразования (ГФН) материнских баженовских и тогурских отложений и, как следствие, не завышать/занижать расчетные ресурсы.



**Рис. 1.** Вековой ход температуры на поверхности Земли северной палеоклиматической зоны Западной Сибири в неоплейстоцене и голоцене: 1–19 значения среднегодовых температур: 1 – по В.В. Баулину [21], 2 – по Н.Л. Добрецову и др. [22], 3 – по А.П. Деревянко [23], 4 – по А.В. Гаврилову [24], 5 – по А.А. Шарбатяну [25], 6 – по В.В. Баулину [26], 7 – по Н.А. Шполянкой [27], 8 – по И.Д. Данилову и др. [28], 9 – по В.С. Шейнкману и В.Н. Плюснину [29], 10 – по С.А. Гускову и В.С. Волковой [30], 11 – по В.И. Астахову и Д.В. Назарову [31], 12 – по В.С. Волковой и И.В. Михайлову [32], 13 – по В.И. Астахову [33], 14 – по В.В. Орловой [34], 15 – по В.С. Волковой [35], 16 – по В.А. Сарана [36], 17 – по А.В. Павлову [37], 18 – по А.Э. Конторовичу и др. [7], 19 – по Ю.К. Васильчук и др. [38]; 20 – осредненные значения; 21 – кусочно-линейная аппроксимация среднегодовых температур

**Fig. 1.** Century course of temperature on the Earth's surface of the northern paleoclimate zone of Western Siberia in Pleistocene and Holocene: 1–19 the mean annual temperature: 1 – after V.V. Baulin [21], 2 – N.L. Dobretsov et al. [22], 3 – A.P. Derevyanko [23], 4 – A.V. Gavrilov [24], 5 – A.A. Sharbatyan [25], 6 – V.V. Baulin [26], 7 – N.A. Shpolyanskaya [27], 8 – I.D. Danilov et al. [28], 9 – V.S. Sheynkman and V.M. Plyusnin [29], 10 – S.A. Guskov and V.S. Volkova [30], 11 – V.I. Astakhov and D.V. Nazarov [31], 12 – V.S. Volkova and I.V. Михайлова [32], 13 – V.I. Astakhov [33], 14 – V.V. Orlova [34], 15 – V.S. Volkova [35], 16 – V.A. Sarana [36], 17 – A.V. Pavlov [37], 18 – A.E. Kontorovich et al. [7], 19 – Yu.K. Vasilchuk et al. [38]; 20 are the average values; 21 are the piecewise and linear approximation of average annual temperatures

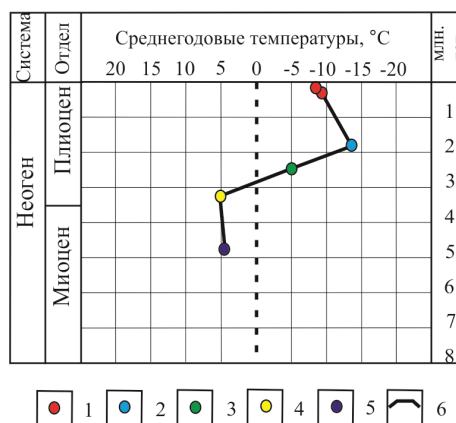
Установлена необходимость учета неоплейстоценовой мерзлоты мощностью порядка 300 метров и применения «местного» (регионального) векового хода температур на земной поверхности для адекватного восстановления термической истории баженов-

ских отложений на землях юго-востока Западной Сибири [19, 20]. Показано, что неучет толщ вечной мерзлоты и палеоклиматического хода температур может приводить к существенным ошибкам в расчете ресурсов УВ объемно-генетическим методом.

Цель настоящих исследований – обобщить известные данные о мезозойско-кайнозойском климате северной части Западной Сибири и определить влияние 1-го и 2-го факторов палеоклимата – арктического мезозойско-кайнозойского векового хода температур на земной поверхности и неоплейстоценовой толщ мерзлоты на реконструкции геотермического режима и оценку степени реализации генерационного потенциала материнских баженовских отложений Арктического региона Западной Сибири.

#### Построение арктического векового хода палеотемператур на поверхности Земли (северная палеоклиматическая зона Западной Сибири)

Арктический вековой ход температур земной поверхности (северные широты 66°–74°) построен на основе обобщения (сводки по 28-ми опубликованным источникам) экспериментальных определений и палеоклиматических реконструкций для севера Западно-Сибирской низменности, начиная с юрского времени – времени осадконакопления нефтематеринских свит. Для построения приняты осредненные значения среднегодовых температур на земной поверхности, указанные авторами источников в интервалах  $\pm(1...2)^\circ\text{C}$ .

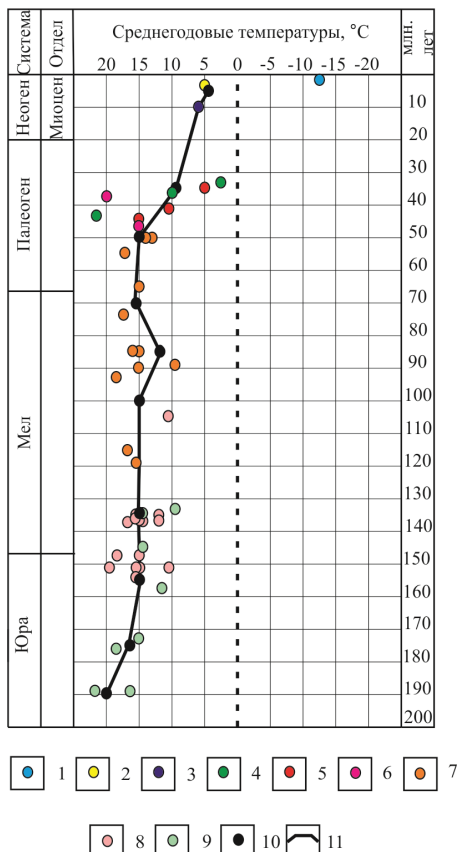


**Рис. 2.** Вековой ход температуры на поверхности Земли северной палеоклиматической зоны Западной Сибири в верхнем миоцене и плиоцене: 1–4 значения среднегодовых температур: 1 – по Н.Л. Добрецову и др. [22], 2 – по А.А. Чеховскому [39], 3 – по А.А. Архангелову и Г.Г. Карташовой [40], 4 – по И.М. Лебедевой и др. [41]; 5 – осредненные значения; 6 – кусочно-линейная аппроксимация среднегодовых температур

**Fig. 2.** Century course of temperature on the Earth's surface of the northern paleoclimate zone of Western Siberia in the upper Miocene and Pliocene: 1–4 are the mean annual temperature: 1 – after N.L. Dobretsov and et al. [22], 2 – A.L. Chekhovskiy [39], 3 – A.A. Arkhangelov and G.G. Kartashova [40], 4 – I.M. Lebedeva et al. [41]; 5 are the average values; 6 are the piecewise and linear approximation of average annual temperatures

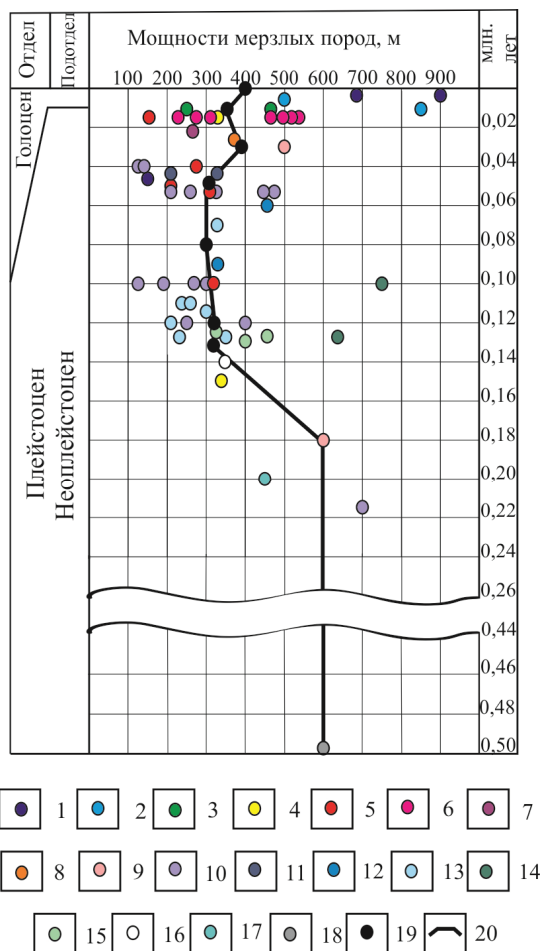


На рис. 1 изображен ход среднегодовых температур верхнего неоплейстоцена и голоцена, на рис. 2 – ход среднегодовых температур верхнего миоцена и плиоцена, на рис. 3 – ход среднегодовых температур юры, мела, палеогена и миоцена. Так построен арктический (региональный, «местный» для северной палеоклиматической зоны Западной Сибири) вековой ход температур на поверхности Земли, начиная с юрского времени – времени осадконакопления китербютской (тогурской) и баженовской нефтематеринских свит.



**Рис. 3.** Вековой ход температуры на поверхности Земли северной палеоклиматической зоны Западной Сибири в юре, мелу, палеогене и миоцене: 1–9 значения среднегодовых температур: 1 – по А.А. Чеховскому [39], 2 – по И.М. Лебедевой и др. [41], 3 – по В.С. Волковой [35], 4 – по В.С. Волковой [42], 5 – по И.А. Кульковой и В.С. Волковой [43], 6 – по В.С. Волковой и О.Б. Кузминой [44], 7 – по А.В. Гольберту и др. [45], 8 – по А.В. Гольберту и др. [46], 9 – по Т.С. Берлин и др. [47]; 10 – осредненные значения; 11 – кусочно-линейная аппроксимация среднегодовых температур

**Fig. 3.** Century course of temperature on the Earth's surface of the northern paleoclimate zone of Western Siberia in the Jurassic, Cretaceous, Paleogene and Miocene: 1–9 are the mean annual temperature: 1 – afetr A.L. Chekhovskiy [39], 2 – I.M. Lebedeva [41], 3 – V.S. Volkova [35], 4 – V.S. Volkova [42], 5 – I.A. Kulkova and V.S. Volkova [43], 6 – V.S. Volkova and O.B. Kuzmina [44], 7 – A.V. Golbert et al. [45], 8 – A.V. Golbert et al. [46], 9 – T.S. Berlin et al. [47]; 10 are the average values; 11 are the piecewise and linear approximation of average annual temperatures



**Рис. 4.** Вековой ход мощностей вечномерзлых пород северной палеоклиматической зоны Западной Сибири в неоплейстоцене и голоцене: 1–19 значение мощности мерзлых пород: 1 – по А.В. Гаврилову [48], 2 – по Э.Д. Ершову [49], 3 – по А.А. Шарбатян [25], 4 – по Н.А. Шполянской [27], 5 – по А.В. Груздову и др. [50]; 6 – по А.П. Деревянко [23]; 7 – по И.П. Герасимову [51], 8 – по И.Д. Даниловой и др. [28], 9 – по С.М. Фотиеву [52], 10 – по В.В. Баулину [26], 11 – по Ю.Б. Баду [53], 12 – по С.О. Разумову и др. [54], 13 – по В.Т. Трофимову [55], 14 – по Н.Н. Романовскому и В.Е. Тумскому [56], 15 – по В.В. Баулину [57], 16 – по А.А. Свиточ [58], 17 – по А.И. Попову [59], 18 – по С.М. Фотиеву [60], 19 – по В.Т. Трофимову [61]; 20 – осредненные значения; 21 – кусочно-линейная аппроксимация векового хода мощностей вечномерзлых пород

**Fig. 4.** Century course of capacities of permafrost rocks of the northern paleoclimate zone of Western Siberia in Pleistocene and Holocene: 1–19 are the capacity value of frozen rocks: 1 – after A.V. Gavrillov [48], 2 – E.D. Ershova [49], 3 – A.A. Sharbatian, 4 – N.A. Shpolyanskaya [27], 5 – A.V. Gruzdov et al. [50]; 6 – A.P. Derevyanko [23]; 7 – I.P. Gerasimov [51], 8 – I.D. Danilov et al. [28], 9 – S.M. Fotiev [52], 10 – V.V. Baulin [26], 11 – Yu.B. Badu [53], 12 – S.O. Razumov et al. [54], 13 – V.T. Trofimov [55], 14 – N.N. Romanovsky and V.E. Tumskoy [56], 15 – V.V. Baulin [57], 16 – A.A. Svitoch [58], 17 – A.I. Popov [59], 18 – S.M. Fotiev [60], 19 – V.T. Trofimov [61]; 20 are the average values; 21 are the piecewise and linear approximation of the century course of capacities of permafrost rocks

### Построение векового хода мощностей мерзлых пород в неоплейстоцене и голоцене (северная палеоклиматическая зона Западной Сибири)

Вековой ход мощностей мерзлых пород (северные широты 66°–74°) построен на основе обобщения (сводки по 19-ти опубликованным источникам) экспериментальных определений и палеокриологических реконструкций для севера Западно-Сибирской низменности, начиная с развития криогенных процессов в неоплейстоцене – 0,5 млн лет назад.

На рис. 4 изображен вековой ход мощностей мерзлых пород в четвертичное время для северной палеоклиматической зоны Западной Сибири, начиная с развития криогенных процессов в неоплейстоцене.

### Краткая характеристика объекта исследований

Приводятся результаты моделирования палеогеотемпературных условий нефтематеринских баженовских отложений, выполненного для осадочного разреза глубокой скважины Арктическая 11 (рис. 5, табл. 1). Скважина расположена в пределах Ямальского района Ямало-Ненецкого автономного округа.

Осадочный мезозойско-кайнозойский чехол территории исследования начинает формироваться в ранней юре [62]. Во времена бореальных трансгрессий формируется глинистая толща китербютская ( $J_1kt$ ), обладающая нефтематеринским потенциалом. К концу волжского века трансгрессия моря расширилась, идет накопление баженовской свиты ( $J_3+K_2bg$ ), обогащенной органическим веществом [63].

Юрские комплексы Ямальской НГО (включая баженовскую сланцевую формацию) – один из главных объектов потенциального прироста запасов УВ Западно-Сибирской НПП [64].

Согласно фациальному районированию Западно-Сибирской плиты, исследуемая скважина Арктическая 11 расположена в пределах Ямальской фациальной зоны Ямало-Гыданской фациальной области. Посвитная разбивка от подошвы осадочного чехла до верхнего мела, включая березовскую свиту, принята нами по данным ИНГТ СО РАН (2015 г.). Расчленение ниже-среднепалеогеновых свит, от ганькинской до ирбитской, заимствовано из материалов ВСЕГЕИ [65]. Вышележащие толщи расчленены на основе работ [35 и др.].

Генерационный потенциал баженовских отложений в разрезе Южного Ямала обусловлен содержанием рассеянного органического вещества сапропелево-гумусового типа, достаточно высоким содержанием Сорг – от 1 до 2 % (по данным ИНГТ СО РАН, 2016). По отражательной способности витринита ( $R_{vi}^0=0,96$  %), в пределах Арктической площади, баженовская свита находится в конце главной зоны нефтеобразования (ГЗН).

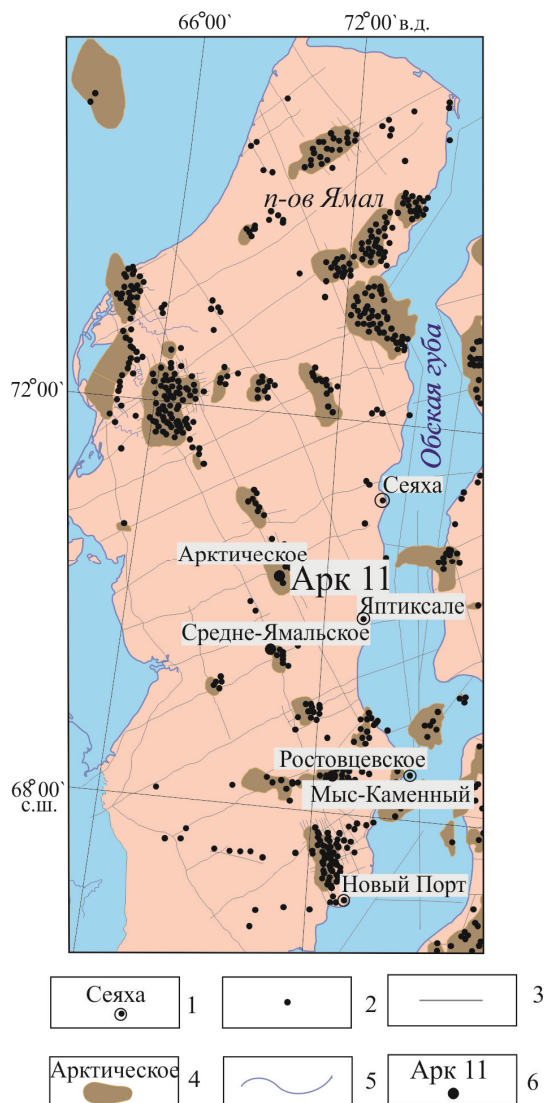
**Таблица 1.** Характеристика разреза скважины Арктическая 11  
**Table 1.** Characteristic of a section of the well Arctic 11

Характеристики/Characteristic	Значение/Value
Забой, м Bottom, m	3624
Отложения на забое (свита) Sediments at the bottom (suite)	Левинская ( $J_1lv$ ) Levinskaya
Кровля баженовской свиты ( $J_3+K_2bg$ ), м Roof of Bazhenov suite ( $J_3+K_{2bg}$ ), m	2792
Мощность баженовской свиты, м Capacity of Bazhenov suite, m	16
Мощность палеогеновых отложений, м Capacity of Paleogene of deposits, m	690
Мощность неоген-четвертичных отложений, м Capacity of the Neogene-Quaternary deposits, m	418
Размыв палеоген-неогеновых отложений (14,5–18,5 млн лет назад), м Scour of the Paleogene-Neogene deposits (14,5–18,5 million years ago), m	535
Размыв неогеновых отложений (4,1–5,4 млн лет назад), м Scour of the Neogene deposits (4,1–5,4 million years ago), m	113
Мощность вечномерзлых пород в плиоцен-квартере (0,52–0,18 млн лет назад), м Capacity of permafrost rocks in the Pliocene-quarter (0,52–0,18 million years ago), m	600
Мощность вечномерзлых пород в плиоцен-квартере (0,18–0,0 млн лет назад), м Capacity of permafrost rocks in the Pliocene-quarter (0,18–0,0 million years ago), m	300
Результаты испытаний верхнеюрских-нижнемеловых пластов Test results of the Upper Jurassic – Lower Cretaceous layers	Не испытывались Not tested
Измеренные пластовые температуры (свита; глубина замера; температура, °C) Measured reservoir temperatures (suite; measurement depth; temperature, °C)	Левинская/Levinskaya 3533 м (m); 125 Левинская/Levinskaya 3560 м (m); 126
Измеренные температуры по отражательной способности витринита (глубина отбора; $R_{vi}^0$ ; температура, °C) Measured temperatures by reflective ability of a vitrinite (selection depth; $R_{vi}^0$ ; temperature, °C)	2000 м (m); (0,65); 100 2500 м (m); (0,80); 120

### Методика исследования

Восстановление термической истории материнских баженовских отложений выполняется на основе палеотектонических и палеотемпературных реконструкций. Применен *метод палеотемпературного моделирования*, основанный на численном решении уравнения теплопроводности горизонтально-слоистого твердого тела с подвижной верхней границей. В математическую модель непосредственно включены климатический вековой ход температур на земной поверхности, как краевое усло-

вие, и палеотемпературы, определенные по ОСВ как «наблюденные». В модели палеотектонические реконструкции непосредственно сопряжены с палеотемпературными реконструкциями [20, 66, 67].



**Рис. 5.** Обзорная схема территории исследований: 1 – населенный пункт и его название; 2 – поисково-разведочная скважина; 3 – сейсмический профиль работ; 4 – контур месторождения и его название; 5 – гидрография и береговая линия; 6 – моделируемая скважина Арктическая 11 и ее индекс

**Fig. 5.** Review scheme of the studied area: 1 is the settlement and its name; 2 is the exploration well; 3 is the seismic profile of works; 4 is the contour of the field and its name; 5 is the hydrography and coastline; 6 is the the modelled well Arctic 11 and its index

Параметризация осадочного разреза, вскрытого скважиной, определяющая параметры седиментационной и теплофизической модели, принимается в соответствии с указанной выше стратификацией (табл. 1 и 2). Возраст пород и соответствующие вековые интервалы шкалы геологического времени [68], увязанные с периодами геохроноло-

гической шкалы Стратиграфического кодекса (1992 г.), определяют время и скорость осадконакопления.

Формирование, существование, деградация толщи вечномерзлых пород учитываются как динамичный литолого-стратиграфический комплекс (рис. 4), обладающий аномально высокими значениями теплопроводности  $\lambda$  и температуропроводности  $a$ .

Формализованный учет толщи мерзлоты осуществляется, начиная с 0,52 млн лет назад, «мгновенной» (по меркам геологического времени, за 0,3+3,0 тыс. лет) заменой «нормальных» осадочных отложений 600-метровой толщиной мерзлых пород со своими теплофизическими характеристиками – теплопроводность, температуропроводность [69]. Затем эта толща мерзлых пород в течение 334 тыс. лет перекрывает осадочный чехол. Далее толща мерзлых пород «мгновенно» (0,3+0,15+0,15 тыс. лет) деградирует в объеме 300 м. И наконец, вечномерзлые породы существуют в объеме 300 м до настоящего времени, т. е. последние 182 тыс. лет.

Первое краевое условие модели определяется температурой поверхности осадконакопления, т. е. палеоклиматом (солярным источником тепла), и задается в виде кусочно-линейной функции «арктического» векового хода температур на поверхности Земли (рис. 1–3).

Схема расчета палеотемператур материнской свиты состоит из двух этапов. На первом по распределению «наблюденных» температур  $T_i$  в скважине рассчитывается тепловой поток  $q$  через поверхность основания осадочного чехла, т. е. решается обратная задача геотермии. На втором этапе с известным значением  $q$  решаются прямые задачи геотермии – непосредственно рассчитываются температуры  $U$  в заданных точках осадочной толщи  $Z$  (в материнской свите) в заданные моменты геологического времени  $t$ .

Для решения обратной задачи геотермии используем в качестве «наблюденных» как измерения пластовых температур, полученные при испытаниях скважин, так и палеотемпературы, определенные по ОСВ (табл. 1).

Решение прямых задач геотермии выполняется на 50 ключевых моментах геологического времени, соответствующих временам начала/завершения формирования каждой свиты, перекрывающей материнскую баженовскую, а также точкам «излома» векового хода температур на земной поверхности и «переломным» моментам формирования и деградации неоплейстоценовой мерзлоты.

Модель процессов нефтегазообразования [70] позволяет по геотемпературному критерию выполнить выделение очагов интенсивного образования нефти из РОВ материнских отложений.

Количественное определение влияния палеоклимата на расчетный геотермический режим и на оценку степени реализации генерационного потенциала материнских отложений выполняется на ос-

**Таблица 2.** Параметрическое описание седиментационной истории и теплофизических свойств осадочной толщи, вскрытой скважиной Арктическая 11

**Table 2.** Parametrical description of sedimentation history and thermal properties of sedimentary strata opened with the well Arctic 11

Свита, толща (стратиграфия) Suite, strata (stratigraphy)	Мощность, м Thickness, m	Возраст, млн лет назад Age, million years ago	Время накопле- ния, млн лет Accumulation time, million years	Плотность, г/см <sup>3</sup> Density, g/cm <sup>3</sup>	Теплопровод- ность, Вт/м·град Thermal conducti- vity, W/m·deg	Температуропо- водность, м <sup>2</sup> /с Thermal diffusivi- ty, m <sup>2</sup> /s	Тепловыделение, Вт/м <sup>3</sup> Heat generation W/m <sup>3</sup>
Квартер+плиоцен Q-N <sub>2</sub> Quarter+pliocene	–	0,1820–0,00	0,1820	–	–	–	–
	300	0,18215–0,1820	0,00015	2,10	2,09	1,05e-006	1,22e-006
	300	0,1823–0,18215	0,00015	2,10	1,3	7e-007	1,22e-006
	–600	0,1826–0,1823	0,0003	2,10	1,3	7e-007	1,22e-006
	–	0,5167–0,1826	0,3341	–	–	–	–
	600	0,5197–0,5167	0,003	2,10	2,09	1,05e-006	1,22e-006
	–600	0,520–0,5197	0,0003	2,10	1,3	7e-007	1,22e-006
	280	4,1–0,520	3,58	2,04	1,29	6,5e-007	1,1e-006
N <sub>1-2</sub>	–113	4,1–5,4	1,3	2,08	1,33	7e-007	1,2e-006
Новопортовская N <sub>1-2</sub> /Novoportovskaya	50	5,4–8,4	3	2,08	1,33	7e-007	1,2e-006
Таволжинская N <sub>1</sub> /Tavolzhinskaya	25	8,4–12,5	4,1	2,08	1,33	7e-007	1,2e-006
Бищеульская bsch N <sub>1</sub> /Bishcheulskaya	38	12,5–14,5	2	2,08	1,33	7e-007	1,2e-006
N <sub>1</sub>	–535	14,5–18,5	4	2,08	1,33	7e-007	1,2e-006
Абросимовская N <sub>1</sub> /Abrosimovskaya	25	18,5–23,0	4,5	2,08	1,33	7e-007	1,2e-006
Туртасская tur P <sub>3</sub> /Turtasskaya	90	23,0–28,0	5	2,08	1,33	7e-007	1,2e-006
Новомихайловская nvm P <sub>3</sub> /Novomikhaylovskaya	70	28,0–30,0	2	2,08	1,33	7e-007	1,2e-006
Атлымская atl P <sub>3</sub> /Atlymskaya	100	30,0–34,0	4	2,08	1,33	7e-007	1,2e-006
Тавдинская tv P <sub>2</sub> /Tavdinskaya	150	34,0–42,6	8,6	2,08	1,33	7e-007	1,2e-006
Нюрольская nl P <sub>2</sub> /Nyurolskaya	100	42,6–50,4	7,8	2,08	1,33	7e-007	1,2e-006
Ирбитская P <sub>2</sub> ir/Irbitskaya	20	50,4–55,0	4,6	2,09	1,35	7e-007	1,2e-006
Серовская P <sub>2</sub> sr/Serovskaya	43	55,0–58,0	3	2,09	1,35	7e-007	1,2e-006
Тибейсалинская P <sub>2</sub> tb/Tibeysalinskaya	120	58,0–63,7	5,7	2,09	1,35	7e-007	1,2e-006
Ганькинская K <sub>2</sub> +Pgn/Gankinskaya	40	63,7–73,0	9,3	2,11	1,37	7e-007	1,25e-006
Березовская K <sub>2</sub> b/Berezovskaya	136	73,0–89,0	16	2,15	1,41	7,5e-007	1,25e-006
Кузнецовская K <sub>2</sub> kz/Kuznetsovskaya	31	89,0–92,0	3	2,18	1,43	8e-007	1,25e-006
Марресалинская K <sub>2</sub> -K <sub>1</sub> mr/Marresalinskaya	550	92,0–102,0	10	2,26	1,49	8e-007	1,25e-006
Яронгская K <sub>2</sub> jar/Yarongskaya	690	102,0–108,5	6,5	2,39	1,6	8e-007	1,25e-006
Танопчинская K <sub>2</sub> tn/Tanopchinskaya	353	108,5–133,2	24,7	2,44	1,62	8e-007	1,25e-006
Ахская K <sub>2</sub> ah/Akhskaya	529	133,2–142,7	9,5	2,44	1,64	8e-007	1,25e-006
Баженовская J <sub>3</sub> +K <sub>2</sub> bg/Bazhenovskaya	16	142,7–149,3	6,6	2,42	1,62	8e-007	1,3e-006
Нурминская J <sub>2</sub> nr/Nurminskaya	65	149,3–161,7	12,4	2,42	1,62	8e-007	1,3e-006
Мальшевская J <sub>2</sub> ml/Malyshevskaya	95	161,7–171,0	9,3	2,45	1,63	8e-007	1,3e-006
Леонтьевская J <sub>2</sub> ln/Leontyevskaya	130	171,0–173,0	2	2,47	1,65	8e-007	1,3e-006
Вымская J <sub>2</sub> vm/Vymskaya	127	173,0–175,0	2	2,45	1,63	8e-007	1,3e-006
Лайдинская J <sub>2</sub> ld/Laydinskaya	75	175,0–177,0	2	2,47	1,65	8e-007	1,3e-006
Надояхская J <sub>1</sub> +J <sub>2</sub> nd/Nadoyakhskaya	95	177,0–182,5	5,5	2,45	1,63	8e-007	1,3e-006
Китербютская (тогурская) J <sub>2</sub> kt/Kiterbyutskaya (togurskaya)	39	182,5–184,0	1,5	2,47	1,65	8e-007	1,3e-006
Шараповская J <sub>1</sub> shr/Sharapovskaya	50	184,0–186,0	2	2,45	1,63	8e-007	1,3e-006
Левинская J <sub>1</sub> lv/Levinskaya	140	186,0–186,7	0,7	2,47	1,65	8e-007	1,3e-006
Мощность разреза, м/Section thickness, m	3624	–	–	–	–	–	–

Примечание. Коричневой заливкой показаны времена накопления нефтематеринских китербютской (тогурской) и баженовской свит и их параметрическое описание. Серой заливкой показан размыв палеоген-неогеновых отложений. Синей заливкой показаны времена «мгновенного» формирования и «мгновенной» деградации толщи неоплейстоценовой мерзлоты. Темно-синей заливкой показано время существования толщи мерзлоты.

Note. Accumulation time of Kiterbyutskaya (Togurskaya) and Bazhenov petromaternal suites and their parametric description are filled with brown. Erosion of the Paleogene-Neogene deposits is filled with grey. Times of «instant» formation and «instant» degradation of the Neo Pleistocene permafrost thickness are filled with blue. Time of existence of permafrost thickness is filled with dark blue.



нове анализа variability результатов четырех вариантов палеотемпературных реконструкций: *вариант 1* – без учета факторов палеоклимата; *вариант 2* – с учетом «стандартного» векового хода температур, без учета неоплейстоценовой мерзлоты; *вариант 3* – с учетом «арктического» векового хода температур, без учета неоплейстоценовой мерзлоты; *вариант 4* – с учетом «арктического» векового хода температур, динамики неоплейстоценовой мерзлоты.

Основным критерием адекватности и предпочтительности результатов из четырех вариантов выступает оптимальная согласованность максимума расчетных геотемператур с «наблюденными» температурами «максимального палеотермометра» – с температурами, определенными по ОСВ. В той же степени важна оптимальная согласованность («невязка») расчетных геотемператур и с «наблюденными» пластовыми температурами. Оптимальная «невязка» – это средняя квадратичная разность расчетных и наблюдаемых значений, равная погрешности «наблюдений» [71]. Эта погрешность порядка  $\pm 2^\circ\text{C}$ .

Для сопоставительной оценки результатов вариантов моделирования для каждого варианта реконструкции термической истории материнской свиты рассчитывается интегральный показатель  $R$  [17, 19, 20, 72]:

$$R = \sum_{i=1}^n (U_i t_i \cdot 10^{-2}),$$

где  $U_i$  – расчетная геотемпература очага генерации нефти,  $^\circ\text{C}$ ;  $t_i$  – интервальное время действия очага – нахождения материнских отложений в ГЗН, млн лет; количество временных интервалов  $n$  определено числом интервалов геологического времени нахождения материнских отложений в ГЗН.

### Влияние палеоклимата на расчетный геотермический режим и оценку степени реализации генерационного потенциала баженовских отложений Ямала

Анализ расчетных значений плотности теплового потока  $q$  из основания осадочного разреза (табл. 3) показывает следующее. В вариантах 1, 3 и 4 тепловой поток увеличивается на 1,7–2,3–4,3 мВт/м<sup>2</sup> по отношению к расчетному значению теплового потока *варианта 2* – 54,1 мВт/м<sup>2</sup>.

Анализ термической истории баженовской свиты (табл. 3) в разрезе скважины Арктическая 11 свидетельствует о том, что в *варианте 1* (без учета палеоклимата, т. е. без учета векового хода температур и неоплейстоценовой мерзлоты) материнская свита «пережила» самую короткую и самую «холодную» главную фазу нефтеобразования (ГФН).

В *вариантах 2, 3 и 4* (с учетом палеоклимата) баженовская свита имеет «богатые» термические истории ГФН. Главные фазы нефтеобразования этих вариантов имеют разные значения абсолютных максимумов палеотемператур, а также содержат относительные максимумы геотемператур в геологическом прошлом.

В *варианте 4* присутствие толщи вечномерзлых пород, обладающей высокими значениями теплопроводности  $\lambda$  и температуропроводности  $a$ , приводит к увеличению расчетных значений плотности теплового потока  $q$ , что, в свою очередь, увеличивает расчетные геотемпературы материнских отложений.

Сопоставление расчетных и «наблюденных» геотемператур в скважине приведено в табл. 4. Так как «наблюденные» (измеренные) температуры (включая определенные по ОСВ) имеют погрешность порядка  $\pm 2^\circ\text{C}$ , то *варианты 1 и 2* решений

**Таблица 3.** Расчетные геотемпературы баженовской свиты в разрезе скважины Арктическая 11

**Table 3.** Calculated geotemperatures of the Bazhenov suite in a section of the well Arctic 11

Время, млн лет назад Time, million years ago	Вековой ход Century course, $^\circ\text{C}$		Глубина положения баженовской свиты, м Bazhenov suite basement depth, m	Геотемпературы баженовской свиты, $^\circ\text{C}$ Bazhenov suite geotemperatures, $^\circ\text{C}$			
	«Арктический» «Arctic»	«Стандартный» «Standard»		Вариант/Reconstruction			
				1	2	3	4
0	-4	0	2800	107	104	101	98
0,015	-10	-2	2798	107	103	101	97
0,030	-5	-4	2798	107	102	100	97
0,050	-7	-1	2797	107	103	100	96
0,070	-4	-4	2795	107	103	100	96
0,110	-5	-4	2792	107	103	100	95
0,130	-7	-1	2791	107	103	99	94
0,150	-6	-4	2790	107	104	99	94
0,1820	-7	-6	2788	107	104	99	94
0,18215	-7	-6	2788	107	103	98	105
0,1823	-7	-7	2788	107	103	98	116
0,1826	-7	-7	2788	107	103	98	116
0,200	-8	-7	2786	106	104	98	94
0,240	-9	-10	2784	106	105	98	94
0,5167	-10	-6	2765	106	105	96	100
0,5197	-11	-5	2765	106	105	96	115
0,520	-11	-5	2764	106	105	96	100

Окончание табл. 3

Table 3

Время, млн лет назад Time, million years ago	Вековой ход Century course, °C		Глубина положения баженовской свиты, м Bazhenov suite basement depth, m	Геотемпературы баженовской свиты, °C Bazhenov suite geotemperatures, °C			
	«Арктический» «Arctic»	«Стандартный» «Standard»		Вариант/Reconstruction			
				1	2	3	4
1,8	-13	-3	2677	102	102	93	96
3,2	+5	-2	2581	97	98	103	107
4,1	+4	+3	2520	96	97	102	105
4,9	+4	+5	2590	98	100	104	107
5,4	+4	+5	2633	100	102	105	109
8,4	+5	+9	2583	98	101	104	108
10	+6	+9	2573	97	102	105	108
12,5	+6	+10	2558	96	102	104	107
14,5	+6	+10	2520	97	103	104	107
18,5	+7	+11	3055	119	125	128	132
23	+8	+4	3030	118	119	127	131
28	+8	+8	2940	114	118	123	127
30	+9	+10	2870	111	116	120	124
34	+9	+11	2770	106	115	116	120
35	+9	+14	2752	105	116	116	119
42,6	+12	+20	2620	100	117	113	116
50	+15	+21	2525	95	114	112	114
50,4	+15	+21	2520	95	114	111	114
55	+15	+21	2500	94	112	110	114
58	+16	+20	2457	92	110	109	112
63,7	+16	+19	2337	87	104	104	107
70	+16	+19	2310	86	103	103	106
73	+15	+19	2297	85	102	101	104
85	+13	+19	2195	81	98	95	97
89	+13	+20	2161	79	97	94	97
92	+13	+20	2130	78	96	93	95
100	+15	+22	1690	61	80	76	78
102	+15	+22	1580	56	76	72	74
108,5	+15	+22	890	31	52	47	48
120	+16	+22	726	26	46	42	43
134	+15	+21	492	17	38	32	33
135	+15	+22	437	15	36	30	31
142,5	+15	+22	19	1	23	16	16
Расчетный тепловой поток из основания, мВт/м <sup>2</sup> /Design basement heat flow, mW/m <sup>2</sup>				55,7	54,1	56,4	58,4

Примечание. Вариант 1 – без учета факторов палеоклимата. Вариант 2 – с учетом «стандартного» векового хода температур, без учета неоплейстоценовой мерзлоты. Вариант 3 – с учетом «арктического» векового хода температур, без учета неоплейстоценовой мерзлоты. Вариант 4 – с учетом «арктического» векового хода температур и динамики неоплейстоценовой мерзлоты. Заливкой показаны температуры главной зоны нефтеобразования (ГЗН), темной заливкой – абсолютный палеотемпературный максимум ГЗН, серой – относительные палеотемпературные максимумы ГЗН.

Note. Reconstruction 1 – excluding paleoclimate factors. Reconstruction 2 – considering «standard» century course of temperatures, without Neo Pleistocene permafrost. Reconstruction 3 – considering «arctic» century course of temperatures, without Neo Pleistocene permafrost. Reconstruction 4 – considering «arctic» century course of temperatures and dynamics of Neo Pleistocene permafrost. Shaded areas indicate temperatures of the major oil generation zone (OGZ) [7], dark-colour shading indicates absolute OGZ paleotemperature maxima, grey shading – relative OGZ paleotemperature maxima.

нельзя признать приемлемыми. В этих вариантах среднеквадратическое отклонение в 2 раза больше оптимальных значений, а разница с ОСВ достигает 5...11 °C.

В случае учета палеоклимата (варианты 3 и 4) как «невязки» для пластовых температур, так и сходимость с «максимальным палеотермометром» оптимальны и примерно равноценны. Таким образом, сопоставление измеренных и расчетных геотемператур позволяет заключить, что по критерию

«невязки» результаты вариантов 3 и 4 приемлемы и равноценны. Учет «арктического» векового хода температур и неоплейстоценовой мерзлоты позволяет достаточно корректно восстановить термическую историю баженовских отложений.

Расчет интегрального показателя R (табл. 5) – экспресс-расчет плотности ресурсов генерированных баженовских нефтей – дает максимальное значение для приемлемого варианта 4 (102 усл. ед.). В этом варианте, помимо учета «арктического» ве-

**Таблица 4.** Сопоставление измеренных и расчетных геотемператур в скважине Арктическая 11

**Table 4.** Comparison of the measured and calculated geotemperatures in the well Arctic 11

Глубина, м Depth, m	Измеренные температуры, °C Measured («observed») temperatures, °C	Способ измерения Measurement method	Вариант/Reconstruction							
			1		2		3		4	
			Значение Value	Разница Discrepancy	Значение Value	Разница Discrepancy	Значение Value	Разница Discrepancy	Значение Value	Разница Discrepancy
2000	100	по OCB on OSV	91	-9	97	-3	99	-1	102	+2
2500	120		109	-11	115	-5	117	-3	121	+1
3533	125	пластовые in-place	133	+8	128	+3	126	+1	124	-1
3560	126		133	+7	129	+3	127	+1	125	-1
Среднеквадратическое отклонение («невязка»), °C Mean squared error («true error»), °C			±9		±4		±2		±1	

кового хода температур на дневной поверхности, учтена динамика неоплейстоценовой мерзлоты. Указанное максимальное значение примерно то же, что и в *варианте 3* (99 усл. ед.), в котором учтен только один фактор палеоклимата – вековой ход температур, и он на 40 % больше, чем в *варианте 1* (72 усл. ед.), в котором не учтен ни один фактор палеоклимата.

**Таблица 5.** Расчет интегрального показателя R, дающего экспресс-оценку плотности ресурсов генерированных баженовских нефтей (скважина Арктическая 11)

**Table 5.** Calculation of the integrated indicator R giving the express assessment of density of resources of the generated Bazhenov oil (well Arctic 11)

Вариант палеотемпературного моделирования Scenario of paleo temperature modeling	Экспресс-расчет ресурсов (R), усл. ед. Express calculation of resources (R), cu.	Количество расчетных временных интервалов (n) Number of calculated time intervals (n)	Период работы палеоочага, млн лет назад Period of paleo kitchen, m years ago	Время работы палеоочага, млн лет Duration of kitchen zone activity, million years	Максимальные геотемпературы палеоочага, °C Peak temperatures of paleo kitchen zone, °C
Вариант 1 Reconstruction 1	72	33	73,0-0	73,0	119
Вариант 2 Reconstruction 2	99	36	92,0-0	92,0	125
Вариант 3 Reconstruction 3	99	36	92,0-0	92,0	128
Вариант 4 Reconstruction 4	102	36	92,0-0	92,0	132

Таким образом, именно *вариант 4*, оптимальный по сходимости измеренных и расчетных геотемператур и наиболее полно (в контексте проведенных исследований) учитывающий основные факторы палеоклимата, представляет наиболее «богатую» термическую историю материнских баженовских отложений, а следовательно, обеспечивает наибольшую расчетную плотность ресурсов генерированных нефтей.

## Выводы

1. Поставлена задача исследования роли 2-х факторов палеоклимата Арктического региона Западной Сибири (1-го – векового хода температур на поверхности Земли, 2-го – формирования и деградации неоплейстоценовой толщи вечномерзлых пород) в реконструкциях геотермического режима нефтематеринских отложений и в расчете степени реализации их генерационного потенциала.
2. Проведена географическая и геохронологическая увязка данных о вековом ходе температур на поверхности Земли и динамики мощности неоплейстоценовой мерзлоты северной палеоклиматической зоны Западной Сибири. Определены «арктический» вековой ход температур на поверхности Земли, начиная с юрского времени, и вековой ход мощностей мерзлых пород в четвертичное время.
3. Принята методика исследования, которая основывается: 1) на палеотемпературном моделировании, учитывающем параметры седиментационной истории и истории теплофизических свойств осадочной толщи, измеренные пластовые температуры и палеотемпературы, определенные по данным OCB; 2) на анализе результатов многовариантных палеотектонических и палеотемпературных реконструкций; 3) на оценке соответствия результатов общепринятым критериям оптимальности решения обратной задачи геофизики.
4. На примере нефтематеринских баженовских отложений мезозойского-кайнозойского разреза скважины Арктическая 11 (п-ов Ямал) установлено, что неучет векового хода температур на поверхности Земли и толщи неоплейстоценовой мерзлоты не позволяет адекватно восстановить термическую историю материнских отложений.
5. При определении ресурсов углеводородов объемно-генетическим методом на землях Арктического региона Западной Сибири предпочтительно применять «арктический» вековой ход температур и учитывать динамику толщи неоплейстоценовой мерзлоты мощностью 300–600 м-

тров. В случае неучета толщ вечной мерзлоты и палеоклиматического хода температур расчетные ресурсы УВ могут быть занижены до 40 %.

Автор благодарит д. г.-м. н. В.И., Исаева, д. г.-м. н. Г.А. Лобову, д. г.-м. н. А.Н. Фомина за помощь в подборе фак-

тических геолого-геофизических материалов, консультации и обсуждение результатов.

Статья подготовлена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-35-00080 мол.а.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гольберт А.В. Основы региональной палеоклиматологии. – М.: Недра, 1987. – 222 с.
2. Курчиков А.Р., Ставицкий Б.П. Геотермия нефтегазоносных областей Западной Сибири. – М.: Недра, 1987. – 134 с.
3. Kienast F.W., Sigert C., Mai D.-H. Climatic implications of Late Quaternary plant macrofossil assemblages from the Taymyr Peninsula, Siberia // *Global Planetary Change*. – 2001. – V. 31. – № 1–4. – P. 263–280.
4. Middle Weichselian environments on western Yamal Peninsula, Kara Sea, based on pollen records / A.A. Andreev, S.L. Forman, Y. Inglyfsson, W.F. Manley // *Quat. Res.* – 2006. – V. 65. – P. 275–281.
5. Episodic fresh surface waters in the Eocene Arctic Ocean / H. Brinkhuis, S. Schouten, M. Collinson, A. Sluijs, J.S. Sinninghe Damsté, G.R. Dickens, M. Huber, T.M. Cronin, J. Onodera, K. Takahashi, J.P. Bujak, R. Stein, J. van der Burgh, J.S. Eldrett, I.C. Harding, A.F. Lotter, F. Sangiorgi, H. van Konijnenburg-van Cittert, J.W. de Leeuw, J. Matthieff, J. Backman, K. Moran // *Nature*. – 2006. – V. – 441. – P. 606–609.
6. Kurchikov A.R. The geothermal regime of hydrocarbon pools in West Siberia // *Russian Geology and Geophysics*. – 2001. – V. 42. – № 11–12. – P. 678–689.
7. Historical-geological modeling of hydrocarbon generation in the mesozoic–cenozoic sedimentary basin of the Kara sea (basin modeling) / A.E. Kontorovich, L.M. Burshtein, N.A. Malyshev, P.I. Safronov, S.A. Gus'kov, S.V. Ershov, V.A. Kazanenko, N.S. Kim, V.A. Kontorovich, E.A. Kostyreva, V.N. Melenevsky, V.R. Livshits, A.A. Polyakov, M.B. Skvortsov // *Russian Geology and Geophysics*. – 2013. – V. 54. – № 8. – P. 1179–1226.
8. Tissot B. Preliminary Data on the Mechanisms and Kinetics of the Formation of Petroleum in Sediments. Computer Simulation of a Reaction Flowsheet // *Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP*. – 2003. – V. 58. – № 2. – P. 183–202.
9. Low geothermal heat flow of the Urals fold belt – implication of low heat production, fluid circulation or palaeoclimate? / I.T. Kukkonen, I.V. Golovanova, Yu.V. Khachay, V.S. Druzhinin, A.M. Kosarev, V.A. Scharov // *Tectonophysics*. – 1997. – V. 276. – P. 63–85.
10. Golovanova I.V., Salrmanova R.Yu., Tagirova Ch.D. Method for deep-temperature estimation with regard to the paleoclimate influence on the heat flow // *Russian Geology and Geophysics*. – 2014. – V. 55. – № 9. – P. 1426–1435.
11. Vertical variation in heat flow on the Kola Peninsula: palaeoclimate or fluid flow? / C. Vogt, D. Mottaghy, V. Rath, G. Marquart, L. Dijkshoorn, A. Wolf, C. Clauser // *Geophysical Journal International*. – 2014. – V. 199. – P. 829–843.
12. Demezhko D.Yu., Gornostaeva A.A. Reconstructions of long-term ground surface heat flux changes from deep-borehole temperature data // *Russian Geology and Geophysics*. – 2014. – V. 55. – № 12. – P. 1841–1846.
13. Iskorkina A., Isaev V., Terre D. Assessment of Mesozoic-Cainozoic climate impact on oil-source rock potential (West Siberia) // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. – 2015. – № 27. – 012023. URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/27/1/012023/pdf> (дата обращения: 11.11.2015).
14. Галушкин Ю.И. Моделирование осадочных бассейнов и оценка их нефтегазоносности. – М.: Научный мир, 2007. – 456 с.
15. Попов С.А., Исаев В.И. Моделирование нафтидогенеза Южного Ямала // *Геофизический журнал*. – 2011. – Т. 33. – № 2. – С. 80–104.
16. Моделирование процессов генерации, миграции и аккумуляции углеводородов в юрских и меловых комплексах Енисей-Хатангского бассейна / П.И. Сафронов, С.В. Ершов, Н.С. Ким, А.Н. Фомин // *Геология нефти и газа*. – 2011. – № 5. – С. 48–55.
17. Исаев В.И., Искоркина А.А. Мезозойско-кайнозойский ход температур на поверхности Земли и геотермический режим юрских нефтематеринских отложений (южная палеоклиматическая зона Западной Сибири) // *Геофизический журнал*. – 2014. – Т. 36. – № 5. – С. 64–80.
18. Исаев В.И., Лобова Г.А., Фомин А.Н. Влияние палеоклимата на геотермический режим баженовских отложений юго-востока Западной Сибири // *Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений*. – 2015. – № 3 – С. 4–11.
19. Исаев В.И. Оценка влияния толщ вечной мерзлоты позднечетвертичного климатического похолодания на геотермический режим нефтематеринских отложений Западной Сибири // *Нефтегазовая геология. Теория и практика*. – 2015. – Т. 10. – № 2. URL: [http://www.ngtp.ru/rub/12/21\\_2015.pdf](http://www.ngtp.ru/rub/12/21_2015.pdf) (дата обращения: 26.05.2015).
20. Позднечетвертичная вечная мерзлота как фактор геотермического режима и реализации нефтегенерационного потенциала баженовской свиты (Томская и Новосибирская области) / А.А. Искоркина, А.К. Исагалиева, О.С. Исаева, В.Ю. Косыгин, В.И. Исаев // *Известия ТПУ. Инжиниринг георесурсов*. – 2015. – Т. 326. – № 10. – С. 6–23.
21. Геокриологические условия Западно-Сибирской низменности / В.В. Баулин, Е.Б. Белопухова, Г.И. Дубиков, Л.М. Шмелев. – М.: Наука, 1967. – 213 с.
22. Добрецов Н.Л., Зыкин В.С., Зыкина В.С. Структура лессово-почвенной последовательности плейстоцена Западной Сибири и ее сопоставление с Байкальской и глобальными летописями изменения климата // *Доклады Академии наук. Серия: География*. – 2003. – Т. 391. – № 6. – С. 821–824.
23. Глобальные изменения климата и природной среды позднего кайнозоя в Сибири / отв. ред. А.П. Деревянко. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. – 511 с.
24. Гаврилов А.В. Криолитозона арктического шельфа Восточной Сибири (современное состояние и история развития в среднем плейстоцене-голоцене): автореф. дис. ... д.г.-м.н. наук. – М., 2008. – 28 с.
25. Шарбатян А.А. Экстремальные оценки в геотермии и геокриологии. – М.: Наука, 1974. – 123 с.
26. Баулин В.В. Многолетнемерзлые породы нефтегазоносных районов СССР. – М.: Недра, 1985. – 176 с.
27. Шполянская Н.А. Мерзлая зона литосферы Западной Сибири и тенденции ее развития. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1981. – 167 с.
28. Возраст мерзлых отложений и изотопный состав залежей подземных льдов полуострова Ямал (север Западной Сибири) / И.Д. Данилов, О.Б. Парунин, В.А. Марьенко, А.Б. Чугунов // *Геохронология четвертичного периода*. – М.: Наука, 1992. – С. 118–124.



29. Шейнкман В.С., Плюснин В.М. Оледенение севера Западной Сибири – спорные вопросы и пути их решения // *Лед и снег*. – 2015. – Т. 55. – № 1. – С. 103–120.
30. Гусков С.А., Волкова В.С. История геологического развития арктических районов Западно-Сибирской геосинеклизы в кайнозойское время // *ИНТЕРЭКСПО Гео-Сибирь*. – 2014. – Т. 2. – № 2. – С. 1–4.
31. Астахов В.И., Назаров Д.В. Стратиграфия верхнего неоплейстоцена севера Западной Сибири и ее геохронометрическое обоснование // *Региональная геология и металлогения*. – 2010. – № 43. – С. 36–47.
32. Volkova V.S., Mikhailova I.V. Environment and climate in the last (sartan) glaciation in West Siberia (according to palynological evidence) // *Russian Geology and Geophysics*. – 2001. – № 4. – P. 678–689.
33. Astakhov V.I. Chronostratigraphic subdivisions of the Siberian upper Pleistocene // *Russian Geology and Geophysics*. – 2006. – V. 47. – № 11. – P. 1186–1199.
34. Орлова В.В. Климат СССР. Западная Сибирь. – Л.: Гидрометиздат, 1962. – 359 с.
35. Volkova V.S. Paleogene and neogene stratigraphy and paleotemperature trend of West Siberia (from palynological data) // *Russian Geology and Geophysics*. – 2011. – V. 52. – № 7. – P. 709–716.
36. Сарана В.А. Ледники Плато Путорана // *Вестник Московского университета. Серия 5: География*. – 2005. – № 6. – С. 47–54.
37. Павлов А.В. Тренды современных изменений температуры почвы на севере России // *Криосфера Земли*. – 2008. – Т. XII. – № 3. – С. 22–27.
38. Васильчук Ю.К., Серова А.К., Трофимов В.Т. Новые данные об условиях накопления каргинских отложений на севере Западной Сибири // *Бюллетень Комиссии по изучению четвертичного периода*. – 1984. – № 53. – С. 28–35.
39. Чеховский А.Л. Влияние складчатых структур осадочного чехла на поведение нижней границы многолетнемерзлых пород // *Труды ПНИИИС*. – 1975. – Вып. 36. – С. 65–73.
40. Архангелов А.А., Карташова Г.Г. Палеогеография Колымской низменности в позднем плиоцене // *Климаты Земли в геологическом прошлом*. – М.: Наука, 1987. – 229 с.
41. Оледенения и ледниковый сток горных стран северного полушария при глобальных потеплениях по палеоклиматическим сценариям / И.М. Лебедева, В.М. Котляков, М.Д. Ананичева, Ю.М. Кононов, И.В. Давидович // *Информационный бюллетень РФФИ. Науки о Земле*. – 1999. – Вып. 7. URL: [http://www.rfbr.ru/rffi/ru/project\\_search/o\\_127357](http://www.rfbr.ru/rffi/ru/project_search/o_127357) (дата обращения: 18.08.2016).
42. Volkova V.S. Geologic stages of the paleogene and neogene evolution of the Arctic shelf in the Obr region (West Siberia) // *Russian Geology and Geophysics*. – 2014. – V. 55. – № 4. – P. 619–633.
43. Кулькова И.А., Волкова В.С. Ландшафты и климат Западной Сибири в палеогене и неогене // *Геология и геофизика*. – 1997. – Т. 38. – № 3. – С. 581–595.
44. Volkova V.S., Kuz'mina O.B. Flora, vegetation, and climate of the middle cenophytic (paleocene-eocene) of Siberia: palynological data // *Russian Geology and Geophysics*. – 2005. – V. 46. – № 8. – P. 822–833.
45. Палеоклиматы Сибири в меловом и палеогеновом периодах / А.В. Гольберт, К.Н. Григорьева, Л.Л. Ильенко, Л.Г. Маркова, А.В. Скуратенко, Ю.В. Тесленко. – М.: Недра, 1977. – 107 с.
46. Палеоландшафты Западной Сибири в юре, мелу и палеогене / А.В. Гольберт, Л.Г. Маркова, И.Д. Полякова, В.Н. Сакс, Ю.В. Тесленко. – М.: Наука, 1968. – 144 с.
47. Некоторые проблемы палеотемпературного анализа (по ростам белемнитов) / Т.С. Берлин, Е.Л. Киприкова, Д.П. Найдин, Н.Д. Полякова, В.Н. Сакс, Р.В. Тейс, А.В. Хабаков // *Геология и геофизика*. – 1970. – № 4. – С. 36–43.
48. Гаврилов А.В. Типизация Арктических шельфов по условиям формирования мерзлых толщ // *Криосфера Земли*. – 2008. – Т. XII. – № 3. – С. 69–79.
49. *Геокриология СССР. Средняя Сибирь* / под ред. Э.Д. Ершова. – М.: Недра, 1989. – 50 с.
50. Груздов А.В., Трофимов В.Т., Филькин Н.А. Основные закономерности распространения, строения толщ и температур многолетнемерзлых пород Тазовского полуострова и бассейнов рек Надым и Пур // *Природные условия Западной Сибири*. – 1972. – Вып. 2. – С. 115–133.
51. Герасимов И.П. Четвертичная геология (Палеогеография четвертичного периода). – М.: Изд-во Наркомпроса РСФСР, 1939. – 363 с.
52. Фотиев С.М. Современные представления об эволюции криогенной области Западной и Восточной Сибири в плейстоцене и голоцене // *Криосфера Земли*. – 2006. – Т. X. – № 2. – С. 3–26.
53. Бадю Ю.Б. Влияние газоносных структур на мощность криогенной толщи Ямала // *Криосфера Земли*. – 2014. – Т. XVIII. – № 3. – С. 11–22.
54. Разумов С.О., Спектор В.Б., Григорьев М.Н. Модель позднекайнозойской эволюции криолитозоны шельфа западной части моря Лаптевых // *Океанология*. – 2014. – Т. 54. – № 5. – С. 679–693.
55. Трофимов В.Т. Полуостров Ямал. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1980. – 246 с.
56. Романовский Н.Н., Тумской В.Е. Ретроспективный подход к оценке современного распространения и строения шельфовой криолитозоны Восточной Арктики // *Криосфера Земли*. – 2011. – Т. XV. – № 1. – С. 3–14.
57. Баулин В.В. История «подземного оледенения» Западной Сибири в связи с трансгрессией Арктического бассейна // *Северный Ледовитый океан и его побережье в кайнозое*. – Л.: Гидрометеоиздат, 1970. – С. 404–409.
58. Свиточ А.А. Палеогеография плейстоцена. – М.: Изд-во МГУ, 1987. – 188 с.
59. Попов А.И. Мерзлотные явления в земной коре (Криолитология). – М.: Изд-во Московского университета, 1967. – 302 с.
60. Фотиев С.М. Современные представления об эволюции криогенной области Западной и Восточной Сибири в плейстоцене и голоцене. Сообщение 1 // *Криосфера Земли*. – 2005. – Т. IX. – № 2. – С. 3–22.
61. Трофимов В.Т. Полуостров Ямал (инженерно-геологический очерк). – М.: Изд-во Московского университета, 1975. – 302 с.
62. Tectonic structure and history of evolution of the West Siberian geosyncline in the Mesozoic and Cenozoic / V.A. Kontorovich, S.Yu. Belyaev, A.E. Kontorovich, V.O. Krasavchikov, A.A. Kontorovich, O. I. Suprunenko // *Russian Geology and Geophysics*. – 2001. – V. 42. – P. 1832–1845.
63. Catagenesis of organic matter at the top and base of the Jurassic complex in the West Siberian megabasin / A.E. Kontorovich, A.N. Fomin, V.O. Krasavchikov, A.V. Istomin // *Russian Geology and Geophysics*. – 2009. – V. 50. – № 11. – P. 917–929.
64. Searches Shale Oil in Western Siberia / G.A. Lobova, V.I. Isaev, A.N. Fomin, V.V. Stotsky // *International Multidisciplinary Scientific Geoconference (SGEM 2016): Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining: Conference Proceedings*. – Albena, 28 June – 7 July 2016. – Sofia: STEF92 Technology Ltd, 2016. – V. 1-3. – P. 941–948.
65. Базы данных Государственных геологических карт ВСЕГЕИ. Карта дочетвертичных образований R (40)-41, R-43, 44(45). URL: <http://www.vsegei.ru/ru/info/georesource/> (дата обращения: 25.05.2016).
66. Isaev V.I., Fomin A.N. Loki of generation of bаженоv- and togur-type oils in the southern Nyurol'ka megadepression // *Russian Geology and Geophysics*. – 2006. – V. 47. – № 6. – P. 734–745.

67. Estimation of the Oil-and-Gas Potential of Sedimentary Depression in the Far East and West Siberia Based on Gravimetry and Geothermy Data / R.Yu. Gulenok, V.I. Isaev., V.Yu. Kosygin, G.A. Lobova, V.I. Starostenko // Russian Journal of Pacific Geology. – 2011. – V. 5. – № 4. – P. 273–287.
68. Шкала геологического времени / У.Б. Харленд, А.В. Кокс, П.Г. Ллевеллин, К.А.Г. Пиктон, А.Г. Смит, Р. Уолтерс. – М.: Мир, 1985. – 140 с.
69. Иванов Н.С., Гаврильев Р.И. Теплофизические свойства мерзлых горных пород. – М.: Наука, 1965. – 74 с.
70. Модель катагенеза органического вещества (на примере баженовской свиты) / Л.М. Бурштейн, Л.В. Жидкова, А.Э. Контонич, В.Н. Меленевский // Геология и геофизика. – 1997. – Т. 38. – № 6. – С. 1070–1078.
71. Isaev V.I. Interpretation of High-Accuracy Gravity Exploration Data by Mathematic Programming // Russian Journal of Pacific Geology. – 2013. – V. 7. – № 2. – P. 92–106.
72. Isaev V.I., Lobova G.A., Osipova E.N. The oil and gas contents of the Lower Jurassic and Achimovka reservoirs of the Nyuroirka megadepression // Russian Geology and Geophysics. – 2014. – V. 55. – P. 1418–1428.

*Поступила 12.08.2016 г.*

#### **Информация об авторах**

**Искоркина А.А.**, аспирант кафедры геофизики Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета; ведущий специалист Томского филиала ФБУ «Территориальный фонд геологической информации по Сибирскому федеральному округу».

UDC 553.98(571)

## PALEOCLIMATE FACTORS OF RECONSTRUCTING THERMAL HISTORY OF THE PETROMATERNAL BAZHENOV SUITE OF THE ARCTIC REGION IN WESTERN SIBERIA

Albina A. Iskorkina<sup>1,2</sup>,

iskorkina.a@mail.ru

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

<sup>2</sup> Territorial fund of geological information on Siberian Federal District,  
bld. 16, 9, Mokrushin street, Tomsk, 634050, Russia.

**The relevance.** The earth of the Arctic region of the West Siberian oil-and-gas province has the unique paleoclimate features causing the need to improve schemes and parameters of quantitative assessment of hydrocarbon resources by volume and genetic method based on paleoreconstruction of geotemperature mode of petromaternal deposits.

**The main aim** of the research is to synthesize the known data on Mesozoic and Cainozoic climate of northern part of Western Siberia and to estimate the impact of paleoclimate factors – century course of temperatures of a terrestrial surface and the Neo-Pleistocene permafrost thickness – on the settlement geothermal mode of petromaternal suites, defining the calculation of resource density.

**Object:** Bazhenov deposits of the Mesozoic and Cenozoic section, opened with deep well 11 at the Arctic area (Yamal Peninsula).

**Methods:** system analysis and construction of the century course of paleoclimate parameters; paleotemperature modeling considering the parameters of sedimentation history and the history of thermal properties of sedimentary thickness.

**Results.** The author has matched the geographical and geochronological coordination of data on the century course of temperatures on the Earth's surface and the power dynamics of Neo-Pleistocene permafrost of the northern paleoclimate zone of Western Siberia, defined the «arctic» century course of temperatures on the Earth's surface, since the Jurassic time, and the century course of capacities of frozen rocks in quaternary time. It was determined that neglect of the century course of temperatures and permafrost thicknesses does not allow the adequate recovery of thermal history of maternal deposits. It is recommended when determining hydrocarbon resources by the volumetric-genetic method on lands of the Arctic region of Western Siberia to apply the «arctic» century course of temperatures and to consider the dynamics of thickness of the 300–600 meters Neo-Pleistocene permafrost. Otherwise the calculated hydrocarbon resources can be underestimated to 40 %.

### Key words:

Paleoclimate, geothermal mode, Bazhenov deposits, resources of hydrocarbon, Yamal Peninsula.

The author acknowledges the assistance of V.I. Isaev (Dr. Sc.), G.A. Lobova (Dr. Sc.), A.N. Fomin (Dr. Sc.) in selecting real geological and geophysical information, consulting and discussing the results.

The paper was financially supported by the RFBR within the scientific project no. 16–35–00080 мол. а.

### REFERENCES

- Golbert A.V. *Osnovy regionalnoy paleoklimatologii* [Bases of regional paleoclimatology]. Moscow, Nedra Publ., 1987. 222 p.
- Kurchikov A.R., Stavitsky B.P. *Geotermya neftegazonosnykh oblastey Zapadnoy Sibiri* [Geothermic of petroleum potential fields of Western Siberia]. Moscow, Nedra Publ., 1987. 134 p.
- Kienast F.W., Sigert C., Mai D.-H. Climatic implications of Late Quaternary plant macrofossil assemblages from the Taymyr Peninsula, Siberia. *Global Planetary Change*, 2001, vol. 31, no. 1–4, pp. 263–280.
- Andreev A.A., Forman S.L., Ingylfsson Y., Manley W.F. Middle Weichselian environments on western Yamal Peninsula, Kara Sea, based on pollen records. *Quat. Res.*, 2006, vol. 65, pp. 275–281.
- Brinkhuis H., Schouten S., Collinson M., Sluijs A., Sinninghe Damsté J.S., Dickens G.R., Huber M., Cronin T.M., Onodera J., Takahashi K., Bujak J.P., Stein R., van der Burgh J., Eldrett J.S., Harding I.C., Lotter A.F., Sangiorgi F., van Konijnenburg-van Cittert H., de Leeuw J.W., Matthießen J., Backman J., Moran K. Episodic fresh surface waters in the Eocene Arctic Ocean. *Nature*, 2006, vol. 441, pp. 606–609.
- Kurchikov A.R. The geothermal regime of hydrocarbon pools in West Siberia. *Russian Geology and Geophysics*, 2001, vol. 42, no. 11–12, pp. 1846–1853.
- Kontorovich A.E., Burshtein L.M., Malyshev N.A., Safonov P.I., Gus'kov S.A., Ershov S.V., Kazanekov V.A., Kim N.S., Kontorovich V.A., Kostyreva E.A., Melenevsky V.N., Livshits V.R., Polyakov A.A., Skvortsov M.B. Historical-geological modeling of hydrocarbon generation in the mesozoic-cenozoic sedimentary basin of the Kara sea (basin modeling). *Russian Geology and Geophysics*, 2013, vol. 54, no. 8, pp. 1179–1226.
- Tissot B. Preliminary Data on the Mechanisms and Kinetics of the Formation of Petroleum in Sediments. Computer Simulation of a Reaction Flowsheet. *Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP*, 2003, vol. 58, no. 2, pp. 183–202.
- Kukkonen I.T., Golovanova I.V., Khachay Yu.v., Druzhinin V.S., Kosarev A.M., Scharov V.A. Low geothermal heat flow of the Urals fold belt – implication of low heat production, fluid circulation or palaeoclimate? *Tectonophysics*, 1997, vol. 276, pp. 63–85.
- Golovanova I.V., Salrmanova R.Yu., Tagirova Ch.D. Method for deep-temperature estimation with regard to the paleoclimate influence on the heat flow. *Russian Geology and Geophysics*, 2014, vol. 55, no. 9, pp. 1426–1435.
- Vogt C., Mottaghy D., Rath V., Marquart G., Dijkshoorn L., Wolf A., Clauser C. Vertical variation in heat flow on the Kola Peninsula: palaeoclimate or fluid flow? *Geophysical Journal International*, 2014, vol. 199, pp. 829–843.
- Demezhko D.Yu., Gornostaeva A.A. Reconstructions of long-term ground surface heat flux changes from deep-borehole temperature data. *Russian Geology and Geophysics*, 2014, vol. 55, no. 12, pp. 1841–1846.
- Iskorkina A., Isaev V., Terre D. Assessment of Mesozoic-Cainozoic climate impact on oil-source rock potential (West Siberia).

- IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2015, no. 27, 012023. Available at: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/27/1/012023/pdf> (accessed: 11 November 2015).
14. Galushkin Yu.I. *Modelirovanie osadochnykh basseynov i otsenka ikh neftegazonosnosti* [Modeling decantation basins and assessment of their petroleum potential]. Moscow, Nauchny mir Publ., 2007. 456 p.
  15. Popov S.A., Isaev V.I. Modeling of naftidogenesis of Southern Yamal. *Geofizicheskiy zhurnal – Geophysical journal*, 2011, vol. 33, no. 2, pp. 80–104. In Rus.
  16. Safronov P.I., Ershov S.V., Kim N.S., Fomin A.N. Modelirovanie protsessov generatsii, migratsii i akumulatsii uglevodorodov v yurskikh i melovykh kompleksakh Enisey-Khatangskogo basseyna [Modeling generation, migration and accumulation of hydrocarbons in the Jurassic and cretaceous complexes of the Yenisei-Hatangsky basin]. *Geologiya nefti i gaza – Geology of oil and gas*, 2011, no 5, pp. 48–55.
  17. Isaev V.I., Iskorkina A.A. The Mesozoic and Cenozoic course of temperatures on the Earth surface and geothermal mode of the Jurassic petromaternal deposits (the southern paleoclimat zone of Western Siberia). *Geofizicheskiy zhurnal – Geophysical journal*, 2014, vol. 36, no. 5, pp. 64–80. In Rus.
  18. Isaev V.I., Lobova G.A., Fomin A.N. Vliyanie paleoklimata na geotermicheskiy rezhim bazhenovskikh otlozheny yugo-vostoka Zapadnoy Sibiri [Influence of paleoclimat on geothermal mode of bazhenov deposits in the southeast of Western Siberia]. *Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanykh i gazovykh mestorozhdeny – Geology, geophysics and development of oil and gas fields*, 2015, no. 3, pp. 4–11.
  19. Isaev V.I. Assessment of the influence of permafrost strata of late quaternary climate cooling on the geothermal regime of oil-source deposits of Western Siberia. *Neftegazovaya Geologiya. Teoriya i Praktika*, 2015, vol. 10, no. 2. Available at: [http://www.ngtp.ru/rub/12/21\\_2015.pdf](http://www.ngtp.ru/rub/12/21_2015.pdf) (accessed: 26 May 2015).
  20. Iskorkina A.A., Isagalieva A.K., Isaeva O.S., Kosygin V.Ju., Isaev V.I. Late quaternary permafrost as a factor of geothermal mode and realization of petrogenative capacity of the Bazhenov shale (Tomsk and Novosibirsk regions). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2015, vol. 326, no. 10, pp. 6–23. In Rus.
  21. Baulin V.V., Belopukhova E.B., Dubikov G.I., Shmelev L.M. *Geokriologicheskie usloviya Zapadno-Sibirskoy nizmennosti* [Geocryologic conditions of the West Siberian lowland]. Moscow, Nauka Publ., 1967. 213 p.
  22. Dobretsov N.L., Zykin V.S., Zykina V.S. Struktura lessovo-pochvennoy posledovatelnosti pleystotsena Zapadnoy Sibiri i ee sopostavlenie s Baykalskoy i globalnymi letopisyami izmeneniya klimata [Structure of loessial and soil sequence of the pleistocene of Western Siberia and its comparison with Baikal and global chronicles of climate change]. *Doklady akademii nauk. Seriya Geografiya*, 2003, vol. 391, no. 6, pp. 821–824.
  23. Derevyanko A.P. *Globalnye izmeneniya klimata i prirodnoy sredy pozdnego kaynozoya v Sibiri* [Global changes of climate and environment of the late Cenozoic in Siberia]. Novosibirsk, SO RAN Publ., 2008. 511 p.
  24. Gavrilov A.V. *Kriolitotzona arkticheskogo shelfa Vostochnoy Sibiri (sovremennoe sostoyanie i istoriya razvitiya v srednem pleystotsene – golotsene). Avtoreferat Dis. Dokt. nauk* [Cryolithozone of the Arctic shelf of Eastern Siberia (current state and history of development on middle pleistocene – Holocene). Dr. Diss. Abstract]. Moscow, 2008. 28 p.
  25. Sharbatian A.A. *Ekstremalnye otsenki v geotermii i geokriologii* [Extreme estimates in geothermic and cryopedology]. Moscow, Nedra Publ., 1974. 123 p.
  26. Baulin V.V. *Mnogoletnemerzlye porody neftegazonosnykh rayonov SSSR* [Permafrost rock of oil-and-gas regions of the USSR]. Moscow, Nedra Publ., 1985. 176 p.
  27. Shpolyanskaya N.A. *Merzlaya zona litosfery Zapadnoy Sibiri i tendentsii ee razvitiya* [Frozen zone of lithosphere of Western Siberia and tendency of its development]. Moscow, Moscow University Press, 1981. 167 p.
  28. Danilov I.D., Parunin O.B., Marenko V.A., Chugunov A.B. Vozrast merzlykh otlozheny i izotopny sostav zalezhey podzemnykh ldov poluostrova Yamal (sever Zapadnoy Sibiri) [Age of frozen deposits and isotope structure of deposits of underground ices of the Yamal Peninsula (North of Western Siberia)]. *Geokhronologiya chetvertichnogo perioda* [Geochronology of the Quaternary Period]. Moscow, Nauka Publ., 1992. pp. 118–124.
  29. Sheynkman V.S., Plyusnin V.M. Glaciation of West Siberia – disputable questions and means of their solution. *Ice and snow*, 2015, vol. 55, no. 1, pp. 103–120. In Rus.
  30. Guskov S.A., Volkova V.S. Istoriya geologicheskogo razvitiya arkticheskikh rayonov Zapadno-Sibirskoy geosineklizy v kaynozoykskoe vremya [History of geological development of the Arctic districts of the West Siberian geosyncline in Cainozoic time]. *INTEREKSPLO Geo-Siberia*, 2014, vol. 2, no. 2, pp. 1–4.
  31. Astakhov V.I., Nazarov D.V. Stratigraphy of the upper neopleistocene of the North of Western Siberia and its geochronometric justification. *Regional geology and metallogeny*, 2010, no. 43, pp. 36–47. In Rus.
  32. Volkova V.S., Mikhailova I.V. Environment and climate in the last (sartan) glaciation in West Siberia (according to palynological evidence). *Russian Geology and Geophysics*, 2001, no. 4, pp. 678–689.
  33. Astakhov V.I. Chronostratigraphic subdivisions of the Siberian upper Pleistocene. *Russian Geology and Geophysics*, 2006, vol. 47, no. 11, pp. 1186–1199.
  34. Orlova V.V. *Klimat SSSR. Zapadnaya Sibir* [Climate of the USSR. Western Siberia]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1962. 359 p.
  35. Volkova V.S. Paleogene and neogene stratigraphy and paleotemperature trend of West Siberia (from palynological data). *Russian Geology and Geophysics*, 2006, vol. 52, no. 7, pp. 709–716.
  36. Sarana V.A. Ledniki Plato Putorana [Glaciers of Putorana Plateau]. *Bulletin of the Moscow University. Series 5. Geography*, 2005, no. 6, pp. 47–54.
  37. Pavlov A.V. Trendy sovremennykh izmeneniy temperatury pochvy na severe Rossii [Trends of current changes of soil temperature in the north of Russia]. *Cryosphere of Earth*, 2008, vol. XII, no. 3, pp. 22–27.
  38. Vasilchuk Yu.K., Serova A.K., Trofimov V.T. Novye dannye ob usloviyakh nakopleniya karginskikh otlozheniy na severe Zapadnoy Sibiri [New data on conditions of Karghinskaya deposits accumulation in the north of Western Siberia]. *Bulletin of the Commission on studying of the Quaternary Period*, 1984, no. 53, pp. 28–35.
  39. Chehovskiy A.L. Vliyanie skladchatykh struktur osadochnogo chekhla na povedenie nizhney granitsy mnogoletnemerzlykh porod [Influence of folded structures of the sedimentary cover on behavior of the lower boundary of permafrost]. *Tr. PNIIS*, 1975, no. 36, pp. 65–73.
  40. Arkhangelov A.A., Kartashova G.G. Paleogeografiya Kolymskoy nizmennosti v pozdnem plitsene [Paleogeography of Kolymskaya lowland in the late Pliocene]. *Klimaty Zemli v geologicheskoy proshlom* [Earth's climate in the geological past]. Moscow, Nauka Publ., 1987. 229 p.
  41. Lebedeva I.M., Kotlyakov V.M., Ananicheva M.D., Kononov Yu.M., Davidovich I.V. Oledneniya i lednikovyy stok gornyyh stran severnogo polushariya pri globalnykh potepleniyakh po paleoklimaticheskim scenariyam [Freezing and glacial drain of highlands of the northern hemisphere at global warming in paleoclimatic scenarios]. *Newsletter of the Russian Federal Property Fund. Sciences about Earth*, 1999, no. 7. Available at: <http://ezproxy.ha.tpu.ru:2057/item.asp?id=750236> (accessed: 18 July 2016).



42. Volkova V.S. Geologic stages of the paleogene and neogene evolution of the Arctic shelf in the Obr region (West Siberia). *Russian Geology and Geophysics*, 2014, vol. 55, no. 4, pp. 619–633.
43. Kulkova I.A., Volkova V.S. Landshafty i klimat Zapadnoy Sibiri v paleogene i neogene [Landscapes and climate of Western Siberia in the Paleogene and Neogene]. *Geologiya i geofizika – Russian Geology and Geophysics*, 1997, vol. 38, no. 3, pp. 581–595.
44. Volkova V.S., Kuz'mina O.B. Flora, vegetation, and climate of the middle cenophytic (paleocene-eocene) of Siberia: palynological data. *Russian Geology and Geophysics*, 2005, vol. 46, no. 8, pp. 822–833.
45. Golbert A.V., Grigoreva K.N., Ilenok L.L., Markova L.G., Skuratenko A.V., Teslenko Yu.V. *Paleoklimaty Sibiri v melovom i paleogenovom periodakh* [Paleoclimates of Siberia in the Cretaceous and Paleogene periods]. Moscow, Nedra Publ., 1977. 107 p.
46. Golbert A.V., Markova L.G., Polyakova I.D., Saks V.N., Teslenko Yu.V. Paleolandschafty Zapadnoy Sibiri v yure, melu i paleogene [Paleolandsapes of Western Siberia in the Jurassic, Cretaceous and Paleogene]. Moscow, Nauka Publ., 1968. 144 p.
47. Berlin T.S., Kiprikova E.L., Naydin D.P., Polyakova N.D., Saks V.N., Teys R.V., Khabakov A.V. Nekotorye problemy paleotemperaturnogo analiza (po rostam belemnitov) [Some problems of paleo thermal analysis (by belemnite growth)]. *Geologiya i geofizika – Russian Geology and Geophysics*, 1970, vol. 4, pp. 36–43.
48. Gavrillov A.V. Tipizatsiya Arkticheskikh shelfov po usloviyam formirovaniya merzlykh tolshch [Typing the Arctic shelf on conditions of formation of permafrost]. *Cryosphere of Earth*, 2008, vol. XII, no. 3, pp. 69–79.
49. Ershova E.D. *Geokriologiya SSSR. Srednyaya Sibir* [Geocryology of the USSR. Central Siberia]. Moscow, Nedra Publ., 1989. 50 p.
50. Gruzdov A.V., Trofimov V.T., Filkin N.A. Osnovnye zakonomernosti rasprostraneniya, stroeniya tolshch i temperatur mnogoletnemerzlykh porod Tazovskogo poluostrova i basseynov rek Nadyim i Pur [Basic regularities of distribution, strata structure and temperatures of permafrost rocks of Tazovsky peninsula and basins of the rivers Nadyim and Pur]. *Prirodnye usloviya zapadnoy Sibiri*, 1972, no. 2, pp. 115–133.
51. Gerasimov I.P. *Chetvertichnaya geologiya (Paleogeografiya chetvertichnogo perioda)* [Quaternary geology (Paleogeography of the Quaternary Period)]. Moscow, Narkompros RSFSR'S Publ. house, 1939. 363 p.
52. Fotiev S.M. Sovremennye predstavleniya ob evolyutsii kriogennoy oblasti Zapadnoy i Vostochnoy Sibiri v pleystotsene i golotsene [Modern ideas of evolution of cryogenic area of Western and Eastern Siberia in the Pleistocene and the Holocene]. *Cryosphere of Earth*, 2006, vol. X, no. 2, pp. 3–26.
53. Badu Yu.B. Influence of gas-bearing structures on the capacity of Yamal cryogenic strata. *Cryosphere of Earth*, 2014, vol. XVIII, no. 3, p. 11–22. In Rus.
54. Razumov S.O., Spektor V.B., Grigorev M.N. Model pozdnekaynozoy-skiy evolyutsii kriolitozony shelfa zapadnoy chasti morya Laptevskiy [Model of Late Cenozoic evolution of shelf cryolithozone of the Laptev Sea western part]. *Oceanology*, 2014, vol. 54, no. 5, pp. 679–693.
55. Trofimov V.T. *Poluostrov Yamal* [The Yamal Peninsula]. Moscow, Moscow University Press, 1980. 246 p.
56. Romanovsky N.N., Tumskey V.E. Retrospective approach to assessment of current distribution and structure of shelf cryolithic zone of East Arctic. *Cryosphere of Earth*, 2011, vol. XV, no. 1, pp. 3–14.
57. Baulin V.V. Istoriya «podzemnogo oledneniya» Zapadnoy Sibiri v svyazi s transgressiyey Arkticheskogo basseyna [The history of «underground glaciation» of Western Siberia owing to transgression of the Arctic Basin]. *Severny ledovityy okean i ego poberezhie v kaynozoe* [The Arctic Ocean and its coast in the Cenozoic]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1970. pp. 404–409.
58. Svitoch A.A. *Paleogeografiya pleystotsena* [Paleogeography of the Pleistocene]. Moscow, MGU Publ. house, 1987. 188 p.
59. Popov A.I. *Merzlotnye yavleniya v zemnoy kore (Kriolitologiya)* [Permafrost phenomena in the Earth's crust (Cryolithology)]. Moscow, Moscow University Publ. house, 1967. 302 p.
60. Potiev S.M. Sovremennye predstavleniya ob evolyutsii kriogennoy oblasti Zapadnoy i Vostochnoy Sibiri v pleystotsene i golotsene. Soobschenie 1 [Modern ideas on evolution of cryogenic area of Western and Eastern Siberia in Pleistocene and Holocene. Report 1]. *Cryosphere of Earth*, 2005, vol. IX, no. 2, pp. 3–22.
61. Trofimov V.T. *Poluostrov Yamal (inzhenerno-geologicheskyy ocherk)* [Yamal Peninsula (engineering-geological sketch)]. Moscow, Moscow University Publ. house, 1975. 302 p.
62. Kontorovich V.A., Belyaev S.Yu., Kontorovich A.E., Krasavchikov V.O., Kontorovich A.A., Suprunenko O.I. Tectonic structure and history of evolution of the West Siberian geosyncline in the Mesozoic and Cenozoic. *Russian Geology and Geophysics*, 2001, vol. 42, pp. 1832–1845.
63. Kontorovich A.E., Fomin A.N., Krasavchikov V.O., Istomin A.V. Catagenesis of organic matter at the top and base of the Jurassic complex in the West Siberian megabasin. *Russian Geology and Geophysics*, 2009, vol. 50, no. 11, pp. 917–929.
64. Lobova G.A., Isaev V.I., Fomin A.N., Stotsky V.V. Searches Shale Oil in Western Siberia. *International Multidisciplinary Scientific Geoconferrence (SGEM 2016): Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining: Conference Proceedings*. Albena, 28 June – 7 July 2016. Sofia, STEF92 Technology Ltd, 2016. Vol. 1–3, pp. 941–948.
65. *Bazy dannykh Gosudarstvennykh geologicheskikh kart VSEGEI. Karta dochetvertichnykh obrazovaniy R (40)-41, R-43, 44(45)* [Databases of the State geological map of VSEGEI. Map structures pre-Quaternary R(40)-41, R-43, 44 (45)]. Available at: <http://www.vsegei.ru/ru/info/georesource/> (accessed 25 May 2016).
66. Isaev V.I., Fomin A.N. Loki of generation of bazhenov- and togur-type oils in the southern Nyuro'l'ka megadepression. *Russian Geology and Geophysics*, 2006, vol. 47, no. 6, pp. 734–745.
67. Gulenok R.Yu., Isaev V.I., Kosygin V.Yu., Lobova G.A., Starostenko V.I. Estimation of the Oil-and-Gas Potential of Sedimentary Depression in the Far East and West Siberia Based on Gravimetry and Geothermy Data. *Russian Journal of Pacific Geology*, 2011, vol. 5, no. 4, pp. 273–287.
68. Harlend U.B., Koks A.V., Llevellin P.G., Pikton K.A.G., Smit A.G., Uolters R. *Shkala geologicheskogo vremeni* [Scale of geological time]. Moscow, Mir Publ., 1985. 140 p.
69. Ivanov N.S., Gavrilov R.I. *Teplofizicheskie svoystva merzlykh gornyykh porod* [Thermal properties of frozen rocks]. Moscow, Nauka Publ., 1965. 74 p.
70. Burshteyn L.M., Zhidkova L.V., Kontorovich A.E., Melenevskiy V.N. Model katageneza organicheskogo veshchestva (na primere bazhenovskoy svity) [Model of katagenesis of organic matter (by the example of Bazhenov Formation)]. *Geologiya i geofizika – Russian Geology and Geophysics*, 1997, vol. 38, no. 6, pp. 1070–1078.
71. Isaev V.I. Interpretation of High-Accuracy Gravity Exploration Data by Mathematic Programming. *Russian Journal of Pacific Geology*, 2013, vol. 7, no. 2, pp. 92–106.
72. Isaev V.I., Lobova G.A., Osipova E.N. The oil and gas contents of the Lower Jurassic and Achimovka reservoirs of the Nyuro'l'ka megadepression. *Russian Geology and Geophysics*, 2014, vol. 55, pp. 1418–1428.

Received: 12 August 2016.

#### Information about the authors

**Albina A. Iskorkina**, graduate student, National Research Tomsk Polytechnic University; leading expert, Territorial fund of geological information on Siberian Federal District.

УДК 552.574: 546.65

## РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ В ПОЗДНЕПАЛЕЗОЙСКИХ УГЛЯХ СЕВЕРНОЙ АЗИИ (СИБИРЬ, СЕВЕРНЫЙ КИТАЙ, МОНГОЛИЯ, КАЗАХСТАН)

**Арбузов Сергей Иванович<sup>1</sup>,**

siarbuzov@mail.ru

**Ильенок Сергей Сергеевич<sup>1</sup>,**

ilenokss@rambler.ru

**Машенькин Валерий Семенович<sup>2</sup>,**

mashenikin@mail.ru

**Сунь Юйчжуан<sup>3</sup>,**

sun\_yz@hotmail.com

**Жао Цунлянь<sup>3</sup>,**

cunliang909@163.com

**Блохин Максим Геннадьевич<sup>4</sup>,**

blokhin@fegi.ru

**Иванов Владимир Викторович<sup>4</sup>,**

d159327@yandex.ru

**Зарубина Наталья Владимировна<sup>4</sup>,**

zarubina@fegi.ru

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

<sup>2</sup> Отдел горных проектов Чингис Хан Банка, Монголия, 14251, г. Улан-Батор, пр. Чингиса, 15.

<sup>3</sup> Совместный инновационный центр угольной эксплуатации Хэбэя Хэбэйского инженерного университета, КНР, 056038, г. Ханьдань, ул. Гуанминнан, 199.

<sup>4</sup> Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Россия, 690022, г. Владивосток, пр. 100-летия Владивостока, 159.

**Актуальность работы** обусловлена необходимостью определения условий концентрирования редкоземельных элементов в углях, разработки моделей формирования и выявления критериев прогнозирования редкометалльного оруденения в угленосных отложениях.

**Цель работы:** изучить содержание, закономерности распределения и условия накопления РЗЭ в углях различных месторождений и бассейнов Северной Азии; оценить основные факторы, определяющие концентрирование РЗЭ в углях.

**Методы исследования:** опробование угольных пластов, месторождений и бассейнов, сформировавшихся в разных геолого-геохимических обстановках; аналитические исследования методом ИНАА, ICP-MS; обработка результатов методами математической статистики.

**Результаты.** Угли северной Азии характеризуются близкими к угольному кларку содержаниями РЗЭ. Более высокие уровни накопления лантаноидов характерны для каменных углей северного Китая, месторождений Хотгор и Хуренгол в Восточной Монголии и Курайского месторождения на юге Сибири. В пределах отдельных бассейнов при околофоновом среднем содержании РЗЭ установлены отдельные угольные пласты или участки пластов, обогащенные лантаноидами. Накопление РЗЭ в угольных пластах обусловлено особенностями состава области питания древнего бассейна торфонакопления, проявлением субсинхронного торфонакопления вулканизма, особенностями гидрогеохимии региона. Эпигенетические процессы приводят к перераспределению РЗЭ, не влияя существенно на их содержание в месторождениях и угольных пластах. Формирование аномалий и комплексных редкометалльных руд обусловлено наличием среди подстилающих отложений специализированных массивов горных пород, обогащенных РЗЭ, или, чаще всего, проявлением субсинхронного угленакопления вулканизма щелочного или кислого состава. Преобразование палеопеплов в условиях агрессивной среды торфяника приводит к выносу и переотложению РЗЭ вблизи тонштейнов с формированием контрастных аномалий. В ряде случаев эти комплексные аномалии могут представлять промышленный интерес.

**Ключевые слова:**

Уголь, Северная Азия, редкоземельные элементы, среднее содержание, закономерности распределения, условия накопления.

## Введение

Редкоземельные элементы играют важную роль в экономике минерального сырья. Помимо традиционных сырьевых источников лантаноидов в качестве потенциально перспективных рассматриваются и угли [1–7].

Первые сведения об аномальных содержаниях группы редких земель в углях опубликованы в 1933 году В.М. Гольдшмидтом и К. Петерсом [8], определивших содержание четных лантаноидов в пробе золы низкосольного (1,5 %) угля Силезского бассейна. После публикации в 1991 году В.В. Серединым [1] данных о редкоземельной минерализации в углях Павловского месторождения (Приморье), а впоследствии – серии работ по аномально редкоземельным углям в других месторождениях [2, 4–7, 9–16], интерес к лантаноидам в угольных месторождениях существенно возрос. В настоящее время выполнена оценка содержания лантаноидов в углях США, Китая и ряде других стран, рассчитано среднее содержание всех индивидуальных редкоземельных элементов в углях мира [17]. На ряде месторождений проведены всесторонние геохимические исследования. Наиболее полное обобщение этих данных приведено в монографии [18]. Детальная характеристика аномальных редкоземельных углей дана в работе [4].

Вместе с тем, несмотря на значительный прогресс в изучении геохимии лантаноидов, не решен целый ряд вопросов, касающихся условий накопления, миграции и фракционирования лантаноидов в углях, форм их нахождения, факторов, контролирующих формирование редкоземельных металлоносных углей.

Настоящая работа посвящена обобщению многочисленных оригинальных данных по геохимии позднепалеозойских углей Северной Азии, полученных авторами в процессе комплексных геохимических исследований на территории этого обширного региона.

## Характеристика объекта исследований

Исследование геохимии редкоземельных элементов в позднепалеозойских углях выполнено на территории азиатской части Российской Федерации, Монголии, Северного Китая (северо-восточные, северо-западные и северные территории) и Казахстана (рис. 1). Выбор объектов изучения определялся задачами исследований, такими как оценка среднего содержания лантаноидов в углях, изучение закономерностей их накопления в угленосных отложениях, оценка влияния различных факторов геологической среды на концентрирование лантаноидов в углях и золах углей, изучение условий концентрирования и фракционирования индивидуальных редкоземельных элементов в геологических процессах, а также определение форм их нахождения в углях разной степени углефикации.

Изучены угольные месторождения Сибири, представленные 5 угольными бассейнами и одним самостоятельным месторождением. В двух бассейнах: Кузнецком и Минусинском, выполнены наиболее детальные геолого-геохимические исследования. В меньшей степени изучены Горловский, Тунгусский и Таймырский бассейны, но и они охарактеризованы достаточно представительными материалами. Общее число изученных проб угля в Сибирском регионе составляет 2339 шт. Сибирский регион представлен каменными углями всех марок вплоть до антрацитов и суперантрацитов. Здесь также установлены развитые по углям контактово-метаморфические графитовые породы.

Впервые представительные геохимические исследования выполнены на территории Монголии. Всего изучено 8 месторождений карбонового и пермского возраста, представленных 240 пробами угля. Своеобразная минерагения и геохимия региона, активная магматическая и вулканическая деятельность сказались и на геохимических особенностях угольных месторождений Монголии.

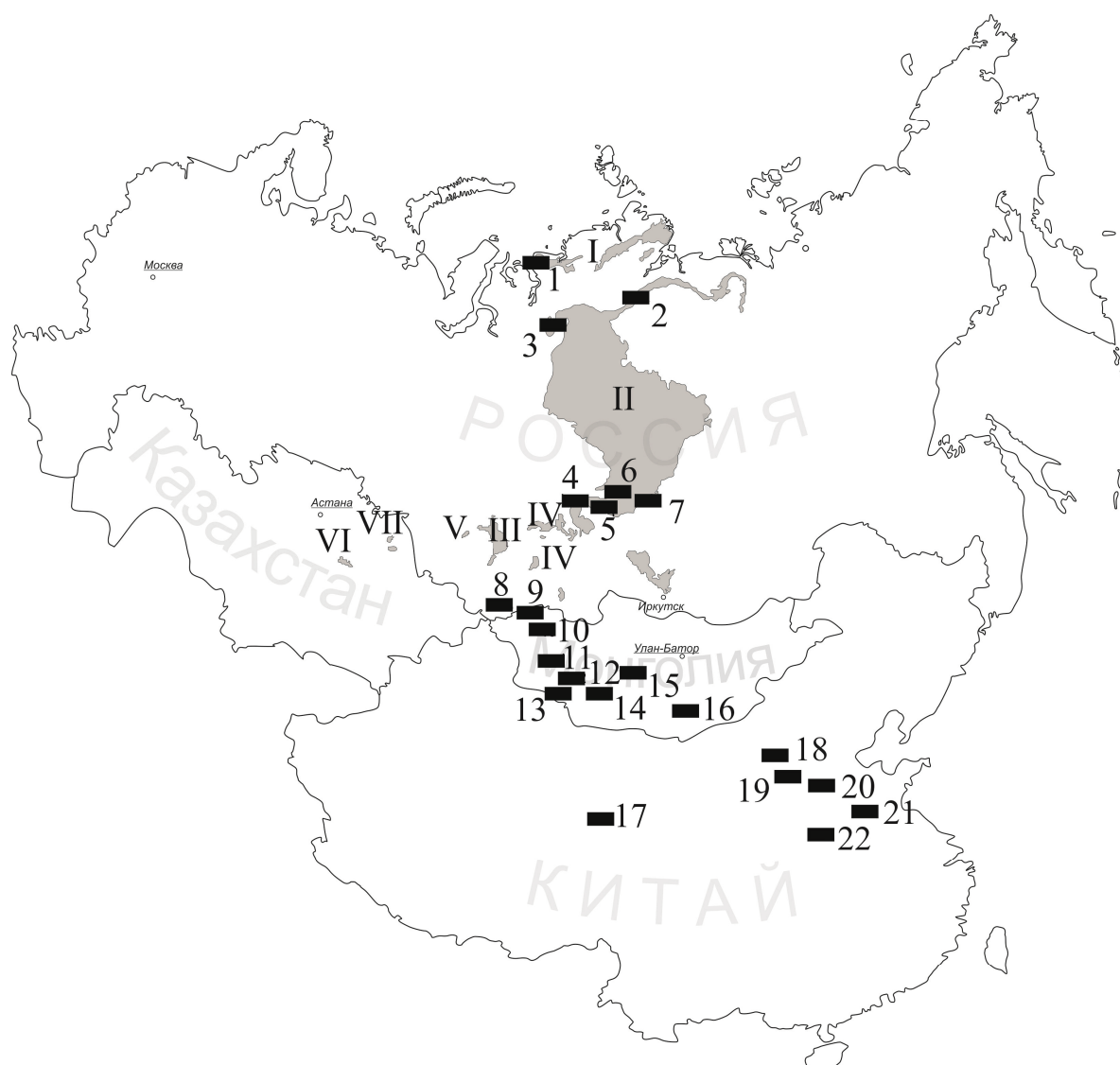
В Китае угли карбон-пермского возраста представлены в основном на северных территориях. Здесь изучено 5 месторождений, в том числе детально опробованы месторождения Нингву и Джунгар. В северо-западном Китае изучено одно месторождение. Полученная информация достаточно представительна. Общее количество проб угля, отобранных на 6 изученных месторождениях северного Китая, составляет 2355.

Небольшой массив данных получен по угленосным отложениям Казахстана. Они представлены углями Экибастузского и Карагандинского бассейнов карбонового возраста. Коллекция проб из месторождений Казахстана предоставлена С.Ю. Калининной, А.Я. Пшеничкиным и С.В. Азаровой.

В исследуемой коллекции проб по территории Северной Азии представлены основные типы углей, образовавшихся в различных геотектонических режимах и фациальных обстановках. Марочный состав изменяется от длиннопламенных углей до антрацитов.

## Методика исследований

Основой для написания статьи являются результаты количественного анализа редкоземельных элементов более чем в 4973 пробах угля и свыше 500 пробах углевмещающих пород различных месторождений. Опробование угольных пластов выполнялось бороздовым методом с дифференцированным отбором проб на угледобывающих предприятиях в разрезах и шахтах, в естественных обнажениях, а также по керну скважин. Длина интервала опробования выбиралась в зависимости от мощности и сложности строения пласта и изменялась в среднем от 0,15 до 2,0 м. Отдельно изучали маломощные угольные пачки, разделенные породными прослоями, сами породные прослои, класти-



**Рис. 1.** Размещение изученных позднепалеозойских угольных бассейнов и месторождений на территории Северной Азии. Бассейны: I – Таймырский; II – Тунгусский; III – Кузнецкий; IV – Минусинский; V – Горловский; VI – Карагандинский; VII – Экибастузкий. Месторождения: 1 – Сарадьсайское; 2 – Каякское; 3 – Кайерканское; 4 – Кокуйское; 5 – Гавриловское; 6 – Кодинское; 7 – Жеронское; 8 – Курайское; 9 – Нурс Хотгор; 10 – Хаар Тарвагатай; 11 – Хундлун; 12 – Хуренгол; 13 – Маньт; 14 – Зээгт; 15 – Увур-Чулуут; 16 – Таван-Толгой; 17 – Шихьюгоу; 18 – Джунгар; 19 – Нингву; 20 – Ханхин; 21 – Яншоу; 22 – Сонгшан

**Fig. 1.** Locations of the studied Late Paleozoic coal basins and deposits in northern Asia. Basins: I – Taymyrsky; II – Tungusky; III – Kuznetsky; IV – Minusinsky; V – Gorlovsky; VI – Karagandinsky; VII – Ekibastus. Deposits: 1 – Saradysaiskoe; 2 – Kayakskoe; 3 – Kayerkansko; 4 – Kokuyskoe; 5 – Gavrilovskoe; 6 – Kodinskoe; 7 – Zheronskoe; 8 – Kurayskoe; 9 – Nurs Khotgor; 10 – Khaar Tarvagatay; 11 – Khundlun; 12 – Khurengol; 13 – Mant; 14 – Zeegt; 15 – Uvur-Chuluut; 16 – Tavan-Tolgoy; 17 – Shikhui-gou; 18 – Jungar; 19 – Ningwu; 20 – Hanxing; 21 – Yanzhou; 22 – Songshan

ческие «дайки», сульфидные включения, карбонатные конкреции и другие минеральные образования. В отдельных сечениях выполнялась детализация разреза с интервалом отбора проб 0,5–10 см. Изменчивость содержания редкоземельных элементов по латерали оценивалась на основании сети разрезов по пласту.

Определение содержания La, Ce, Nd, Sm, Eu, Tb, Yb и Lu во всех пробах, отобранных на террито-

рии Российской Федерации, Казахстана и Монголии, выполнено инструментальным нейтронно-активационным анализом (ИНАА) непосредственно в угле без предварительного концентрирования с целью избежать потерь некоторого количества металла при озолении. Одновременно их содержание определялось и в золе угля. Лабораторное определение РЗЭ в углях, золах углей и породах производилось в Ядерно-геохимической лаборатории ка-



федры геоэкологии и геохимии Национального исследовательского Томского политехнического университета (ЯГЛ ТПУ) (исполнитель – А.Ф. Судыко). Облучение проб нейтронами выполнено на исследовательском ядерном реакторе ИРТ-Т Научно-исследовательского института ядерной физики ТПУ. Для определения содержания использовали метод инструментального нейтронно-активационного анализа (ИНАА) из навески 200 мг для угля и 100 мг для золы угля и углевмещающих пород. Пределы обнаружения индивидуальных РЗЭ в углях методом ИНАА – от 0,01 г/т (Sm, Eu, Yb, Lu) до 0,05 г/т (Ce, Tb). Для части проб выполнено параллельное определение полного комплекса РЗЭ в угле и золе угля масс-спектрометрическим методом с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS) в аналитическом центре Дальневосточного геологического института, г. Владивосток (аналитик – Е.В. Еловский) и в химико-аналитическом центре «Плазма», г. Томск (исполнитель – Н.В. Федюнина). Все лаборатории аккредитованы. Анализ лантаноидов методом ICP-MS выполнен в соответствии с ГОСТ Р 54237–2010 (ASTM D 6349–2008). Сходимость результатов различных методов анализа удовлетворительная (табл. 1).

**Таблица 1.** Сравнение результатов определения содержания лантаноидов методами ICP-MS и INAA

**Table 1.** Comparison of the lanthanides determination results by ICP-MS and INAA methods

Элементы Elements	Дв-9-02		Дв-10-02		Дв-18-02	
	ICP-MS	INAA	ICP-MS	INAA	ICP-MS	INAA
La	1,3	1,7	18,2	19,5	52,7	64,0
Ce	2,5	3,2	34,8	47,8	110,7	116,1
Sm	0,27	0,39	1,60	2,1	8,0	11,9
Eu	0,066	0,12	0,23	0,40	1,0	1,5
Tb	0,063	0,10	0,15	0,15	0,47	0,39
Yb	0,37	0,45	0,45	0,48	0,35	0,48
Lu	0,061	0,10	0,063	0,09	0,045	0,079

**Таблица 2.** Определение РЗЭ в стандартных образцах

**Table 2.** Determination of REEs in CRMs

Элементы Elements	Стандартный образец/CRM					
	JG-3		БИЛ-1/BIL-1		ЗУК-2/ZUK-2	
	1	2	1	2	1	2
La	20,6±2,2	19,4±1,4	45±6	43,2±0,8	20±2	20,8±0,6
Ce	40,3±4,8	41,1±2,2	80±5	71,1±3,6	37±5	39,5±1,9
Nd	17,2±1,8	15,3±2,8	39±5	38,4±2,2	17±1	19,7±0,8
Eu	0,90±0,08	0,91±0,02	1,4±0,2	1,35±0,04	(0,8±0,2)	0,69±0,02
Sm	3,39±0,44	3,30±0,08	7±1	7,0±0,2	3,2±0,2	3,28±0,11
Tb	0,46±0,05	0,44±0,01	0,9±0,1	0,89±0,06	0,45±0,06	0,46±0,04
Yb	1,77±0,35	1,56±0,06	2,9±0,4	2,68±0,10	1,5±0,2	1,64±0,09
Lu	0,26±0,05	0,26±0,01	0,40±0,05	0,40±0,01	0,26±0,02	0,26±0,01

Примечание: 1 – паспортные данные; 2 – результаты ИНАА; в скобках – предварительные данные; JG-3 – гранодиорит; БИЛ-1 – ил оз. Байкал; ЗУК-2 – зола угля Канско-Ачинского бассейна.

Note: 1 are the certified data; 2 are the results of the INAA; Preliminary data are in brackets. JG-3 are the granodiorite; BIL-1 is the silt of the Baikal Lake; ZUK-2 is the ash of the Kansk-Achinsk coal.

Для контроля выполняли параллельное определение РЗЭ в углях и золах углей, с соответствующими пересчетами содержаний в золе на уголь и наоборот. Качество нейтронно-активационного анализа контролировалось по различным стандартам золы угля и горных пород, в том числе по стандарту ЗУК-2 (зола угля Канско-Ачинского бассейна) (табл. 2).

Образцы углей из месторождений Китайской Народной Республики отбирались штучным способом и по керну скважин. Штуф вырезался в форме куба с размером стороны 10 см. Пробы вырезались из массива по фронту горных выработок в соответствии с китайским стандартом GB482–2008. Пробы керна отбирались из кернохранилищ эксплуатирующих месторождение компаний.

Все пробы северного Китая проанализированы масс-спектрометрическим методом с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS) в Центральной лаборатории геологоразведки ресурсов провинции Хебей, Аналитической лаборатории Пекинского научно-исследовательского института по геологии урана и в Исследовательском центре Шаньдунского бюро Китайского металлурго-геологического управления. Для ICP-MS-анализа в КНР было применено микроволновое разложение проб: навески 200 мг с крупностью частиц меньше 40 мкм помещались в тефлоновые сосуды, после чего добавлялась смесь кислот с перекисью водорода в соотношении 2 мл HF (50 %): 5 мл HNO<sub>3</sub> (65 %): 2 мл H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (30 %). Затем выполнялось разложение проб в течение 1 ч при 210 °С. Получаемый раствор количественно переносился в ФЕР-тефлоновую тару на 125 мл, наполненную 100 мл деионизированной воды (тип I).

Оценка среднего содержания индивидуальных лантаноидов в углях выполнялась путем последовательного усреднения данных. Средние содержания РЗЭ в угольных пластах рассчитывались как средневзвешенные по мощности интервалов опробования, в месторождениях – как средневзвешен-

ные по мощности пластов, а в бассейнах – как средневзвешенные по массе (ресурсам) угля в месторождениях [19].

Для углей Монголии и Казахстана оценки среднего для основных эпох угленакопления выполнены с меньшей достоверностью в связи с малой представительностью опробования бассейнов и месторождений. В связи с этим полученные данные следует рассматривать как предварительные.

Расчеты средних содержаний РЗЭ в углях северного Китая выполнены с применением методов математической статистики с определением закона распределения. Большой массив использованных данных позволяет считать полученные оценки средних содержаний достаточно представительными.

Выбранный комплекс аналитических методов позволяет с высокой надежностью оценить содержание, закономерности распределения и условия концентрирования редкоземельных элементов в углях.

### Результаты исследований и их обсуждение

Содержание РЗЭ в угле и золе угля

Угли карбон-пермского возраста Северной Азии характеризуются содержаниями лантаноидов, сопоставимыми со средней оценкой для углей США и с угольным кларком (табл. 3), хотя и несколько выше их. Различие обусловлено двумя факторами: несколько более высокой средней зольностью изученных углей (18,1 %) по сравнению с углями США (13,1 %) и аномально повышенным содержанием редкоземельных элементов в углях северного Китая.

О влиянии зольности на содержание элементов в углях свидетельствует сравнение содержания РЗЭ в золах углей сопоставляемых регионов. В первом случае сумма 7 изученных лантаноидов составляет 308,6 г/т, во втором – 278,5 г/т. Кроме того, роль зольности подтверждается и результатами корреляционного анализа. Содержание РЗЭ в углях имеет значимую положительную корреляционную связь с зольностью.

Сказывается и влияние аномальных углей Китая на оценку среднего содержания РЗЭ в углях Северной Азии. Здесь сумма семи изученных РЗЭ в среднем составляет 109 г/т, а в месторождении Сонгшан достигает 207 г/т. Китайские угли в целом обогащены РЗЭ в сравнении с другими регионами мира. Рассчитанные средние содержания РЗЭ для углей карбон-пермского возраста Северной Азии значительно ниже, чем средние данные для всех углей Китая (табл. 3). По мнению китайских специалистов [20], высокие содержания РЗЭ в углях Китая связаны не только с повышенной их зольностью, но и наличием в углях сингенетичных пепловых горизонтов щелочного состава, найденных в угольных пластах на юго-западе страны.

Отмечены значительные вариации содержания редкоземельных элементов в карбон-пермских углях Северной Азии. Сумма семи изученных во всех угольных месторождениях лантаноидов коле-

блется от 25,6 г/т (Карагандинский бассейн) до 207 г/т (месторождение Сонгшан) (табл. 1). Повышено содержание лантаноидов в углях месторождений Шихьюгоу, Хан-Хинг и Джунгар в Северном Китае (99–108 г/т). В Сибири аномальны угли Курайского месторождения (91 г/т). Среди месторождений Монголии наиболее богаты РЗЭ угли месторождения Нурст Хотгор (63,5 г/т) и высокозольные угли месторождения Хуренгол (74,2 г/т).

Это усредненная оценка. На отдельных участках содержание может существенно отличаться от средних данных. В Минусинском бассейне и в Кузбассе имеют место участки пластов с содержанием РЗЭ в золе угля до 0,1–0,3 % [9, 10]. Аномально редкоземельные угли карбон-пермского возраста на территории Северной Азии встречаются достаточно часто. Однако аномалии эти обычно не контрастны и, как правило, локальны, что не позволяет рассматривать их как самостоятельное сырье на лантаноиды. Впервые локальные аномалии РЗЭ в каменных углях выявлены и описаны в Черногорском месторождении Минусинского бассейна [23]. При исследовании германиеносных углей месторождения Ю.И. Горький выявил в отдельных пробах зола угля до 0,5 % La и 0,01 % Yb.

Закономерности распределения РЗЭ

Закономерности латерального распределения РЗЭ в углях достаточно сложно поддаются анализу. РЗЭ неравномерно распределены в углях как в целом по региону, так и в пределах отдельных бассейнов. Региональные закономерности выражены в обогащении в целом углей в районах, геохимически специализированных на РЗЭ. К таковым можно отнести угольные месторождения Северного Китая, Восточной Монголии, Курайское месторождение и Минусинский бассейн в Сибири.

В пределах бассейнов и месторождений латеральная изменчивость проявлена менее отчетливо. Так, в Кузбассе сумма РЗЭ в углях разных геолого-экономических районов различается в 2–5 раз. При этом природа таких различий связана с разными стратиграфическими уровнями изученных угленосных районов [9]. Исследование в пределах отдельного угольного пласта на юге Кузбасса показало, что на достаточно значительном расстоянии содержание изменяется слабо, увеличиваясь в целом с запада на восток.

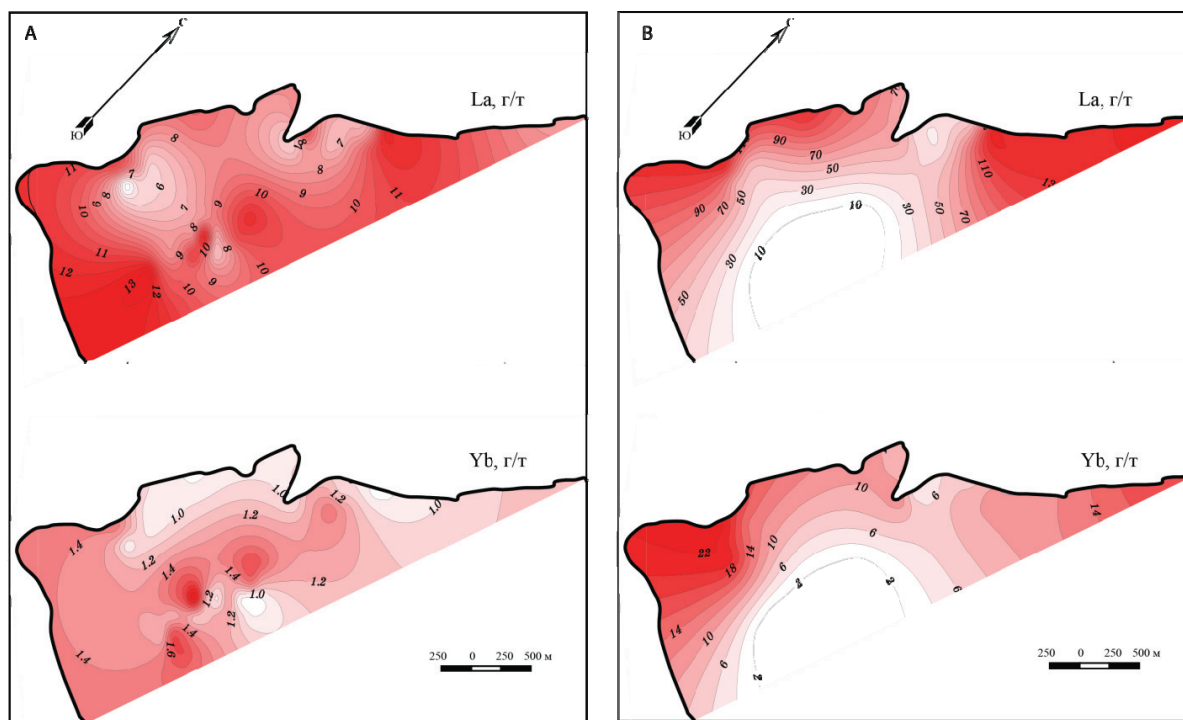
Исследование латеральной изменчивости содержаний РЗЭ в углях в границах отдельных пластов в Минусинском бассейне показало отсутствие ярко выраженных закономерностей латерального распределения [10]. В то же время в золах углей содержания отчетливо снижаются от периферии месторождения к центру (рис. 2). Эти факты указывают на определенную роль водных растворов в накоплении РЗЭ в углях, влияние фактора петрофлоры на их накопление. Подобные закономерности распределения характерны для многих, особенно для углефильных, элементов [18].

**Таблица 3.** Содержание редкоземельных элементов в С-Р углях Северной Азии (Сибирь, Казахстан, Монголия, Северный Китай)  
**Table 3.** Contents of rare earth elements in C-P coals of North Asia (Siberia, Kazakhstan, Mongolia, northern China)

Бассейн/ месторождение Coal basin/deposit	Количество проб Samples number	A <sup>d</sup> , %	Содержание элементов, г/т Content of elements, ppm							La/Yb
			La	Ce	Sm	Eu	Tb	Yb	Lu	
<b>Сибирь/Siberia</b>										
Горловский/Gorlovsky	24	7,0	8,2±1,4	21,0±2,7	1,8±0,2	0,39±0,06	0,19±0,04	0,77±0,15	0,18±0,03	10,6
Кузнецкий/Kuznetsky	1394	13,5	12,3±0,6	24,7±0,9	2,6±0,1	0,64±0,03	0,43±0,03	1,30±0,05	0,34±0,06	9,5
Минусинский Minusinsky	648	16,4	13,2±2,0	29,0±5,8	2,1±0,3	0,62±0,10	0,45±0,08	1,18±0,16	0,34±0,09	11,2
Тунгусский/Tungusky	206	12,8	9,2±2,2	21,1±5,8	1,9±0,6	0,47±0,08	0,37±0,10	0,88±0,14	0,21±0,06	10,5
Таймырский/Тауырскы	55	24,4	14,5±1,1	33,7±2,4	2,4±0,2	0,58±0,05	0,43±0,04	1,4±0,1	0,20±0,02	10,4
Курайское/Курaysкое	12	25,2	38,2±7,5	44,1±7,9	4,8±0,7	1,5±0,2	0,75±0,11	2,0±0,3	0,5±0,1	19,1
Среднее/Average	2339	14,8	11,5±1,2	25,9±2,4	2,2±0,2	0,54±0,05	0,37±0,05	1,11±0,12	0,25±0,04	10,4
<b>Казахстан/Kazakhstan</b>										
Угли карбонового возраста/Coals of Carboniferous age										
Карагандинский Karagandinsky	5	13,5	6,0±1,0	15,2±3,2	2,0±0,4	0,63±0,12	0,41±0,10	1,1±0,3	0,22±0,03	5,5
Экибастузский/Ekibaztus	44	36,9	12,3±0,7	29,6±2,1	2,9±0,2	0,80±0,04	0,56±0,04	2,1±0,2	0,37±0,03	5,9
Среднее/Average	49	25,2	9,2	22,4	2,5	0,72	0,49	1,6	0,30	5,7
<b>Монголия/Mongolia</b>										
Угли карбонового возраста/Coals of Carboniferous age										
Нурс Хотгор Nurs Khotgor	94	18,2	18,9±1,9	39,1±2,7	2,7±0,2	0,43±0,02	0,41±0,03	1,7±0,1	0,23±0,02	11,1
Хаар Тарвагатай Khaar Tarvagatai	10	18,7	13,1±1,0	36,2±2,9	3,6±0,3	0,49±0,03	0,37±0,03	1,3±0,1	0,23±0,03	10,1
Хундулун/Khundlun	8	9,4	8,1±1,7	26,1±5,7	1,8±0,2	0,34±0,04	0,23±0,03	0,58±0,06	0,097±0,010	14,0
Зээгт/Zeegt	10	12,5	5,1±1,0	15,4±3,5	0,68±0,13	0,18±0,03	0,12±0,02	0,44±0,07	0,075±0,013	11,6
Среднее/Average	122	14,7	11,3±3,0	29,2±5,4	2,2±0,6	0,36±0,07	0,028±0,07	1,0±0,3	0,16±0,04	11,3
Угли пермского возраста/Coals of Permian age										
Таван-Толгой Tavan-Tolgoi	10	9,8	5,5±0,5	12,8±1,0	1,0±0,1	0,17±0,01	0,11±0,01	0,46±0,04	0,065±0,006	12,0
Манть/Mant	16	20,2	12,4±1,3	29,8±2,6	2,7±0,2	0,61±0,05	0,51±0,04	1,4±0,1	0,20±0,02	8,9
Увур-Чулут/Uvur-Chulut	5	16,7	10,6±2,8	22,7±4,6	2,5±0,4	0,63±0,20	0,38±0,08	1,6±0,3	0,24±0,05	6,6
Хуренгол/Khurengol	87	38,7	21,9±1,2	46,0±2,5	3,4±0,2	0,65±0,05	0,40±0,02	1,6±0,1	0,23±0,01	13,7
Среднее/Average	118	21,4	12,6±3,4	27,8±7,0	2,4±0,5	0,52±0,12	0,35±0,09	1,3±0,3	0,18±0,04	9,7
<b>Северо-западный Китай/Northwestern China</b>										
Угли карбонового возраста/Coals of Carboniferous Age										
Шихьюгоу/Shihuigou	21	13,4	30,8	59,1	5,4	1,1	0,7	1,7	0,32	18,1
<b>Северный Китай/Northern China</b>										
Угли карбон-пермского возраста/Coals of Carboniferous-Permian age										
Хан-Хинг/Han-Xing	167	12,43	33,6	58,2	4,55	0,88	0,6	1,98	0,31	16,9
Джунгар/Jungar	1038	18,3	34,8	64,5	4,49	0,87	0,65	2,12	0,32	16,4
Нингву/Ningwu	1046	18,6	23,0	39,5	3,13	0,57	0,53	1,55	0,23	14,8
Сонгшан/Songshan	10	21,2	44,5	116,9	30,7	6,05	3,24	4,62	0,6	9,6
Яншоу/Yanzhou	73	23,5	21,2	37,1	3,3	0,7	0,4	1,2	0,2	19,6
Среднее/Average	2334	18,8	31,4	63,2	9,2	1,81	1,08	2,30	0,33	15,5
Среднее для С-Р Северной Азии Average for C-P North Asia	4983	18,1	16,8	33,6	2,8	0,63	0,43	1,4	0,2	12,0
Среднее для США <sup>1</sup> Average for US <sup>1</sup>	>5000	13,1	12,0	21,0	1,7	0,40	0,3	0,95	0,14	12,6
Среднее для Китая <sup>2</sup> Average for China <sup>2</sup>	392	–	22,5	46,7	4,07	0,84	0,62	2,08	0,38	10,8
Угольный кларк <sup>3</sup> Clark for coals <sup>3</sup>	8400	–	11,0	23,0	2,0	0,47	0,32	1,0	0,20	11,0
Кларк для земной коры <sup>4</sup> Clark for the Earth Crust <sup>4</sup>	–	–	32,0	63,0	5,7	1,3	0,89	2,5	0,51	12,8

Примечание: – нет данных; 1 – по [21]; 2 – [20]; 3 – [17]; 4 – [22].

Notes: – no data; 1 – by [21]; 2 – [20]; 3 – [17]; 4 – [22].



**Рис. 2.** Распределение лантана и иттербия в угле (А) и золе угля (В) пласта Двухаршинный Черногорского месторождения (Минусинский бассейн)

**Fig. 2.** Lanthanum (La) and ytterbium (Yb) distribution in coal (A) and coal ash (B) of the Dvukharshiny seam of the Chernogorskoe deposit (Minusinsky basin)

Вертикальная изменчивость при этом проявлена более ярко. В разрезе угленосной толщи Кузбасса и в Минусинском бассейне в пределах серий отмечено отчетливо выраженное увеличение содержания суммы РЗЭ от нижних свит к верхним [9, 10]. Лантан-иттербиевое отношение при этом также возрастает, указывая на преимущественно кластогенный механизм поступления РЗЭ в угли.

В пределах единичного угольного пласта распределение лантаноидов весьма разнородно и определяется ролью различных факторов, ответственных за накопление РЗЭ в углях. При отсутствии следов субсинхронного вулканизма в угольном пласте проявляется «закон Зильберминца», выраженный в накоплении наиболее высоких содержаний РЗЭ в верхней и нижней части угольного пласта в прикровельной и припочвенной зонах (рис. 3). В этих зонах отмечено резкое понижение лантан-иттербиевого отношения. Такой характер распределения указывает на участие в накоплении РЗЭ в углях водорастворимых форм лантаноидов.

В случае наличия в угольном пласте субсинхронного древнему торфонакоплению пеплового материала кислого или щелочного состава в разрезе пласта вблизи тонштейнов формируются ярко выраженные аномалии лантаноидов (рис. 4). Контрастность аномалий определяется составом пеплового материала, а их число – периодичностью древних извержений. На рис. 4 отмечены 2 аномалии, связанные с тонштейнами, и 2 приконтакто-

вые гидрогенные аномалии.

В других случаях при наложении различных факторов накопления распределение РЗЭ в колонке угольного пласта может быть весьма сложным.

Условия накопления РЗЭ в углях

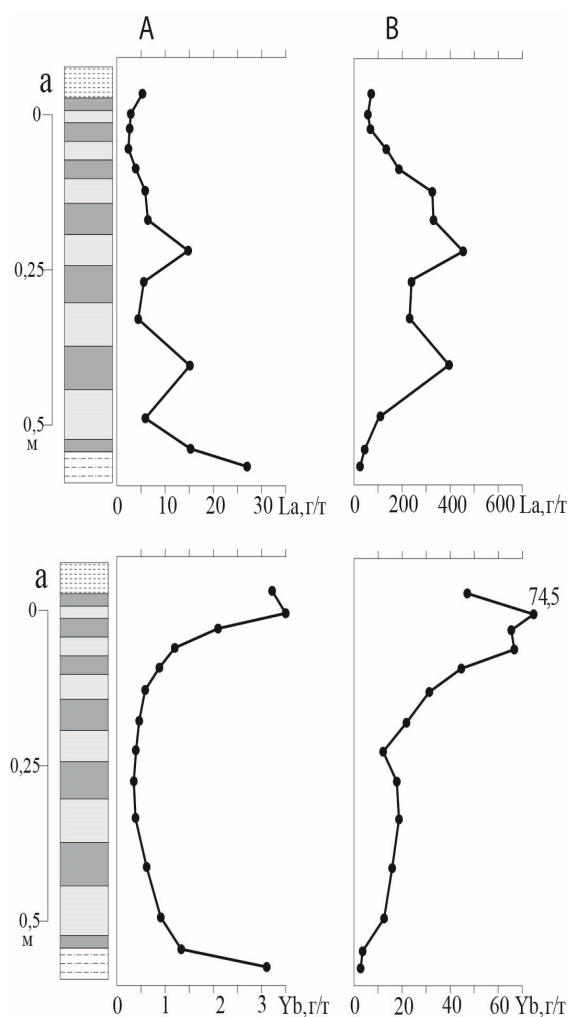
Природа накопления РЗЭ в углях разнообразна. Всегда проявлена роль фактора петрофонда, обычно определяющего фоновые уровни их накопления. Одновременно в этом процессе участвует и гидрогеохимический фактор, с которым связано поступление водорастворимых форм лантаноидов, обуславливающих накопление повышенных их концентраций на периферии месторождений, в приконтактных зонах угольных пластов. Важнейшим фактором накопления является также проявление субсинхронного вулканизма, приводящего нередко к формированию в каменных углях комплексных редкометалльных аномалий [6, 10, 11, 20]. В редких случаях аномалии РЗЭ в каменных углях могут быть связаны с гидротермальными процессами [20].

В.В. Середин [24] на основе нормирования содержаний РЗЭ в углях к средним данным для углей США и к NASC (стандарт североамериканских сланцев) выделил четыре основных типа распределения РЗЭ в углях: N, L, M и H. В дальнейшем методика была несколько модифицирована путем нормирования содержаний элементов в углях к их кларку в верхней континентальной зем-



ной коре [4]. Эта классификация широко используется в настоящее время, так как позволяет в первом приближении оценить природу накопления лантаноидов в углях. Предполагается, что угли с N- и L- типами распределения формируются при привносе большей части РЗЭ с терригенным материалом, а угли с M- и H-типами распределения – при поступлении основной части РЗЭ с водными растворами.

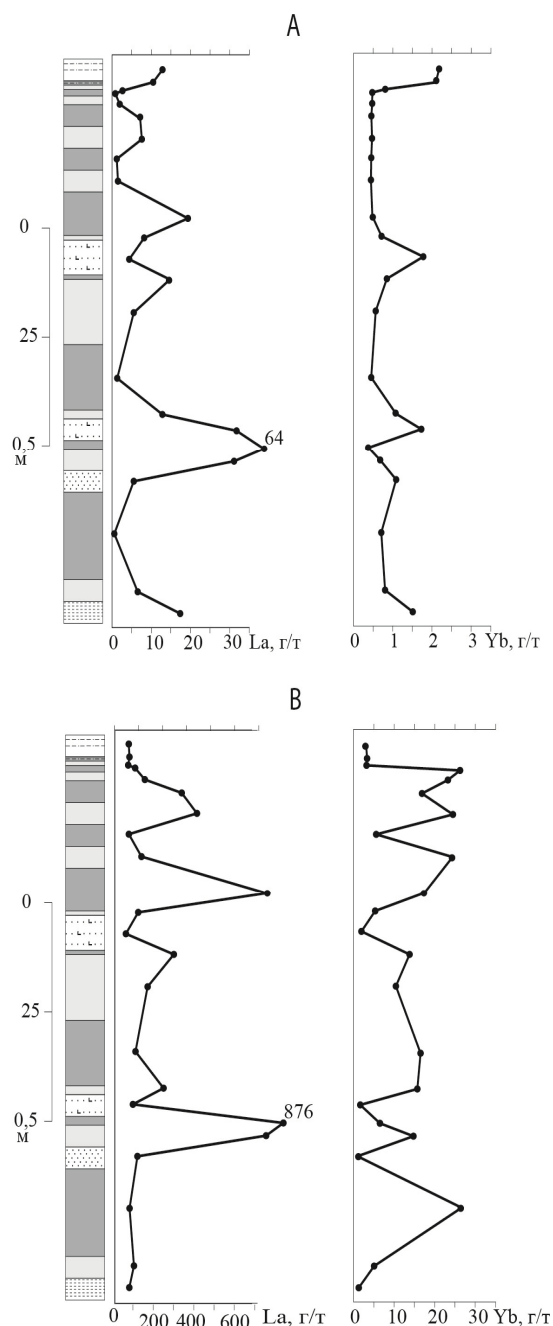
ных масс избыточной влаги, температуры достигают 200 °С и более, а сами пластовые воды насыщаются органическим веществом и углекислотой. В совокупности эти факторы благоприятствуют миграции лантаноидов и, следовательно, могут привести к существенному перераспределению и даже выносу их за пределы угольного пласта.



**Рис. 3.** Распределение лантана и иттербия в угле (А) и золе угля (В) в разрезе пласта I (Сибиргинское месторождение, Кузбасс)

**Fig. 3.** Distribution of lanthanum (La) and ytterbium (Yb) in coal (A) and coal ash (B) by the vertical sections of the coal seam I of the Sibirginskoe deposit (Kuzbass)

Для карбон-пермских углей Северной Азии установлены все четыре типа распределения РЗЭ, как в чистом виде, так и смешанные. Генетический смысл, заложенный в эти модели, основан на представлениях о формах миграции РЗЭ и на различной подвижности тяжелых и легких лантаноидов в зоне гипергенеза. Следует с осторожностью относиться к интерпретации этих данных для каменных углей, так как в процессе углеобразования происходит внутрислоистовая миграция значитель-



**Рис. 4.** Распределение лантана и иттербия в угле (А) и в золе угля (В) в разрезе пласта Двухаршинный (Черногорское месторождение, Минусинский бассейн)

**Fig. 4.** Distribution of lanthanum (La) and ytterbium (Yb) in coal (A) and coal ash (B) by the vertical sections of the coal seam Dvukharshinnyy of the Chernogorskoe deposit (Miusinskii basin)

На сложные процессы распределения РЗЭ в углях указывают результаты детальных геохимических исследований колонки угольного пласта. С этой целью были изучены угольные пласты однородного строения и пласты с партингами, в том числе с горизонтами тонштейнов. В разрезе сравнительно маломощного пласта Двухаршинный (1,1 м) Минусинского бассейна с двумя тонштейнами исследования показали наличие сразу нескольких типов распределения РЗЭ (рис. 5).

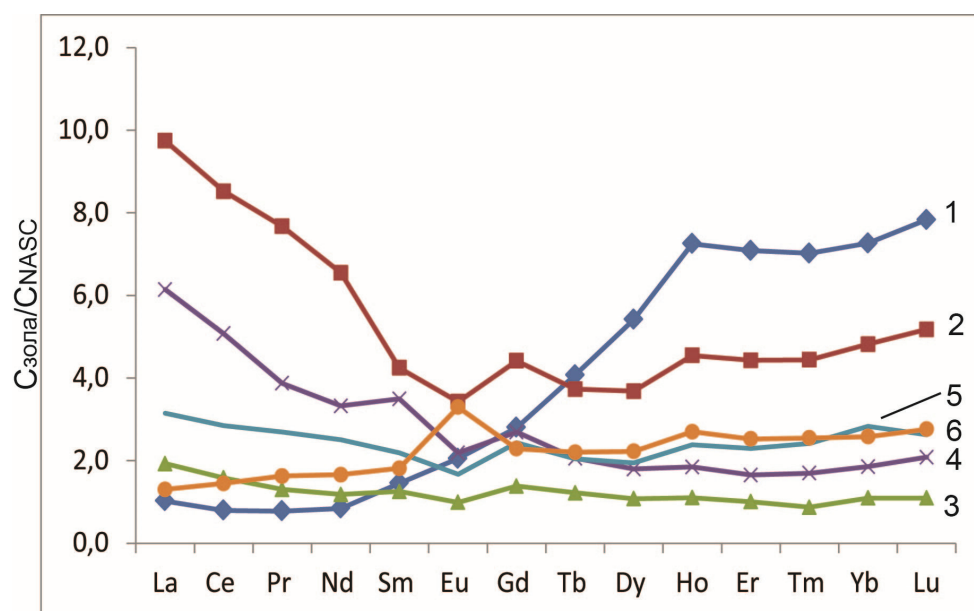
Из этих данных следует, что современное распределение РЗЭ слабо отражает механизм исходного их накопления в углях. Здесь сказываются процессы перераспределения, обусловленные интенсивным преобразованием палеоторфяника в бурый, а затем в каменный уголь. Тем не менее, детальное исследование угольных пластов позволяет выделить и оценить роль основных факторов накопления РЗЭ в углях.

Факторы, контролирующие накопление РЗЭ в углях

*Фактор петрофонда*, как правило, имеет значение для всех угольных месторождений и определяет геохимический фон РЗЭ в углях. Угольные месторождения, залегающие вблизи массивов горных пород, обогащенных РЗЭ, также обогащены ими. Доказательством сингенетичного накопления лантаноидов в связи с фактором петрофонда могут быть факты наличия аномалий в современных торфяниках, залегающих вблизи массивов

горных пород, обогащенных РЗЭ. Имеются немногочисленные данные об аномальном накоплении лантаноидов в современных торфяниках. Показательны результаты финских исследователей, изучивших 399 образцов торфа из 26 болот Финляндии, залегающих на гранитах и архейских сланцах [25]. Полученные данные показывают отчетливо выраженную связь содержания лантаноидов с составом подстилающих пород. Наиболее высокие концентрации изученных редкоземельных элементов (La, Ce, Pr, Nd, Sm и Y) установлены в торфах, залегающих на гранитах рапакиви, наименьшие – на архейских гнейсах. При этом максимумы концентраций тяготеют к основанию торфяной залежи. Сумма изученных лантаноидов в золе торфа, залегающего на гранитах рапакиви, в среднем составляет 1288 г/т при частных значениях для индивидуальных лантаноидов, достигающих для La – 1268 г/т, Ce – 2598 г/т, Pr – 294 г/т, Nd – 1766 г/т, Sm – 401 г/т, Y – 3465 г/т. Эти значения существенно превышают содержания РЗЭ в подстилающих породах, что указывает на избирательное накопление РЗЭ органическим веществом торфа.

Этим фактором можно объяснить в целом повышенный фон РЗЭ в углях северного Китая, в месторождениях восточной Монголии, Курайского месторождения на юге Сибири. Все они имеют пространственную связь с доугольными редкометалльными щелочными гранитоидами. Согласно данным исследования углей Северного Китая [26], со-



**Рис. 5.** Нормированные кривые распределения РЗЭ в золе угля пласта Двухаршинный (Черногорское месторождение, Минусинский бассейн). Нормировано на NASK. 1 – верхняя часть пласта (2,5 см от кровли); 2 – верхняя часть пласта (3–15 см от кровли); 3 – уголь над тонштейном; 4 – уголь под тонштейном; 5 – средняя часть пласта (48 см от кровли); 6 – нижняя часть пласта (5 см от подошвы)

**Fig. 5.** Normalized curves of REEs distribution in coal ash of the Dvukharshinny seam of the Chernogorskoe deposit (Minusinskiy basin). Normalized to NASK. 1 is the upper layer (2,5 cm from the top); 2 is the upper part of the seam (3–15 cm from the top); 3 is the coal over tonstein; 4 is the coal under tonstein; 5 is the middle part of the seam (48 cm from the top); 6 is the lower seam portion (5 cm from the base)

держание РЗЭ в месторождениях отчетливо связано с расстоянием до источника питания бассейна угленакопления.

*Фактор синхронного вулканизма.* На фоне рядовых или повышенных содержаний РЗЭ в углях в угольных пластах могут возникать контрастные аномалии, связанные с выпадением синхронного с формированием палеоторфяника пеплового материала щелочного или, в меньшей степени, кислого состава. Эти вулканогенные продукты в процессе преобразования пепла в агрессивной среде торфяника впоследствии формируют достаточно контрастные аномалии в углях вблизи тонштейнов [10, 11, 14, 27] (рис. 4). Их вклад может быть весьма значителен. В отдельных случаях за счет них формируются редкометалльно-угольные месторождения [3–7, 12, 20, 28–30]. В карбон-пермских углях факты наличия пеплового материала установлены повсеместно, часто они представлены пеплами кислого или щелочного состава, что позволяет рассматривать субсинхронный вулканизм в качестве одного из ведущих факторов накопления РЗЭ в углях [11]. Согласно выводам китайских коллег [20], все значимые проявления РЗЭ в китайских углях связаны с субсинхронным вулканизмом.

*Эпигенетические факторы.* Под этими факторами в данном случае понимаем факты накопления в углях РЗЭ за счет внешнего источника после формирования угольного пласта и факты перераспределения РЗЭ в процессе углефикации. Согласно данным китайских исследователей [20], формирование сколько-нибудь значимых концентраций РЗЭ в каменных углях в связи с гидротермальными процессами не установлено. Отмечено уменьшение содержания Се, La, Eu и Lu при удалении от контакта с гранитами с проявленной гидротермальной минерализацией.

Гипергенное окисление каменных углей также не сопровождается сколько-нибудь значительными накоплениями РЗЭ. Из-за слабой подвижности этих элементов-гидролизатов в зоне гипергенеза отмечено возрастание их содержания в окисленных углях одновременно с ростом зольности [10, 11].

Угольный метаморфизм не приводит к сколько-нибудь значительным изменениям содержания РЗЭ в углях [11]. Лишь антрациты обеднены лантаноидами по сравнению с углями других марок. Кроме того, угольный метаморфизм приводит к значительным потерям отдельных, более подвижных в данных условиях, чем лантаноиды, элементов-примесей, что в ряде случаев обуславливает некоторое

увеличение содержания РЗЭ. Примером тому служит несколько более высокий угольный кларк для каменных углей по сравнению с бурыми [17].

Контактный метаморфизм при внедрении Сыркашевского силла диабазовых порфиритов в угленосные отложения в Кузбассе также не сопровождается значимыми изменениями содержания РЗЭ [11]. Аналогичные результаты получены при исследовании углей, подвергшихся контактовому воздействию силлов и даек лампрофиров и сиенитовых порфиров в восточном Китае [31].

Следовательно, эпигенетические процессы преобразования каменных углей карбона-перми Северной Азии в массе не приводят к сколько-нибудь существенным изменениям содержания РЗЭ в углях.

### Выводы

Угли Северной Азии характеризуются несколько повышенными, но близкими к угольному кларку содержаниями РЗЭ. Более высокие уровни накопления лантаноидов характерны для каменных углей Северного Китая, месторождений Хотгор и Хуренгол в Восточной Монголии и Курайского месторождения на юге Сибири. В пределах отдельных бассейнов при околофоновом среднем содержании РЗЭ установлены отдельные угольные пласты или участки угольных пластов, обогащенные лантаноидами.

Накопление РЗЭ в угольных пластах обусловлено особенностями состава области питания древнего бассейна торфонакопления, проявлением субсинхронного торфонакопления вулканизма, особенностями гидрогеохимии региона. Эпигенетические процессы приводят к перераспределению РЗЭ, не влияя существенно на их среднее содержание в месторождениях и угольных пластах.

Формирование аномалий и комплексных редкометалльных руд обусловлено наличием среди подстилающих отложений специализированных массивов горных пород, обогащенных РЗЭ, или, чаще всего, проявлением субсинхронного угленакопления вулканизма щелочного или кислого состава. Преобразование палеопеплов в условиях агрессивной среды торфяника приводит к выносу и перетолжению РЗЭ вблизи тонштейнов с формированием достаточно контрастных аномалий. В ряде случаев эти комплексные аномалии могут представлять промышленный интерес.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 16-55-53122 ГФЕН<sub>а</sub> и № 16-05-00405А.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Середин В.В. О новом типе редкоземельного оруденения кайнозойских угленосных впадин // Доклады АН СССР. – 1991. – Т. 320. – № 6. – С. 1446–1450.
2. Seredin V.V. Rare earth element-bearing coals from the Russian Far East deposits // International Journal of Coal Geology. – 1996. – V. 30. – P. 101–129.
3. Seredin V.V., Finkelman R.B. Metalliferous coals: a review of the main genetic and geochemical types // International Journal of Coal Geology. – 2008. – V. 76. – P. 253–289.
4. Seredin V.V., Dai S. Coal deposits as potential alternative sources for lanthanides and yttrium // International Journal of Coal Geology. – 2012. – V. 94. – P. 67–93.
5. Coal deposits as promising sources of rare metals for alternative power and energy-efficient technologies / V.V. Seredin, S. Dai, Y. Sun, I.Yu. Chekryzhov // Applied Geochemistry. – 2013. – V. 31. – P. 1–11.
6. A new type of Nb (Ta)–Zr (Hf)–REE–Ga polymetallic deposit in the late Permian coal-bearing strata, eastern Yunnan, southwestern China: possible economic significance and genetic implications / S. Dai, Y. Zhou, M. Zhang, X. Wang, J. Wang, X. Song, Y. Jiang, Y. Luo, Z. Song, Z. Yang, D. Ren // International Journal of Coal Geology. – 2010. – V. 83. – P. 55–63.
7. Chemical and mineralogical compositions of silicic, mafic, and alkali tonsteins in the late Permian coals from the Songzao Coalfield, Chongqing, Southwest China / S. Dai, X. Wang, Y. Zhou, J.C. Hower, D. Li, W. Chen, X. Zhu // Chemical Geology. – 2011. – V. 282. – P. 29–44.
8. Гольшмидт В.М., Петерс К. О накоплении редких элементов в каменных углях // Сборник статей по геохимии редких элементов: пер. с нем. – М.: Ред. Горно-топливной и геолого-разведочной литературы, 1938. – С. 41–53.
9. Редкоземельные элементы и скандий в углях Кузбасса / С.И. Арбузов, В.В. Ершов, А.А. Поцелуев, Л.П. Рихванов, В.М. Советов // Литология и полезные ископаемые. – 1997. – № 3. – С. 315–326.
10. Редкометалльный потенциал углей Минусинского бассейна / С.И. Арбузов, В.В. Ершов, Л.П. Рихванов, Т.Ю. Усова, В.В. Кяргин, А.А. Булатов, Н.Е. Дубовик. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2003. – 347 с.
11. Арбузов С.И., Ершов В.В. Геохимия редких элементов в углях Сибири. – Томск: Изд. дом «Д-Принт», 2007. – 468 с.
12. Geochemistry and mineralogy of the Late Permian coals from the Songzao Coalfield, Chongqing, southwestern China / S. Dai, Y. Zhou, D. Ren, X. Wang, D. Li, L. Zhao // Science in China Series D: Earth Science. – 2007. – № 50. – P. 678–688.
13. Mineralogy and geochemistry of boehmite-rich coals: new insights from the Haerwusu Surface Mine, Jungar Coalfield, Inner Mongolia, China / S. Dai, D. Li, C.-L. Chou, L. Zhao, Y. Zhang, D. Ren, Y. Ma, Y. Sun // International Journal of Coal Geology. – 2008. – V. 74. – P. 185–202.
14. Hower J.C., Ruppert L.F., Eble C.F. Lanthanide, yttrium, and zirconium anomalies in the Fire Clay coal bed, Eastern Kentucky // International Journal of Coal Geology. – 1999. – V. 39. – P. 141–153.
15. Mardon S.M., Hower J.C. Impact of coal properties on coal combustion by-product quality: examples from a Kentucky power plant // International Journal of Coal Geology. – 2004. – V. 59. – P. 153–169.
16. Середин В.В., Кременецкий А.А., Копнева Л.А. Новый тип гидротермальной иттриевоземельной минерализации в кайнозойских рифтогенных структурах Приморья // Прикладная геохимия. Вып. 7. Минералогия, геохимия и генетические типы месторождений. Кн. 1. Минералогия и геохимия. – М.: ИМГРЭ, 2005. – С. 57–77.
17. Ketris M.P., Yudovich Ya.E. Estimations of Clarkes for carbonaceous biolithes: world average for trace element contents in black shales and coals // International Journal of Coal Geology. – 2009. – V. 78. – P. 135–148.
18. Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Ценные элементы-примеси в углях. – Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2006. – 538 с.
19. Scandium (Sc) geochemistry of coals (Siberia, Russian Far East, Mongolia, Kazakhstan, and Iran) / S.I. Arbuзов, A.V. Volostnov, A.M. Mezhibor, V.I. Rybalko, S.S. Plenok // International Journal of Coal Geology. – 2014. – V. 125. – P. 22–35.
20. Geochemistry of trace elements in Chinese coals: a review of abundances, genetic types, impacts on human health, and industrial utilization / S. Dai, D. Ren, C.-L. Chou, R.B. Finkelman, V.V. Seredin, Y. Zhou // International Journal of Coal Geology. – 2012. – V. 94. – P. 3–21.
21. Finkelman R.B. Trace and minor elements in coal // Organic Geochemistry. Eds. M.H. Engel, S. Macko. – New York: Plenum, 1993. – P. 593–607.
22. Grigorev N.A. Average concentrations of chemical elements in rocks of the upper continental crust // Geochemistry International. – 2003. – V. 41. – № 7. – P. 711–718.
23. Горький Ю.И. Основные закономерности распространения германия в ископаемых углях (на примере Минусинского бассейна): дис. ... канд. геол.-мин. наук. – Минск, 1972. – 184 с.
24. Seredin V.V. Major regularities of the REE distribution in coal // Doklady Earth Sciences. – 2001. – V. 377. – P. 250–253.
25. Yliruokanen I., Lehto S. The occurrence of rare earth elements in some Finnish mires // Bull. Geol. Soc. Finland. – 1995. – V. 67. – P. 2. – P. 27–38.
26. Rare earth element geochemistry of Late Paleozoic coals in North China / W. Huang, Q. Yang, D. Tang, X. Tang, Z. Zhao // Acta Geologica Sinica. – 2000. – V. 74 (1). – P. 74–83.
27. Nature of Tonsteins in the Azeisk Deposit of the Irkutsk Coal Basin (Siberia, Russia) / S.I. Arbuзов, A.M. Mezhibor, D.A. Spears, S.S. Plenok, M.V. Shaldybin, E.V. Belaya // International Journal of Coal Geology. – 2016. – V. 152. – P. 99–111.
28. Середин В.В. Металлоносность углей: условия формирования и перспективы освоения // Угольная база России. Т. VI (Сводный, заключительный). Основные закономерности углеобразования и размещения угленосности на территории России. – М.: ООО «Геоинформ-марк», 2004. – 779 с.
29. Origin of minerals and elements in the Late Permian coals, tonsteins, and host rocks of the Xinde Mine, Xuanwei, eastern Yunnan, China / S. Dai, T. Li, V.V. Seredin, C.R. Ward, J.C. Hower, Y. Zhou, M. Zhang, X. Song, W. Song, C. Zhao // International Journal of Coal Geology. – 2014a. – V. 121. – P. 53–78.
30. Revisiting the late Permian coal from the Huayingshan, Sichuan, southwestern China: Enrichment and occurrence modes of minerals and trace elements / S. Dai, Y. Luo, V.V. Seredin, C.R. Ward, J.C. Hower, L. Zhao, S. Liu, C. Zhao, H. Tian, J. Zou // International Journal of Coal Geology. – 2014b. – V. 122. – P. 110–128.
31. Mineralogical and geochemical responses of coal to igneous intrusion in the Pansan Coal Mine of the Huainan coalfield, Anhui, China / J. Chen, G. Liu, H. Li, B. Wu // International Journal of Coal Geology. – 2014. – V. 124. – P. 11–35.

Поступила 08.08.2016 г.



#### **Информация об авторах**

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

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

**Машенькин В.С.**, директор отдела горных проектов Чингис Хан Банка.

**Юйчжуан Сунь**, профессор Совместного инновационного центра угольной эксплуатации Хэбэя Хэбэйского инженерного университета.

**Цунлян Жао**, доцент Совместного инновационного центра угольной эксплуатации Хэбэя Хэбэйского инженерного университета.

**Блохин М.Г.**, кандидат биологических наук, заместитель директора по научной работе Дальневосточного геологического института ДВО РАН.

**Иванов В.В.**, кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией микро- и наноисследований Дальневосточного геологического института ДВО РАН.

**Зарубина Н.В.**, научный сотрудник лаборатории аналитической химии Дальневосточного геологического института ДВО РАН.

UDK 552.574: 546.65

## RARE EARTH ELEMENTS IN THE LATE PALEOZOIC COALS OF NORTH ASIA (SIBERIA, NORTHERN CHINA, MONGOLIA, KAZAKHSTAN)

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

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

**Valery S. Mashenkin<sup>2</sup>,**  
mashenikin@mail.ru

**Sun Yuzhuang<sup>3</sup>,**  
sun\_yz@hotmail.com

**Zhao Cunliang<sup>3</sup>,**  
cunliang909@163.com

**Maksim G. Blokhin<sup>4</sup>,**  
blokhin@fegi.ru

**Vladimir V. Ivanov<sup>4</sup>,**  
d159327@yandex.ru

**Natalya V. Zarubina<sup>4</sup>,**  
zarubina@fegi.ru

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

<sup>2</sup> Chingis Khaan Bank,  
15, Chingis Avenue, Ulaanbaatar, 14251, Mongolia.

<sup>3</sup> Collaborative Innovation Center of Coal Exploitation, Hebei University of Engineering,  
199, Guangmingnan street, Handan, Hebei, 056038, China.

<sup>4</sup> Far East Geological Institute FEB RAS,  
159, 100-letie Vladivostoka avenue, Vladivostok, 690022, Russia.

**The relevance** of the research is caused by the need to determine the conditions of rare earth elements (REEs) accumulation in coals, to design the model of formation and identification of criteria for predicting rare metal mineralization in coal deposits.

**The aim** of the research is to study and evaluate the content, the patterns of distribution and REEs concentration conditions in coals from different deposits and basins of North Asia.

**Research methods:** testing coal seams, fields and basins, formed in various geological and geochemical environments; analytical studies by INAA, ICP-MS; processing the results by mathematical statistics methods.

**Results.** Coals of North Asia are characterized by contents of REEs close to the coal Clark. Higher levels of the REEs content are typical for coals of northern China, Hurengol and Hotgor coalfields in eastern Mongolia and Kurai coalfield in southern Siberia. The individual coal seams or areas of ones enriched by REEs are set within certain basins at peri-background average content of REEs. Mechanism of REEs concentration in coal seams is caused by the peculiarities of nutrition composition of ancient peat accumulation basin with almost synchronously forming volcanism and hydrogeochemistry features of the region. Epigenetic processes lead to redistribution of REEs without impacting significantly their content in fields and coal seams. Formation of anomalies and complex rare metal ores is caused by the presence of specialized arrays of rocks rich in REEs among the underlying sediments or, more often, by almost synchronously forming volcanic alkali or acid compositions together with coal accumulation. Conversion of paleo-ashes in aggressive environment conditions of peat fields results in removal and redeposition of REEs near tonsteins with formation of contrasting anomalies. In some cases, these complex anomalies may be of industrial interest.

**Key words:**

Coal, North Asia, rare earth elements, average content, distribution patterns, accumulation conditions.

*The paper was financially supported by the grants of RFBR 16–55–53122 GFEN\_a and 16–05–00405 A*

## REFERENCES

- Seredin V.V. O novom tipe redkozemel'nogo orudneniya kaynozoykikh uglennykh ypadin [About a new type of REE mineralization of Cenozoic coalbearing basins]. *Dokl. Akad. Nauk. USSR*, 1991, vol. 320, no. 6, pp. 1446–1450.
- Seredin V.V. Rare earth element-bearing coals from the Russian Far East deposits. *International Journal of Coal Geology*, 1996, vol. 30, pp. 101–129.
- Seredin V.V., Finkelman R.B. Metalliferous coals: a review of the main genetic and geochemical types. *International Journal of Coal Geology*, 2008, vol. 76, pp. 253–289.
- Seredin V.V., Dai S. Coal deposits as potential alternative sources for lanthanides and yttrium. *International Journal of Coal Geology*, 2012, vol. 94, pp. 67–93.
- Seredin V.V., Dai S., Sun Y., Chekryzhov I.Yu. Coal deposits as promising sources of rare metals for alternative power and energy-efficient technologies. *Applied Geochemistry*, 2013, vol. 31, pp. 1–11.
- Dai S., Zhou Y., Zhang M., Wang X., Wang J., Song X., Jiang Y., Luo Y., Song Z., Yang Z., Ren D. A new type of Nb(Ta)–Zr(Hf)–REE–Ga polymetallic deposit in the late Permian coal-bearing strata, eastern Yunnan, southwestern China: possible economic significance and genetic implications. *International Journal of Coal Geology*, 2010, vol. 83, pp. 55–63.
- Dai S., Wang X., Zhou Y., Hower J.C., Li D., Chen W., Zhu X. Chemical and mineralogical compositions of silicic, mafic, and alkali tonsteins in the late Permian coals from the Songzao Coalfield, Chongqing, Southwest China. *Chemical Geology*, 2011, vol. 282, pp. 29–44.
- Goldshmidt V.M., Peters K. O nakoplenii redkikh elementov v kamennykh uglyakh [On accumulation of trace elements in coals]. *Sbornik statey po Geokhimii redkikh elementov* [Selected papers in Geochemistry of rare elements]. Translated from German. Moscow, Red. Gorno-toplivnoy i geologicheskoy literatury, 1938. pp. 41–53.
- Arbuzov S.I., Ershov V.V., Potseluev A.A., Rikhvanov L.P., Sovetov V.M. Redkozemelnye elementy i skandiy v uglyakh Kuzbassa [Rare earth elements and scandium in Kuzbass coal]. *Litologiya i poleznye iskopaemye*, 1997, no. 3, pp. 315–326.
- Arbuzov S.I., Ershov V.V., Rikhvanov L.P., Usova T.Yu., Kyargin V.V., Bulatov A.A., Dubovik N.E. *Redkometal'nyy potentsial ugley Minusinskogo basseyna* [Raremetal potential of the Minusinsk coal basin]. Novosibirsk, SO RAN Press, 2003. 347 p.
- Arbuzov S.I., Ershov V.V. *Geokhimiya redkikh elementov v uglyakh Sibiri* [Geochemistry of rare elements in coals of Siberia]. Tomsk, DPrint Publ., 2007. 468 p.
- Dai S., Zhou Y., Ren D., Wang X., Li D., Zhao L. Geochemistry and mineralogy of the Late Permian coals from the Songzao Coalfield, Chongqing, southwestern China. *Science in China Series D: Earth Science*, 2007, no. 50, pp. 678–688.
- Dai S., Li D., Chou C.-L., Zhao L., Zhang Y., Ren D., Ma Y., Sun Y. Mineralogy and geochemistry of boehmite-rich coals: new insights from the Haerwusu Surface Mine, Jungar Coalfield, Inner Mongolia, China. *International Journal of Coal Geology*, 2008, vol. 74, pp. 185–202.
- Hower J.C., Ruppert L.F., Eble C.F. Lanthanide, yttrium, and zirconium anomalies in the Fire Clay coal bed, Eastern Kentucky. *International Journal of Coal Geology*, 1999, vol. 39, pp. 141–153.
- Mardon S.M., Hower J.C. Impact of coal properties on coal combustion by-product quality: examples from a Kentucky power plant. *International Journal of Coal Geology*, 2004, vol. 59, pp. 153–169.
- Seredin V.V., Kremenetskiy A.A., Kopneva L.A. Novy tip gidrotermal'noy itrievoy mineralizatsii v kaynozoykikh riftogennikh strukturakh Primorya [A new type of hydrothermal yttrium-earth mineralization in Cenozoic rift structures of Primorye]. *Prilozheniya geokhimiya. Vyp. 7. Mineralogiya, geokhimiya i geneticheskie tipy mestorozhdeniy. Kn. 1. Mineralogiya i geokhimiya* [Applied geochemistry. Iss. 7. Mineralogy, geochemistry and genetic types of the deposits. B. 1. Mineralogy and geochemistry]. Moscow, IMGRE Press, 2005. pp. 57–77.
- Ketris M.P., Yudovich Ya.E. Estimations of Clarkes for carbonaceous biolithes: world average for trace element contents in black shales and coals. *International Journal of Coal Geology*, 2009, vol. 78, pp. 135–148.
- Yudovich Ya.E., Ketris M.P. *Tsennyye elementy-primesi v uglyakh* [Valuable impurity elements in coal]. Ekaterinburg, UrORAN Press, 2006. 538 p.
- Arbuzov S.I., Volostnov A.V., Mezhibor A.M., Rybalko V.I., Ilenok S.S. Scandium (Sc) geochemistry of coals (Siberia, Russian Far East, Mongolia, Kazakhstan, and Iran). *International Journal of Coal Geology*, 2014, vol. 125, pp. 22–35.
- Dai S., Ren D., Chou C.-L., Finkelman R.B., Seredin V.V., Zhou Y. Geochemistry of trace elements in Chinese coals: a review of abundances, genetic types, impacts on human health, and industrial utilization. *International Journal of Coal Geology*, 2012, vol. 94, pp. 3–21.
- Finkelman R.B. Trace and minor elements in coal. *Organic Geochemistry*. Eds. M.H. Engel, S. Macko. New York, Plenum, 1993. pp. 593–607.
- Grigorev N.A. Average concentrations of chemical elements in rocks of the upper continental crust. *Geochemistry International*, 2003, vol. 41, no. 7, pp. 711–718.
- Gorkiy Yu.I. *Osnovnye zakonomernosti raspredeleniya germaniya v iskopaemikh uglyakh (na primere Minusinskogo basseyna)*. *Dis. Kand. nauk* [Basic laws of germanium distribution in fossil coals (for example, the Minusinsk basin). Cand. Diss.]. Minsk, 1972. 184 p.
- Seredin V.V. Major regularities of the REE distribution in coal. *Doklady Earth Sciences*, 2001, vol. 377, pp. 250–253.
- Ylirokanen I., Lehto S. The occurrence of rare earth elements in some Finnish mires. *Bull. Geol. Soc. Finland*, 1995, vol. 67, P. 2, pp. 27–38.
- Huang W., Yang Q., Tang D., Tang X., Zhao Z. Rare earth element geochemistry of Late Paleozoic coals in North China. *Acta Geologica Sinica*, 2000, vol. 74 (1), pp. 74–83.
- Arbuzov S.I., Mezhibor A.M., Spears D.A., Ilenok S.S., Shaldybin M.V., Belaya E.V. Nature of Tonsteins in the Azeisk Deposit of the Irkutsk Coal Basin (Siberia, Russia). *International Journal of Coal Geology*, 2016, vol. 152, pp. 99–111.
- Seredin V.V. Metalonosnost ugley: usloviya formirovaniya i perspektivy osvoeniya [Metalliferous of coals: conditions of formation and development prospects]. *Ugol'naya baza Rossii. T. VI (Svodnyy, zakluchitel'nyy). Osnovnye zakonomernosti ugleobrazovaniya i razmeshcheniya uglennykh elementov na territorii Rossii* [Base of uranium of Russia. Vol. VI. The main principles of coal formation and location of coalbearing capacity in Russia]. Moscow, Geoinformmark Publ., 2004. 779 p.
- Dai S., Li T., Seredin V.V., Ward C.R., Hower J.C., Zhou Y., Zhang M., Song X., Song W., Zhao C. Origin of minerals and elements in the Late Permian coals, tonsteins, and host rocks of the Xinde Mine, Xuanwei, eastern Yunnan, China. *International Journal of Coal Geology*, 2014a, vol. 121, pp. 53–78.
- Dai S., Luo Y., Seredin V.V., Ward C.R., Hower J.C., Zhao L., Liu S., C. Zhao, Tian H., Zou J. Revisiting the late Permian coal from the Huayingshan, Sichuan, southwestern China: Enrichment and occurrence modes of minerals and trace elements. *International Journal of Coal Geology*, 2014b, vol. 122, pp. 110–128.
- Chen J., Liu G., Li H., Wu B. Mineralogical and geochemical responses of coal to igneous intrusion in the Pansan Coal Mine of the Huainan coalfield, Anhui, China. *International Journal of Coal Geology*, 2014, vol. 124, pp. 11–35.

Received: 8 August 2016.

**Information about the authors**

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

*Sergey S. Ilenok*, assistant, National Research Tomsk Polytechnic University.

*Valery S. Mashenkin*, director, Chingis Khaan Bank.

*Sun Yuzhuang*, professor, Collaborative Innovation Center of Coal Exploitation, Hebei University of Engineering.

*Zhao Cunliang*, associate professor, Collaborative Innovation Center of Coal Exploitation, Hebei University of Engineering.

*Maksim G. Blokhin*, Cand. Sc., vice director, Far East Geological Institute FEB RAS.

*Vladimir V. Ivanov*, Cand. Sc., head of the laboratory, Far East Geological Institute FEB RAS.

*Natalya V. Zarubina*, researcher, Far East Geological Institute FEB RAS.



УДК 621.3.077.2:621.3.077.3

## ПОВЫШЕНИЕ ЗАПАСА ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ АВТОНОМНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НА БАЗЕ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ПРИ РЕЗКИХ ИЗМЕНЕНИЯХ РЕЖИМА НАГРУЗКИ

Удалов Сергей Николаевич<sup>1</sup>,  
oudalovsn@yandex.ru

Ачитаев Андрей Александрович<sup>1</sup>,  
ac-an-alec@mail.ru

Приступ Александр Георгиевич<sup>1</sup>,  
a\_pristup@mail.ru

Боченков Борис Михайлович<sup>1</sup>,  
bochenkov@ngs.ru

<sup>1</sup> Новосибирский государственный технический университет,  
Россия, 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20.

*Ветроэнергетика сегодня развивается в двух равноправных направлениях: увеличение единичной мощности ветроэнергетической установки за счёт массогабаритных размеров установки с использованием высоковольтных генераторов и второй путь – совершенствование отдельных элементов ветроэнергетических установок и внедрение современных систем управления режимами работы как установки в целом, так и её отдельными агрегатами. Оба пути развития направлены на увеличение выработки энергии. Характерной особенностью указанных источников электроэнергии является малая инерционность и, соответственно, малый запас динамической устойчивости при резких изменениях режима, например при коротких замыканиях. В последнее время стали широко использоваться исследования магнитных редукторов и вариаторов. Эти исследования связаны с высокими энергетическими показателями магнитных редукторов и трансмиссий, которые позволяют улучшить массогабаритные показатели и сократить потребность в обслуживании. Использование магнитных трансмиссий в ветроэнергетических установках оправдано возможностью регулирования скорости вращения генератора напрямую. Данная статья посвящена исследованию магнитной трансмиссии в целях сохранения синхронности параллельно работающих генераторов локальной энергосистемы при перегрузках. Регулирование скорости вращения ротора генератора осуществляется через магнитную трансмиссию и основано на использовании законов подчиненного регулирования по двум контурам. Результаты моделирования отображают процесс сохранения синхронной работы генераторов ветроэнергетической установки.*

**Цель работы:** повышение запаса динамической устойчивости локальной энергосистемы, состоящей из параллельно работающих ветроэнергетических установок с синхронными генераторами с постоянными магнитами.

**Методы исследования:** разработка математических моделей магнитной трансмиссии с использованием классических преобразований Парка–Горева; использование законов подчиненного регулирования для стабилизации скорости вращения при различных возмущениях, как со стороны нагрузки, так и со стороны ветровой турбины.

**Результаты.** Получена математическая модель локальной энергетической системы, состоящей из параллельно работающих ветроэнергетических установок с синхронными генераторами с постоянными магнитами. Поддержание синхронной работы генераторов обеспечивается магнитной трансмиссией. Показана возможность стабилизации скорости вращения генераторов при перегрузке.

### **Ключевые слова:**

Ветровая турбина, магнитная трансмиссия, динамическая устойчивость, локальная энергосистема.

### **Введение**

В настоящее время ветроэнергетика является сложившимся направлением в возобновляемой энергетике, которое развивается быстрыми темпами. Ежегодно установленная мощность ветроэнергетических установок (ВЭУ) увеличивается в среднем на 25 %. По данным Всемирной ассоциации энергии ветра, установленная мощность всех мировых ветряных электростанций (ВЭС) в 2015 году впервые в истории оказалась выше общей мощности функционирующих атомных электростанций (АЭС): общая совокупная мощность мировых ВЭС превысила 400 ГВт, тогда как суммарная мощность действующих АЭС составляет 382,3 ГВт, включая остановленные энергоблоки АЭС в Японии (более 40 ГВт) [1, 2].

Ветроэнергетика в настоящий момент является одним из наиболее динамично развиваемых направлений альтернативной энергетики в мире. Электрический генератор и его трансмиссия являются сердцем ветроэнергетической системы. Существуют две базовые концепции построения ветровых турбин. Первая является классической редукторной системой на базе асинхронной машины двойного питания или синхронной машины с постоянными магнитами. Вторая – концепция прямого привода синхронной многополюсной машины с постоянными магнитами. К преимуществам редукторной концепции можно отнести сравнительную дешевизну. Но к недостаткам – значительные потери механической энергии в ге-

нераторе и в трансмиссии. Более того, практика эксплуатации механических редукторов показала высокую степень их износа при перегрузках и при ударных нагрузках от ветровой турбины [2]. Поэтому частый износ и повреждение механических редукторов сопряжено со значительными эксплуатационными расходами на обслуживание. Следует отметить, что наличие смазочных материалов внутри редуктора является одной из основных причин воспламенения гондолы ветроэнергетической установки [1]. К преимуществам концепции прямого привода можно отнести высокую энергетическую эффективность. Но, к сожалению, большие габариты и масса делают данную компоновку дорогой.

Особенностью малой генерации является использование синхронных машин с постоянными магнитами, где нет технических средств воздействия на выходное напряжение электрического генератора при переходных процессах в локальной энергетической системе, то есть отсутствует автоматическое регулирование возбуждения. В статье рассмотрен принцип стабилизации скорости вращения с использованием магнитной трансмиссии, которая представляет собой упругую связь между турбиной ветроэнергетической установки и синхронным генератором с постоянными магнитами. Вторая часть содержит постановку проблемы и современные способы её решения. Выделены недостатки существующих технических средств. Третья часть посвящена математическому моделированию динамики магнитного вариатора. Четвертая часть – результатам математического моделирования.

### Постановка проблемы

В изолированной автономной электроэнергетической системе, состоящей из нескольких источников электрической энергии, однофазное замыкание в сетях до 1 кВ наблюдается в 70 % случаев от общего числа возмущений, которые являются аварийными. Дальнейшие действия защиты и автоматики связаны с последующим отключением поврежденного генератора или части нагрузки. При этом нарушается баланс выработки и потребления энергии, при котором остальные генераторы не позволяют обеспечить необходимую мощность, и частота в энергосистеме падает. Также при отключении части нагрузки наблюдается переизбыток активной мощности, что способствует ускорению генераторов. В условиях автономной энергосистемы данный вид нарушений может привести к асинхронному режиму оставшихся в работе синхронных генераторов, которые связаны между собой линиями с разными сопротивлениями. Это приводит к появлению несинхронного режима оставшихся в работе генераторов [1].

На рис. 1 отражена структура системы, которая включает синхронные генераторы ветроэнергетических установок, работающих на электриче-

скую сеть. К узлам электрической сети подключены синхронные генераторы ветроэнергетической установки с постоянными магнитами. Упрощенная модель генератора представляет ЭДС  $E_k$  с фазой  $\varphi_k$ , подключенной к линии с активным сопротивлением  $R_k$  и реактивным сопротивлением  $\omega L_k$ , где  $k$  – порядковый номер генератора. К узлу сети подключена комплексная нагрузка  $P_{нс} + jQ_{нс}$  со ступенчатым изменением мощности [1, 2].

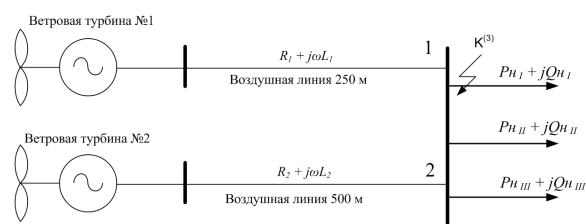


Рис. 1. Структурная схема исследуемой автономной энергосистемы

Fig. 1. Diagram of the investigated autonomous power system

На рис. 2 представлены осциллограммы переходных процессов напряжений двух параллельно работающих генераторов с разной мощностью (5 и 15 кВт). Из данных осциллограмм следует, что после возмущающего воздействия в обоих случаях наблюдаются асинхронные режимы синхронных генераторов с постоянными магнитами. В случае короткого замыкания наблюдается резкое изменение амплитуды напряжения с последующим отключением генератора из сети. Дело в том, что синхронные машины с постоянными магнитами не имеют собственных средств регулирования напряжения.

Использование кинетических накопителей не решает проблему в случае применения их внутри гондолы, при этом ухудшаются массогабаритные показатели, и, поскольку кинетический накопитель должен находиться в вакууме, его применение снижает надежность и требует значительных затрат на обслуживание [2–4].

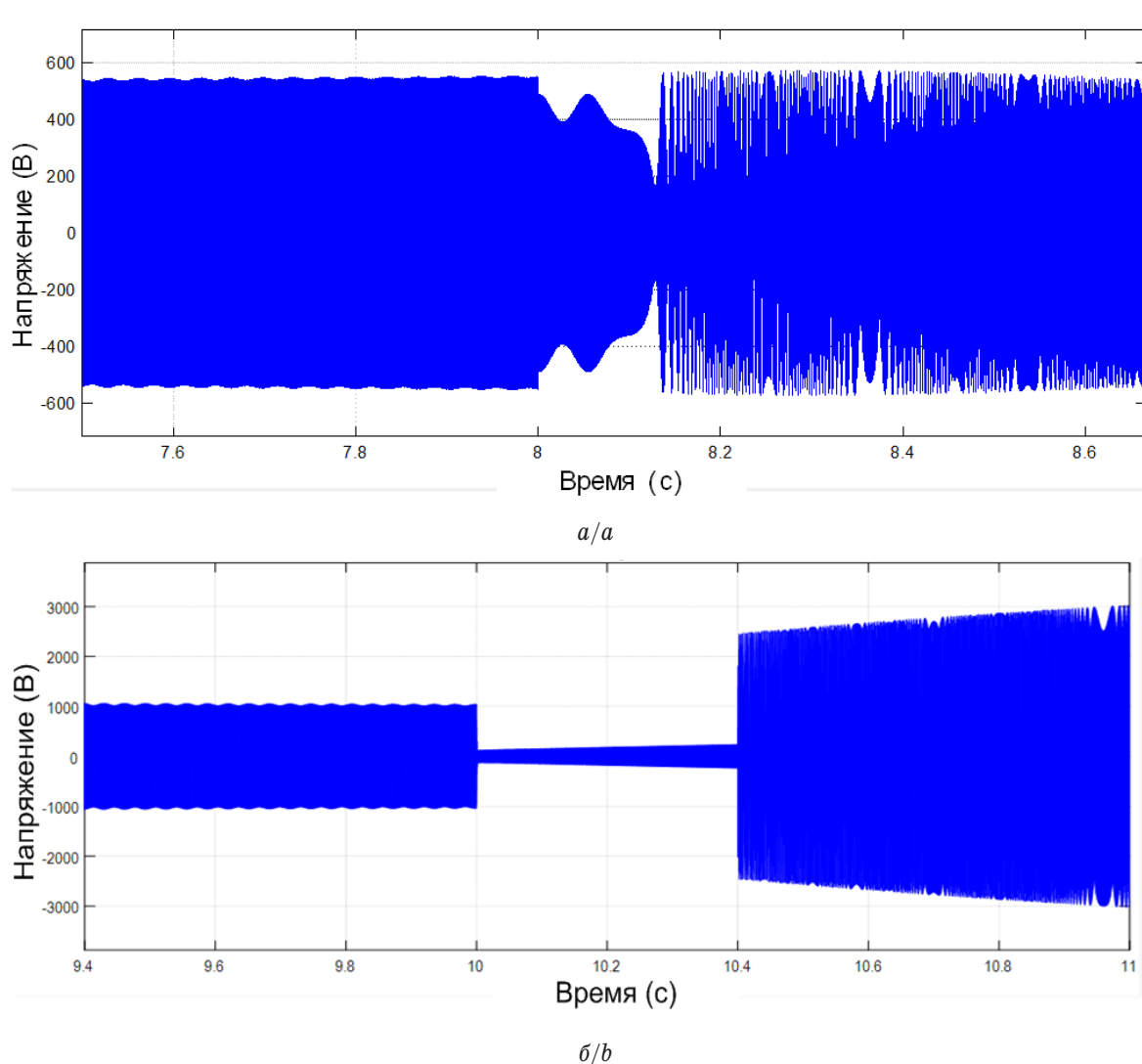
В настоящий момент кардинальным решением данной проблемы является использование вставки постоянного тока, которая исключает проблему несинхронной работы генераторов. На рис. 3 отображена одна из разновидностей вставки постоянного тока. Однако следует отметить, что при коротком замыкании на присоединении нагрузки снижается напряжение ниже номинального в цепях управления вставки постоянного тока, что приводит к блокировке транзисторов IGBT и выводит генератор на режим невозможной отдачи активной мощности в сеть, вызывая его механическую перегрузку [5]. Одним из основных недостатков такого построения системы является высокая установленная мощность преобразовательной части регулирующего оборудования, поскольку идет двукратное преобразование энергии (выпрямление и инвертирование) с полной мощностью, отдаваемой генератором.

Известны исследовательские работы по обеспечению устойчивости параллельно работающих генераторов в локальной автономной энергетической системе, проводимые профессором А.Г. Фишовым [6, 7]. Его метод заключается в идентификации параметров и режимов работы и определении максимальной допустимой мощности нагрузки в целях сохранения устойчивой работы генераторов. Также известны исследования профессора В.М. Чебана по обеспечению устойчивости путем сообщения статору электрического генератора скорости вращения с целью синхронизации векторов ЭДС генератора и ЭДС энергетической системы [8, 9]. Безусловно, развитие локальных энергосистем играет важную роль, но, к сожалению, дополнительные подключения к локальной энергосистеме вызывают возмущения в работе генераторов. Предлагаемая статья направлена на исследование средства активного слежения за параметрами

устойчивости, и, в случае возмущающего воздействия, вызывающего асинхронный ход параллельно работающих генераторов, позволяет произвести восстановление синхронизма без потери питания.

#### Предлагаемое решение

Данная статья посвящена исследованию магнитных вариаторов на базе эффекта магнитной редукции частоты вращения. Суть эффекта магнитной редукции основана на модуляции магнитного поля, создаваемого быстроходным ротором с постоянными магнитами, ферромагнитными сегментами тихоходного ротора с генерацией гармоник, которые кратны количеству пар полюсов постоянных магнитов на внешнем статоре, что создаёт условия для трансформации момента. Фиксированное соотношение числа пар полюсов постоянных магнитов быстроходного ротора и числа ферромагнитных сегментов на тихоходном роторе



**Рис. 2.** Осциллограмма переходных процессов напряжения при различных возмущениях: а) резкое изменение нагрузки; б) короткое замыкание

**Fig. 2.** Oscillogram of voltage transients at various perturbations: a) sudden load changing; b) short circuit

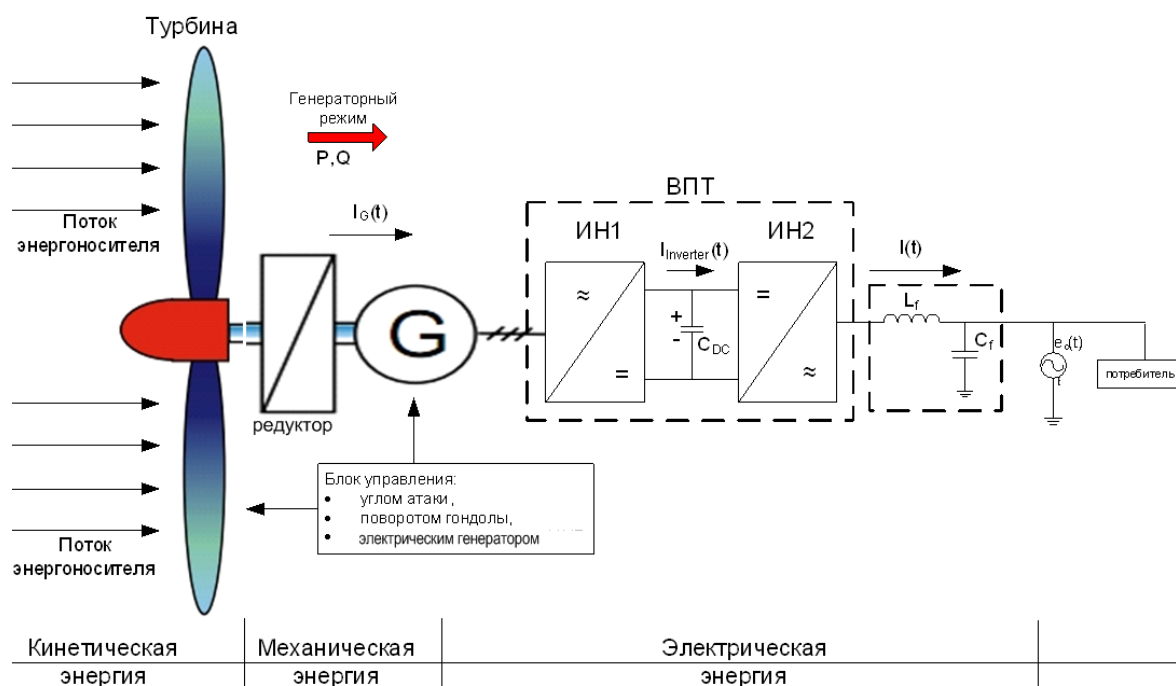


Рис. 3. Обобщенная структурная схема замещения классической редукторной ветроэнергетической установки

Fig. 3. Summarized block diagram of substitution of classic wind turbine gearbox

определяет передаточное отношение. Концепция магнитной редукции исключает проблемы механических повреждений, так как условия, при которых возникают повреждения внутри механического редуктора и последующий выход его из строя в магнитном редукторе исключены. Концепция магнитного редуктора обладает существенными преимуществами по сравнению с механическими редукторами: снижение массогабаритных показателей, увеличение КПД (до 98 %) за счет минимального трения, снижение нагрева и улучшение эксплуатационных показателей магнитного редуктора из-за отсутствия смазки [10].

Одним из способов снижения установленной мощности регулирующего оборудования является применение магнитной трансмиссии, которая включает в себя магнитный редуктор с ферромагнитными сегментами, необходимый для обеспечения фиксированного передаточного отношения, и интегрированный с редуктором дополнительный двигатель. При этом возможны два варианта построения трансмиссий. Один из вариантов предполагает формирование вращающего момента, который компенсирует возмущающий момент, при этом реализуется стабилизация скорости. Второй вариант обеспечивает формирование дополнительной скорости вращения генератора при неизменном вращающем моменте, и в результате суммирования скоростей изменяется передаточное отношение. Трансмиссия с таким построением играет роль магнитного вариатора. В предлагаемой статье анализируется первый вариант построения. При этом по сравнению с классической системой

(рис. 3) планетарный механический редуктор замещается на магнитную трансмиссию с традиционным векторным управлением. Магнитный редуктор является устройством для преобразования скорости турбины в синхронную скорость электрического генератора. На рис. 4 представлен эскиз магнитной трансмиссии, включающий в себя магнитный редуктор с фиксированным передаточным отношением и интегрированный с ней электродвигатель с постоянными магнитами, создающий до-

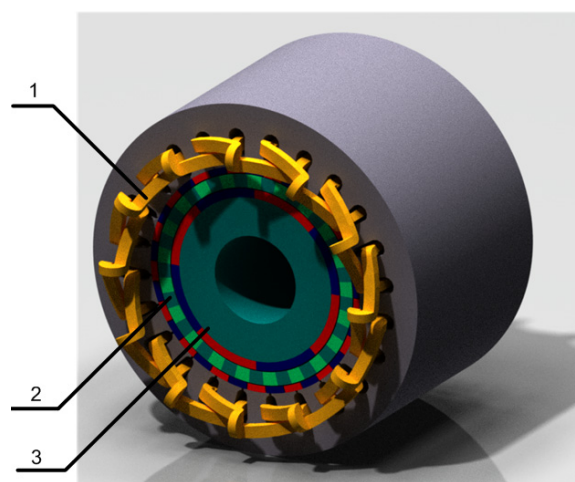


Рис. 4. Эскиз магнитного вариатора: 1 – обмотка управления; 2 – тихоходный ротор; 3 – быстроходный ротор

Fig. 4. Design of the magnetic continuously variable transmission: 1 is the control winding; 2 is the low-speed rotor; 3 is the high-speed rotor



полнительный момент на быстроходном роторе. Преобразование механического момента и скорости осуществляется через модулирующие ферромагнитные сегменты на тихоходном роторе трансмиссии, которые помещены между быстроходным ротором и ротором управления с разным числом пар полюсов [6]. Это исключает механический контакт между тихоходным и быстроходным валами и снижает механический износ и потери на трение. Физический принцип магнитной редукции был описан в работах [10–20].

#### Динамическая модель магнитного вариатора

Магнитная трансмиссия является устройством для преобразования момента между двумя вращающимися частями с различным числом постоянных магнитов через модулирующие ферромагнитные сегменты на тихоходном валу. Она позволяет стабилизировать скорость вращения тихоходного и быстроходного валов при возникновении возмущающего воздействия как со стороны нагрузки, так и со стороны турбины путем формирования дополнительного момента, компенсирующего возмущающий момент.

Следует обратить внимание, что в силовой схеме отсутствует какой-либо преобразователь и генератор подключен к локальной энергосистеме непосредственно (рис. 5). Для реализации управления применяются два инвертора, рассчитанные на значительно меньшую мощность, чем инвертор между генератором и энергосистемой в варианте прямого привода [16, 17]. Дополнительное питание звена управления возможно напрямую от энергосистемы. Инверторы напряжения обеспечивают преобразование частоты для заряда аккумуляторных батарей и питания обмотки управления трансмиссии. Применение буферного аккумулятора позволяет обеспечить устойчивость работы при снижении напряжения в системе в аварийных режимах.

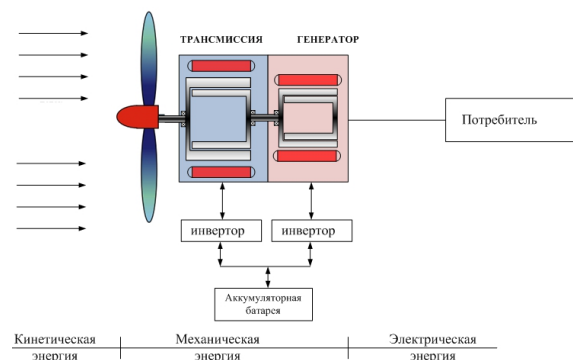


Рис. 5. Компоновка ветроэнергетической системы на базе магнитного вариатора и синхронного генератора

Fig. 5. Arrangement of a wind-driven system based on magnetic continuously variable transmission and synchronous generator

Уравнения, описывающие динамику магнитного вариатора, идентичны уравнениям синхронной

машины с постоянными магнитами. В осях  $d$  и  $q$  уравнения тока выглядят следующим образом [12, 13]:

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = -\frac{R}{L}i_d + \frac{\omega_e L_q i_q}{L_d} + \frac{u_d}{L_d}; \\ \frac{di_q}{dt} = -\frac{R}{L}i_q - \frac{\omega_e L_d i_d}{L_q} + \frac{u_q - K_e \omega_h}{L_q}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $L_d$  и  $L_q$  – индуктивности двигателя звена управления в  $d$  и  $q$  осях;  $R$  – активное сопротивление на фазу;  $K_e$  – постоянная противоЭДС;  $u_d$  и  $u_q$  – напряжения в  $d$  и  $q$  осях;  $\omega_h$  – скорость быстроходного вала;  $\omega_s = p_h \cdot \omega_h$  – скорость электрического угла.

Момент, передаваемый от тихоходного звена к быстроходному, описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} J_h \frac{d\omega_h}{dt} = M_{em} - M_{max}/G_r \cdot \sin(p_h \theta_h - n_s \theta_{Load}) + \\ \quad + M_{gen} - B_h \omega_h - \lambda_{ap} (p_h \theta_h - n_s \theta_{Load}); \\ J_0 \frac{d\omega_0}{dt} = M_{max} \sin(p_h \theta_h - n_s \theta_{Load}) - M_{Turbine} - \\ \quad - B_0 \omega_0 - \lambda_{ap} (p_h \omega_h - n_s \omega_{Load}), \end{cases} \quad (2)$$

где  $J_h$ ,  $B_h$  – момент инерции и вязкое затухание ротора высокой скорости;  $\omega_0$ ,  $J$ ,  $B_0$  – угловая скорость, суммарный момент инерции тихоходного вала, коэффициент вязкого трения;  $\lambda_{ap}$  – коэффициент затухания;  $n_s$  – число ферромагнитных модуляторов;  $p_h$  – число пар полюсов быстроходного ротора;  $G_r = n_s/p_h$  – передаточное отношение магнитной трансмиссии;  $M_{Turbine}$  – момент турбины ветроэнергетической установки.

На рис. 6 представлена структурная схема магнитного вариатора, которая представляет аналогию структуры магнитной муфты, описанного в исследованиях [17–20].

Уравнение электромагнитного момента будет определяться коэрцитивной силой постоянных магнитов ротора и током статора по оси  $q$ :

$$M_e = \frac{3}{2} p_h \varphi_m i_q, \quad (3)$$

где  $\varphi_m$  – поток рассеяния статора.

Уравнение магнитной жесткости  $K_{em}$  выражается через максимальный электромагнитный момент, передаваемый от тихоходного ротора к быстроходному, числа ферромагнитных стержней и угол нагрузки:

$$K_{em} = n_s M_{max} \cos(\theta_e). \quad (4)$$

Угол нагрузки  $\theta_e$  магнитной трансмиссии определяется как угол расположения между быстроходным ротором и тихоходным:

$$\theta_e = p_h \theta_h - n_s \theta_0, \quad (5)$$

где  $\theta_h$  и  $\theta_0$  – угловое положение быстроходного и тихоходного роторов соответственно.

Уравнение момента ветроэнергетической установки представлено в следующем виде [1, 2]:

$$M_{Turbine} = C_p(\beta, Z) \pi R_{blade}^2 \frac{\rho v^3}{2\omega_{load}}, \quad (6)$$

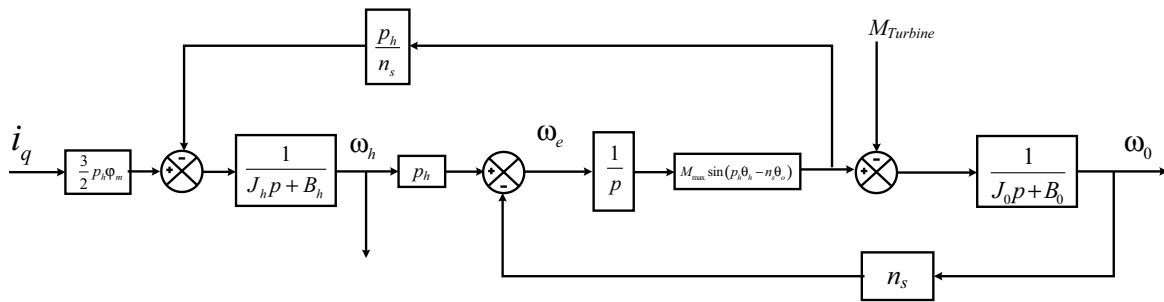


Рис. 6. Структурная блок-схема магнитного вариатора

Fig. 6. Structural block diagram of a magnetic continuously variable transmission

где  $v$  – скорость ветра, м/с;  $\omega_{load}$  – скорость турбины, рад/с;  $\rho$  – плотность воздуха, равная 1,221 кг/м<sup>3</sup>;  $d$  – диаметр ветровой турбины, м;  $R_{blade}$  – радиус лопасти, м;  $\omega_{load}$  – скорость вращения турбины, рад/с,  $Z$  – быстроходность турбины.

Коэффициент мощности определяется по формуле

$$C_p(Z_{turbine}, \beta) = 0,73 \left( 151 \frac{v}{Z_{turbine}} - 0,002 \beta - 13,2 \right) e^{-18,4 \cdot v / (Z_{turbine})}, \quad (7)$$

где  $Z_{turbine} = \omega_{load} R_{blade} / v$  – быстроходность ветроэнергетической установки;  $\beta$  – угол заклинения лопасти турбины, град.

Уравнение синхронного генератора с постоянными магнитами на базе уравнений Парка–Горева [1]:

$$\begin{cases} U_d = \frac{d\Psi_d}{dt} + R_s I_d - \Psi_q \omega \\ U_q = \frac{d\Psi_q}{dt} + R_s I_q - \Psi_d \omega, \\ \Psi_d = L_{d\_gen} I_d + \Psi_f \\ \Psi_q = L_{q\_gen} I_q \end{cases} \quad (8)$$

где  $U_d, U_q, I_d$  и  $I_q$  – напряжение и ток статора генератора по  $d$  и  $q$  осям;  $L_{d\_gen}, L_{q\_gen}$  – индуктивности статора;  $R_s$  – сопротивление обмотки статора;  $\Psi_d, \Psi_q$  – потокосцепление статора;  $\Psi_f$  – потокосцепление постоянных магнитов.

Электромагнитный момент электрической машины определяется следующим уравнением:

$$M_{gen} = \frac{3}{2} Z_p (\Psi_d I_q - \Psi_q I_d). \quad (9)$$

На рис. 7 отображена интегральная модель двух ветроэнергетических установок, в которых не учтен контур управления углом заклинения. Это было сделано в целях упрощения задачи. В дальнейших исследованиях будут рассмотрены комбинированные контуры согласований средств управления по постоянным временам регуляторов. Схема управления магнитным вариатором представляет собой схему двухконтурного управления. Внутренний контур тока – для стабилизации вращающего момента, внешний контур скорости –

для поддержания постоянной частоты вращения генератора. Два генератора подключены к локальной автономной электроэнергетической системе, состоящей из ступенчатой нагрузки и линий электропередач с разной длиной. Система управления магнитным вариатором выполнена поле-ориентированной стратегией управления. В таблице представлены коэффициенты и параметры для пропорционально-интегрального регулятора тока и интегрального регулятора скорости, которые были синтезированы методом компенсации нулей и полюсов [16].

Таблица. Параметры синтеза для регуляторов тока и скорости  
 Table. Synthesis parameters for current and speed controllers

Параметр/Parameter	Значение/Value	
$L_q = L_d$	40	мГн/mH
$R$	2	Ом/Ohm
$J_h$	4	кг·м <sup>2</sup> /kg·m <sup>2</sup>
$J_0$	2,5	
$B_h$	$1 \cdot 10^{-4}$	Нм·с/рад Nm·s/rad
$B_0$	$2 \cdot 10^{-4}$	
$\varphi_m$	0,6	Вб/Wb
$\omega_{H\ speed}$	314	рад/с/rad/s
$\omega_{0\ speed}$	30	
$U_{dc}$	440	В/V
$i_q$	9 А	А/A
$\lambda_{cap}$	$0,5 \cdot 10^{-4}$	Нм·с/па/Nm·s/rad
$K_i$	12	А/рад A/rad
$K_s$	1	Ом/Ohm
$K_p$	0,1	1/с/1/s
$i_d$	1	А/A
$K_{em}$	15	В·с/рад V·s/rad

На рис. 8 представлена осциллограмма стабилизации напряжения при резком изменении мощности в локальной автономной энергетической системе. Время восстановления напряжения составляет 10 с при резком увеличении мощности в энергосистеме на 40 %.

Дальнейшие исследования будут связаны с улучшением переходного процесса при всех возможных возмущениях в энергетической системе и со стороны ветроэнергетической турбины.

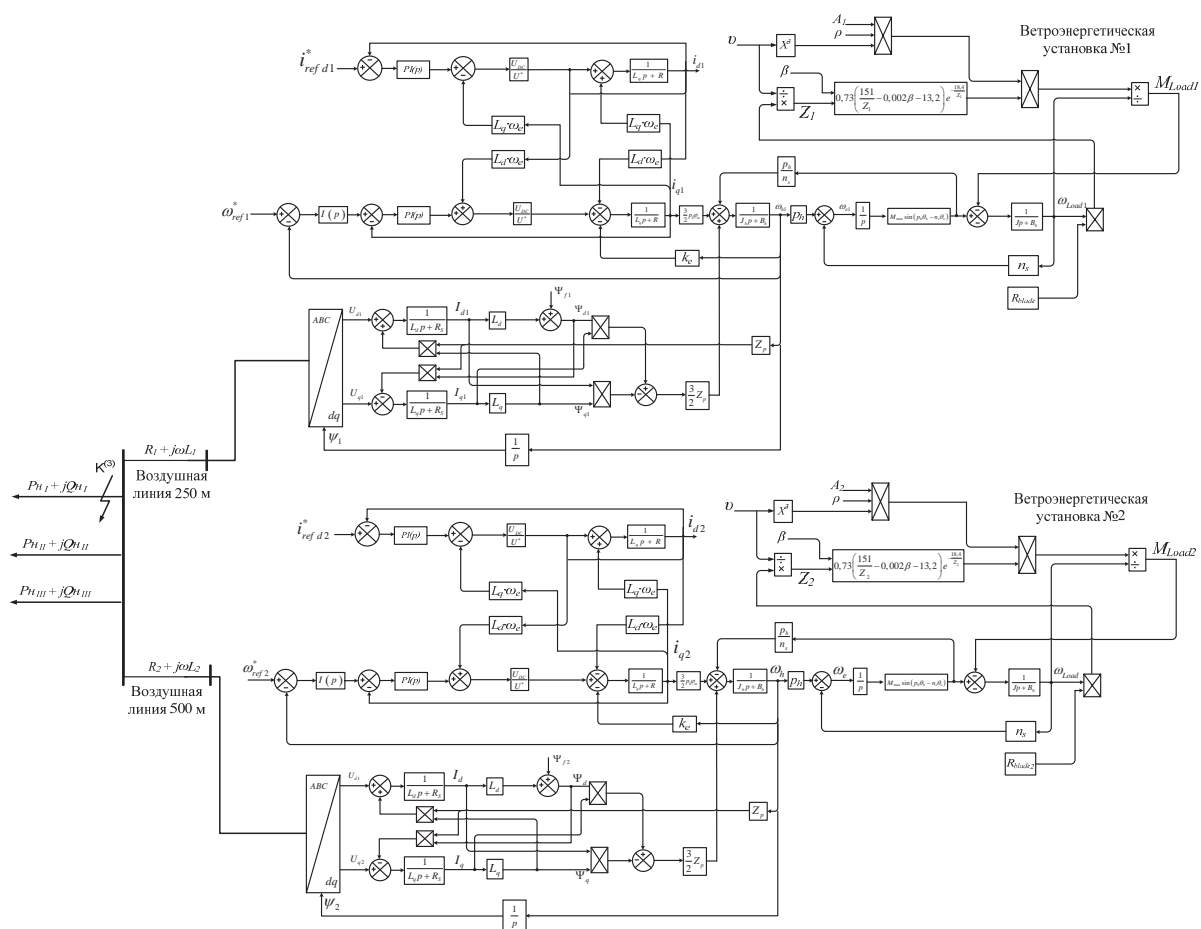


Рис. 7. Интегрированная модель ветроэнергетических установок с магнитным вариатором со схемой двухконтурного управления с подключением к локальной автономной энергетической системе

Fig. 7. Integrated model of wind turbines with a magnetic continuously variable transmission with a bypass control connection to local autonomous power system

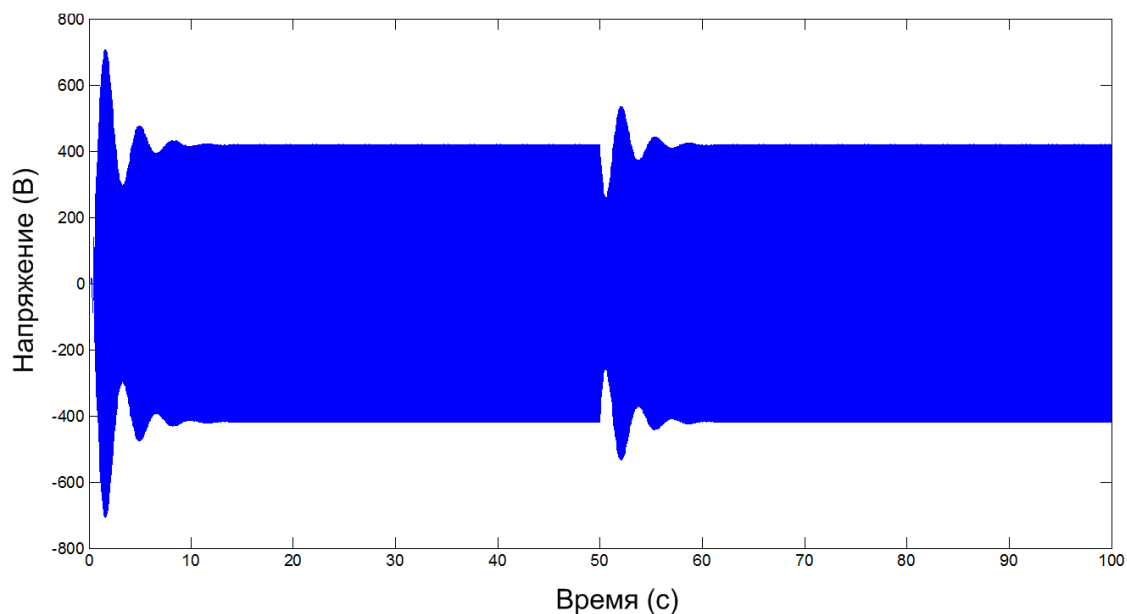


Рис. 8. Осциллограмма напряжения при поддержании синхронной скорости параллельно работающих генераторов

Fig. 8. Oscillogram of voltage while maintaining synchronous speed of parallel running generators

### Заключение

В результате проведенных исследований была получена математическая модель системы электроснабжения, состоящая из двух электрических генераторов ветроэнергетических установок. Была предложена схема, состоящая из магнитных вариаторов и системы управления для стабилизации скорости вращения выходного ротора магнитного вариатора, присоединенного к генератору. Это позволило повысить динамическую устойчивость при переходных процессах в локальной энергетической системе.

Численные расчеты при резком изменении нагрузки на 40 % показали восстановление параллельной работы синхронных генераторов с постоянными магнитами через 10 с. Таким образом, исследован подход к сопряжению генератора ветроэнергетической установки и магнитного вариатора в составе с автономной энергетической системы без использования инвертора в силовой части цепи.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-38-00147 мол\_а.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Удалов С.Н., Манусов В.З. Моделирование ветроэнергетических установок и управление ими на основе нечеткой логики: монография. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013. – 200 с.
2. Удалов С.Н. Возобновляемые источники энергии. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013. – 458 с.
3. Альдо В. да Роза. Возобновляемые источники энергии. Физико-технические основы. – М.: ИД «Интеллект», МЭИ, 2010. – 704 с.
4. Ragheb M., Tung M.T. Kinetic energy flywheel energy storage. – Champaign, IL, USA: University of Illinois at Urbana-Champaign, 2013. – 13 p.
5. Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. – 664 с.
6. Идентификация параметров схемы замещения и контроль устойчивости нагрузки в режиме on-line / А.Л. Нагайцев, А.В. Семенов, Р.В. Федюков, А.Г. Фишов, В.О. Чершова // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего востока. – 2015. – № 3. – С. 198–203.
7. Fishov A.G., Klavsuts D.A., Klavsuts I.L. Multi-agent regulation of voltage in smart grid system with the use of distributed generation and customers // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – V. 698: Electrical Engineering, Energy, Mechanical Engineering, EEM 2014. – P. 761–767.
8. Cheban V.M., Tolkatsky R.A. Applying of the stator rotation to increase controllability of AC electrical machines // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – V. 698: Electrical Engineering, Energy, Mechanical Engineering, EEM 2014. – P. 155–159.
9. Толкацкий Р. А., Чебан В. М. Использование вращения статора генераторов и двигателей переменного тока для регулирования их режимных параметров // Материалы Международной молодежной научно-технической конференции СЮ «управление, информация и оптимизация в электроэнергетических системах». – Новосибирск, 2011. – С. 23–28.
10. Rasmussen P.O. et al. Development of a high-performance magnetic gear // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2005. – V. 41. – № 3. – P. 764–770.
11. Montague R., Bingham C., Atallah K. Servo control of magnetic gears // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. – 2012. – V. 17. – № 2. – P. 269–278.
12. Bouheraoua M., Wang J., Atallah K. Speed Control for a Pseudo Direct Drive Permanent-Magnet Machine with One Position Sensor on Low-Speed Rotor // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2014. – V. 50. – № 6. – P. 3825–3833.
13. Wang J., Atallah K. Modeling and control of «pseudo» direct-drive brushless permanent magnet machines // Proc. IEEE IEMDC. – Miami, 2009. – P. 870–875.
14. Montague R., Bingham C., Atallah K. Servo control of magnetic gears // IEEE. ASME Trans. Mechatronics. – April 2012. – V. 17. – № 2. – P. 269–278.
15. Polinder H. Trends in Wind Turbine Generator Systems // IEEE Journal of emerging and selected topics in power electronics. – 2013 September. – V. 1. – № 3. – P. 174–185.
16. Удалов С.Н., Приступ А.Г., Ачитаев А.А. Исследование магнитной трансмиссии с переменным передаточным отношением в ветроэнергетической установке в целях повышения запаса динамической устойчивости // Известия Томского политехнического университета. – 2015. – Т. 326. – № 10. – С. 123–132.
17. Atallah K., Calverley S.D., Howe D. High-performance magnetic gears // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2004. – V. 272. – P. E1727–E1729.
18. Atallah K. et al. A novel «pseudo» direct-drive brushless permanent magnet machine // IEEE Transactions on Magnetics. – 2008. – V. 44. – № 11. – P. 4349–4352.
19. Aho J.P., Kraft L.G. Control of a Wind Turbine with a Magnetic Continuously Variable Transmission for Mitigation of Torque Variations // 49th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition 4–7 January 2011, Orlando, Florida – P. 1–28.
20. Atallah K., Wang J. A brushless permanent magnet machine with integrated differential // IEEE Transactions on Magnetics. – 2011. – V. 47. – № 10. – P. 4246–4249.

*Поступила 15.08.2016.*

### Информация об авторах

**Удалов С.Н.**, кандидат технических наук, доцент кафедры систем электроснабжения предприятий Новосибирского государственного технического университета.

**Ачитаев А.А.**, аспирант кафедры систем электроснабжения предприятий Новосибирского государственного технического университета.

**Приступ А.Г.**, кандидат технических наук, доцент кафедры электромеханики Новосибирского государственного технического университета.

**Боченков Б.М.**, кандидат технических наук, доцент кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок Новосибирского государственного технического университета.



UDC 621.3.077.2:621.3.077.3

## INCREASE OF DYNAMIC STABILITY STOCK OF AUTONOMOUS ENERGY SYSTEM BASED ON WIND ENERGY INSTALLATIONS UNDER SUDDEN LOAD CHANGE

**Sergey N. Udalov**<sup>1</sup>,  
oudalovsn@yandex.ru

**Andrey A. Achitaev**<sup>1</sup>,  
ac-an-alec@mail.ru

**Alexander G. Pristup**<sup>1</sup>,  
a\_pristup@mail.ru

**Boris M. Bochenkov**<sup>1</sup>,  
bochenkov@ngs.ru

<sup>1</sup> Novosibirsk State Technical University,  
20, K. Marks avenue, Novosibirsk, 630073, Russia.

Nowadays, wind power engineering is developing in two equal directions. The first one is the increase of rated power for a single wind turbine by mass and dimensions parameters of a wind turbine with the use of high-voltage generators. The second direction is modernization of wind turbine elements and implementation of modern control systems for a whole wind turbine and for its elements to enhance power generation. These power sources are characterized by low inertia and small margin of dynamic stability under sharp power variations, for example, under short circuits. In recent years magnetic gears and variators investigations are widely used. These investigations are associated with high energy performance of magnetic gears and variators which can reduce the weight and size parameters and reduce the need for maintenance. Using magnetic variable-speed drives in wind turbines generator justified the possibility of regulating directly generator rotation speed. The paper is devoted to the use of magnetic continuously variable transmission to synchronize generators in power system under transient processes. A generator rotor rotational speed is regulated through magnetic variator laws and it is based on use of two subordinate regulation circuits.

**The main aim** of the study is to increase dynamic stability stock of the local power supply system consisting of wind power generators operating in parallel.

**The methods:** development of mathematical models of magnetic transmission using classical Park–Gorev transformations; using the laws of slave control when negotiating rotation speed in case of overload.

**The results.** The authors have developed the mathematical model of local energy system consisting of parallel operating wind turbines with synchronous generators with permanent magnets. Synchronous operation of generators is supported by use of magnetic continuously variable transmission. The paper demonstrated the possibility to stabilize the generator rotation speed at overload.

### Key words:

Wind turbine, magnetic continuously variable transmission, dynamic stability, autonomous power system.

*The study was supported by RFBR, research project No. 16–38–00147 mol\_a.*

### REFERENCES

1. Udalov S.N., Manusov V.Z. *Modelirovanie vetroenergeticheskikh ustanovok i upravlenie imi na osnove nechetkoy logiki* [Modeling wind power plants and control based on fuzzy logic]. Novosibirsk, Novosibirsk State Technical University Publ. house, 2013. 200 p.
2. Udalov S.N. *Vozobnovlyaemye istochniki energii* [Renewable energy sources]. Novosibirsk, Novosibirsk State Technical University Publ. house, 2013. 458 p.
3. Aldo V. da Rosa. *Vozobnovlyaemye istochniki energii. Fiziko-tekhnicheskie osnovy* [Renewable energy sources. Physical and technical bases]. Moscow, Intellekt Publ. house, MEI, 2010. 704 p.
4. Ragheb M., Tung M.T. *Kinetic energy flywheel energy storage*. Champaign, IL, USA, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2013. 13 p.
5. Zinovev G.S. *Osnovy silovoy elektroniki* [Fundamentals of power electronics]. Novosibirsk, Novosibirsk State Technical University Publ. house, 2003. 664 p.
6. Nagaytsev A.L. Semenov A.V., Fedukov R.V., Fishov A.G., Chersnova V.O. Real Time Identification of the Load Equivalent Circuit Parameters and Stability of Load Control. *Nauchnye problemy transporta sibli i Dalnego vostoka*, 2015, no. 3, pp. 198–203. In Rus.
7. Fishov A.G., Klavtsuts D.A., Klavtsuts I.L. Multi-agent regulation of voltage in smart grid system with the use of distributed generation and customers. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 698: Electrical Engineering, Energy, Mechanical Engineering, EEM 2014, pp. 761–767.
8. Cheban V.M., Tolkatsky R.A. Applying of the stator rotation to increase controllability of AC electrical machines. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 698: Electrical Engineering, Energy, Mechanical Engineering, EEM 2014, pp. 155–159.
9. Tolkatsky R.A., Cheban V.M. Using the stator rotation generators and AC motors to regulate their mode parameters. *International Youth Scientific and Technical Conference of the CIO. Management, information and optimization in power systems*. Novosibirsk, 2011. pp 23–28. In Rus.
10. Rasmussen P.O. Development of a high-performance magnetic gear. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2005, vol. 41, no. 3, pp. 764–770.
11. Montague R., Bingham C., Atallah K. Servo control of magnetic gears. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2012, vol. 17, no. 2, pp. 269–278.

12. Bouheraoua M., Wang J., Atallah K. Speed Control for a Pseudo Direct Drive Permanent-Magnet Machine With One Position Sensor on Low-Speed Rotor. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2014, vol. 50, no. 6, pp. 3825–3833.
13. Wang J., Atallah K. Modeling and control of «pseudo» direct-drive brushless permanent magnet machines. *Proc. IEEE IEMDC*. Miami, 2009, pp. 870–875.
14. Montague R., Bingham C., Atallah K. Servo control of magnetic gears. *IEEE. ASME Trans. Mechatronics*, April 2012, vol. 17, no. 2, pp. 269–278.
15. Polinder H. Trends in Wind Turbine Generator Systems. *IEEE Journal of emerging and selected topics in power electronics*, 2013 September, vol. 1, no. 3, pp. 174–185.
16. Udalov S.N. Research of magnetic transmission with variable gear ratio in a wind-driven generator for improving dynamic stability. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2015, vol. 326, no. 10, pp. 123–132. In Rus.
17. Atallah K., Calverley S.D., Howe D. High-performance magnetic gears. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2004, vol. 272, pp. E1727–E1729.
18. Atallah K. A novel «pseudo» direct-drive brushless permanent magnet machine. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2008, vol. 44, no. 11, pp. 4349–4352.
19. Aho J.P., Kraft L.G. Control of a Wind Turbine with a Magnetic Continuously Variable Transmission for Mitigation of Torque Variations. 49<sup>th</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition 4–7 January 2011, Orlando, Florida. pp. 1–28.
20. Atallah K., Wang J. A brushless permanent magnet machine with integrated differential. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2011, vol. 47, no. 10, pp. 4246–4249.

Received: 15 August 2016.

#### Information about the authors

**Sergey N. Udalov**, Cand. Sc., associate professor, Novosibirsk State Technical University.

**Andrey A. Achitav**, postgraduate student, Novosibirsk State Technical University.

**Alexander G. Pristup**, Cand. Sc., associate professor, Novosibirsk State Technical University.

**Boris M. Bochenkov**, Cand. Sc., associate professor, Novosibirsk State Technical University.

УДК 550.812:553.074:553.411

## НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ И ЗОЛОТОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ РУДОПРОЯВЛЕНИЯ ЮЖНОЕ (ЕНИСЕЙСКИЙ КРЯЖ)

Мансуров Ринат Халитович,  
rinman81@bk.ru

Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов,  
Россия, 117545, г. Москва, Варшавское шоссе, 129, к. 1.

**Актуальность работы** обусловлена необходимостью выявления новых золоторудных месторождений в пределах Енисейского кряжа с целью восполнения минерально-сырьевой базы коренного золота России.

**Цель работы:** изучение особенностей геологического строения и золотоносных минерализованных зон рудопоявления Южное с целью прогнозирования промышленных золоторудных тел, обоснование дальнейших геологоразведочных работ на объекте исследований.

**Методы исследования.** Поисковые работы осуществлялись по экспрессной методике поисков золоторудных месторождений в сложных горно-таежных ландшафтах с применением комплекса литохимического по вторичным ореолам рассеяния, шлихового, точечного и бороздового опробования, выполнялись химико-спектральный на золото, ICP-MS, пробирно-атомно-абсорбционный, рентгено-фазовый анализы, проводились изотопно-геохимические исследования.

**Результаты исследований.** Комплексирование методов поисков позволило выявить рудоконтролирующую зону складчато-разрывных деформаций и локализовать в ее пределах рудопоявление Южное, которое расположено в юго-восточной части Средне-Ишимбинской перспективной площади в зоне динамического влияния системы Ишимбинского глубинного разлома. В пределах рудопоявления выявлены золотоносные минерализованные зоны, представляющие собой серию крупнообъемных зон-залей штокверкоподобного строения субсогласного залегания с низкими средними содержаниями золота. В пределах наиболее мощной и протяженной минерализованной зоны Центральной прогнозируется выявление промышленных золоторудных тел, рекомендуется продолжение геологоразведочных работ на объекте. Проведено сопоставление рудопоявления с объектами-аналогами, установлен ряд общих критериев и признаков исследуемого объекта с крупнообъемными золото-сульфидными месторождениями Енисейского кряжа – Олимпиадинским, Ведугинским и др., а также с месторождениями «карлинского» типа.

**Выводы.** Впервые в регионе выявлены золотоносные минерализованные зоны в среднерифейских углеродсодержащих терригенно-карбонатных отложениях свит аладынской и карточки. Установлены перспективы золотоносности восточного склона Енисейского кряжа.

### Ключевые слова:

Восточный склон Енисейского кряжа, рудопоявление Южное, свиты аладынская и карточки, золотоносные минерализованные зоны.

### Постановка задачи

Широко известно, что подавляющее большинство золоторудных месторождений на Енисейском кряже локализуется в достаточно узком литолого-стратиграфическом интервале, представленном углеродистыми карбонатно-терригенными ранне-среднерифейскими отложениями сухопитской серии: кординской ( $R_1kd$ ), горбилокской ( $R_2gb$ ), удерейской ( $R_2ud$ ), частично погорюйской ( $R_2pg$ ) свитами, а также раннепротерозойскими кристаллосланцами пенченгинской свиты ( $PR_1pn$ ) [1]. Выделяются два главных геолого-промышленных типа: золото-сульфидно-кварцевый (минерализованные зоны с жильно-прожилковыми и прожилково-вкрапленными залежами – Олимпиадинское, Ведугинское, Благодатное и др.) и золото-(малосульфидно)-кварцевый (жилы и системы жил – месторождения Советское, Эльдорадо, Аяхтинское, Васильевское и др.) [2, 3]. В структурном плане практически все золоторудные месторождения Енисейского кряжа приурочены к полосе север-северо-западного (ССЗ) простирания шириной около 40 км между Татарским (с запада) и Ишимбинским (с востока) глубинными долгоживущими рудоконтролирующими разломами [4]. Причем месторождения

золото-(малосульфидно)-кварцевого типа преимущественно «тяготеют» к зоне Ишимбинского разлома, а золото-сульфидно-кварцевое – к экзоконтактам крупных гранитоидных интрузий в зоне динамического влияния Татарского разлома [2].

Недавние результаты поисковых работ ФГУП ЦНИГРИ в пределах Средне-Ишимбинской перспективной площади, расположенной на восточном склоне Енисейского кряжа, показали, что золотоносность территории не ограничивается вышеназванным литолого-стратиграфическим уровнем (рис. 1) [5, 6]. Исследования выполнялись в период с 2013 по 2015 г. в рамках госконтракта Роснедра «Поисковые работы на большеобъемное золотое оруденение, локализованное в углеродисто-терригенных комплексах в пределах Енисейской, Байкало-Патомской и Верхояно-Колымской золоторудных провинций».

С целью выделения и локализации перспективных площадей в ранге рудных узлов и рудных полей под постановку непосредственно поисковых работ был осуществлен сбор и анализ фондовых и опубликованных материалов по золотоносности Енисейской золоторудной провинции. В результате в качестве одного из наиболее перспективных



**Рис. 1.** Географо-административная карта района работ: 1 – железнодорожные линии; 2 – автодороги: а) I класса, б) грунтовые; 3 – контуры: а) Средне-Ишимбинской перспективной площади, б) рудопоявления Южное

**Fig. 1.** Geographic-administrative map of the survey area. 1 are the railway lines; 2 are the motorways: a) I class, b) ground; 3 are the contours of the: a) Sredne-Ishimbinskaya perspective area, b) gold ore occurrence Yuzhnoe

объектов был выбран Нижне-Чиримбинский потенциально золоторудный узел, расположенный в центральной части Средне-Ишимбинской площа-

ди (рис. 2). В его пределах предшествующими работами было локализовано Марокское рудопоявление золото-малосульфидно-кварцевого типа [5, 7]. Последнее выбрано нами в качестве объекта-эталона. Кроме того, рудный узел обладает большим количеством пунктов коренной золотой минерализации, а также продуктивными россыпями руч. Мароко, Яхота, Находный и р. Чиримба. Помимо Нижне-Чиримбинского рудного узла был выделен ряд потенциально перспективных площадей, привлекающих внимание наличием коренных рудопоявлений золота, богатых россыпей, а также аномальных концентраций металла в потоках рассеяния. Среди них выделяются площади в ранге рудных узлов с апробированными (ФГУП ЦНИГРИ) и авторскими прогнозными ресурсами золота категории  $R_3$ . Однако подавляющее большинство из этих площадей залицензировано.

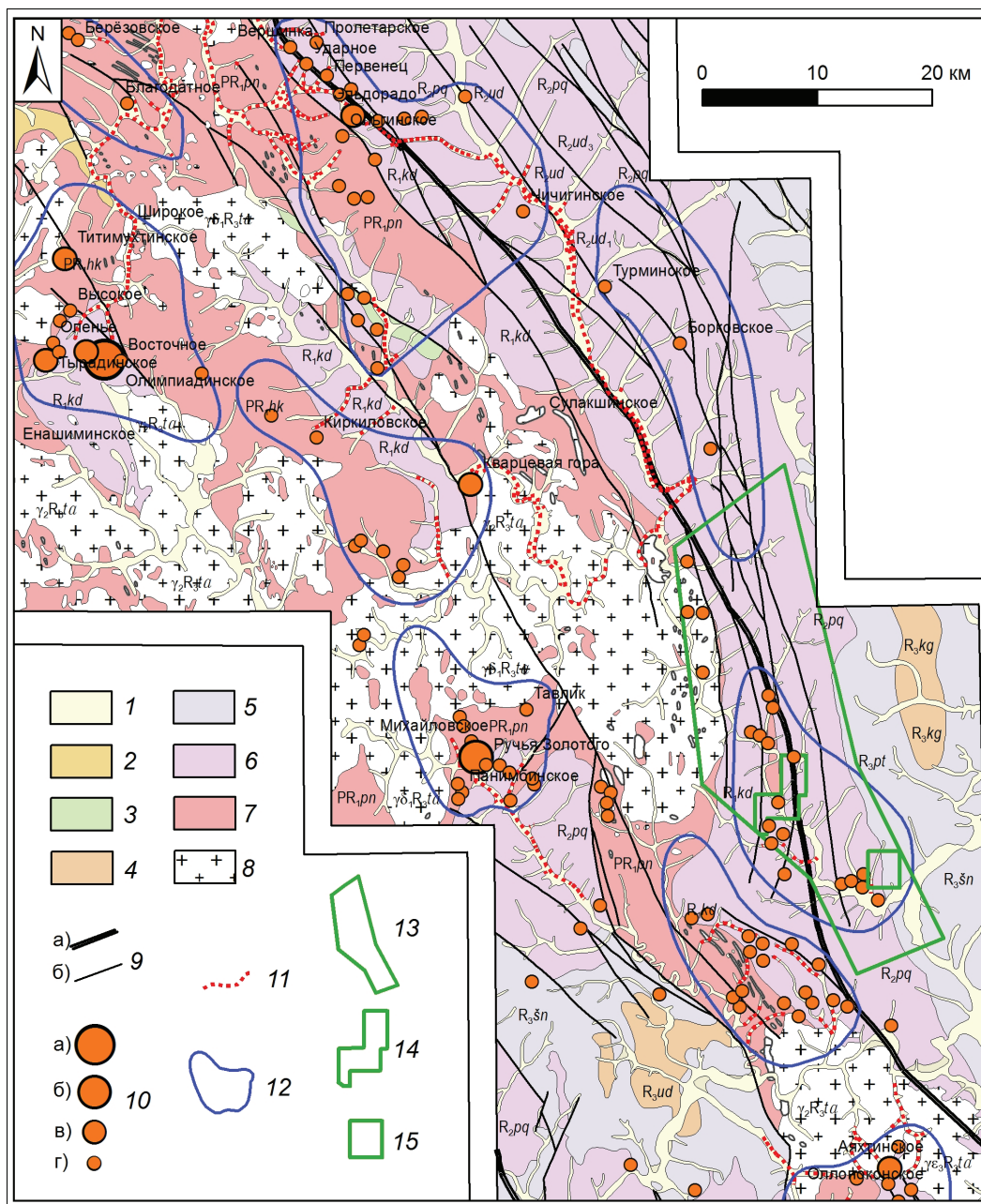
Основной задачей исследований являлась локализация и оценка прогнозных ресурсов рудного золота категории  $R_2$ , а также разработка технологии прогноза, поисков и оценки большеобъемных золоторудных месторождений в углеродисто-терригенных комплексах и представление рекомендаций по направлению дальнейших геолого-разведочных работ. Автор статьи являлся начальником полевой партии и ответственным исполнителем работ, осуществлявшихся в пределах Енисейской провинции. Под его руководством выполнялся весь комплекс поисковых исследований и последующая камеральная обработка полученных данных. В работе принимали участие сотрудники ФГУП ЦНИГРИ: С.Г. Кряжев (зав. отделом минералогии и изотопной геохимии), Б.С. Зеликсон (научный сотрудник), А.В. Курмаев (инженер 2-й категории), С.С. Двуреченская (старший научный сотрудник) и др.

#### Методика исследований

Проведение поисков на рудное золото в исследуемом регионе затруднено значительной закрытостью склонов и водоразделов, развитием многолетнемерзлых моховых и гумусово-торфяных сло-

**Fig. 2.** Overview scheme of central and eastern parts of the Yenisei ridge (compiled using the data of «Krasnoyarskgeolsemka»). 1–7 are the stratified formations: 1 are the quaternary sediments; 2 is the carbonate-terrigenous calcareous-dolomitic-siltstone-sandstone variegated complex (nemchanskaya (Vnm), podemskaya (Vpd), suvorovskaya (Vsv), moshakovskaya (Vms), chistyakovskaya (Vcv), aleshinskaya (Val) series); 3 is the carbonate-terrigenous calcareous-sandstone-siltstone-schist complex (chividinskaya ( $R_3cv$ ), karyernaya ( $R_3krr$ ), lopatinskaya ( $R_3lp$ ) series); 4 is the flyshoid carbonate-terrigenous carbonaceous calcareous-sandstone-schist complex (sukhokhrebinskaya ( $R_3sh$ ), gorevskaya ( $R_3grv$ ), moryanikhinskaya ( $R_3mr$ ), dashkinskaya ( $R_3ds$ ), nizhneangarskaya ( $R_3na$ ), mokrinskaya ( $R_3mk$ ), rybinskaya ( $R_3rb$ ), boreminskaya ( $R_3br$ ), udorskaya ( $R_3ud$ ) series); 5 is the carbonaceous carbonate-terrigenous dolomitic-calcareous-phyllite-sandstone-schist complex (shuntarskaya ( $R_3sn$ ), potoskuyskaya ( $R_3pt$ ), alad'inskaya ( $R_3al$ ), kartochki ( $R_3kr$ ) series); 6 is the carbonaceous volcanogenic-carbonate-terrigenous tuffaceous-calcareous-phyllite-sandstone-schist complex (udereyskaya ( $R_2ud$ ), gorbilokskaya ( $R_2gr$ ), kordinskaya ( $R_2kd$ ) series); 7 is the carbonate-terrigenous crystalline-schist complex (penchenginskaya series (PR,pn)); 8 are the intrusive formations: plagiogranodiorite complex (tatarsko-ayakhtinskiy granodiorite-plagiogranite ( $R_3ta$ ), teyskiy gneiss-granite ( $R_2te$ )); 9 are the faults: a) «long-lived» zones of faults, b) co-directional fault; 10 are the gold ore deposits and ore occurrences: a) very large, b) large, c) average, d) ore occurrence; 11 are the line-formed gold placers (in exploration, in exploit, wasted); 12 are the contours of gold ore and placer ore units; 13 is the contour of the Sredne-Ishimbinskaya perspective area; 14 is the contour of the gold ore occurrence Marokskoe; 15 is the contour of the gold ore occurrence Yuzhnoe





**Рис. 2.** Обзорная схема центральной и восточной частей Енисейского кряжа (составлено с использованием данных ОАО «Красноярскгеолсъемка»): 1–7 – стратифицированные образования: 1 – четвертичные отложения; 2 – карбонатно-терригенный известково-доломито-алевритопесчаный пестроцветный комплекс (немчанская (Vnm), подъемская (Vpd), суворовская (Vsv), мошакская (Vms), чистяковская (Vcv), алейская (Val) свиты); 3 – карбонатно-терригенный известково-песчано-алеврито-сланцевый комплекс (чивидинская (R<sub>3</sub>cv), карьерная (R<sub>3</sub>kr), лопатинская (R<sub>3</sub>lp) свиты); 4 – флишеидный карбонатно-терригенный углеродсодержащий известково-песчано-сланцевый комплекс (сухохребтинская (R<sub>3</sub>sh), горевская (R<sub>3</sub>grv), морянинская (R<sub>3</sub>mr), дашкинская (R<sub>3</sub>ds), нижеангарская (R<sub>3</sub>na), мокринская (R<sub>3</sub>mk), рыбинская (R<sub>3</sub>rb), бореминская (R<sub>3</sub>br), удоронская (R<sub>3</sub>ud) свиты); 5 – углеродсодержащий карбонатно-терригенный доломито-известково-филито-песчано-сланцевый комплекс (шунтарская (R<sub>3</sub>sn), потоскуйская (R<sub>3</sub>pt), ала-дынская (R<sub>3</sub>al), карточки (R<sub>3</sub>kr) свиты); 6 – углеродсодержащий вулканогенно-карбонатно-терригенный туфогенно-известково-филито-песчано-сланцевый комплекс (удерейская (R<sub>3</sub>ud), горбилковская (R<sub>3</sub>gr), кординская (R<sub>3</sub>kd) свиты); 7 – карбонатно-терригенный кристаллосланцевый комплекс (пенченгинская свита (PR<sub>3</sub>pn)); 8 – интрузивные образования: плагиогранодиоритовый комплекс (татарско-аяхтинский гранодиорит-плагиогранитовый (R<sub>3</sub>ta), тейский гнейсогранитовый (R<sub>3</sub>te)); 9 – разрывные нарушения: а) долгоживущие зоны разломов, б) оперяющие к ним разрывы; 10 – месторождения и проявления коренного золота: а) весьма крупные, б) крупные, в) средние, г) проявления; 11 – промышленные линейные россыпи золота (разведываемые, разрабатываемые, отработанные); 12 – контуры золоторудно-россыпных узлов; 13 – контур Средне-Ишимбинской перспективной площади; 14 – контур Марокского рудопроявления; 15 – контур рудопроявления Южное

ев значительной мощности. В таких условиях традиционные методы поисков оказываются недостаточно эффективными, поскольку информативный для оценки золотоносности надкоренной элювиально-делювиальный слой перекрыт дальнепринесенными отложениями. Стандартное литохимическое опробование по вторичным ореолам рассеяния (ВОР) подпочвенного горизонта зачастую не позволяет выявлять аномалии золота и сопутствующих элементов. В связи с отмеченным фактом при проведении поисковых работ на Средне-Ишимбинской перспективной площади применялась «Экспрессная методика поисков золоторудных месторождений в сложных горно-таежных ландшафтах», успешно апробированная ФГУП ЦНИГРИ на золоторудных объектах Байкало-Патомской и Верхояно-Колымской золоторудных провинций, Лебединского золоторудного узла (Саха-Якутия) и др. [8]. Данная методика позволяет в достаточно короткие сроки с использованием минимального объема горно-буровых работ оценить золотоносность и ресурсный потенциал поисковых участков в ранге рудных полей. Методика основана на комплексировании следующих известных методов и способов изучения делювиально-элювиальных отложений в целях поисков месторождений рудных полезных ископаемых: обломочном (оконтуривание делювиальных свалов рудных тел), копушения, минералогическом (+ минералого-геохимическом), литохимическом [9]. Поисковые работы осуществлялись в несколько последовательных этапов.

На первом этапе поисковых работ перспективная площадь была изучена серией опорных геолого-геофизических профилей с целью выявления рудоконтролирующих зон складчато-разрывных деформаций (рассланцевания). Длина профилей – до 12 км, расстояние между ними – 4–5 км. Исследования включали комплекс геологических (геолого-поисковые маршруты), геохимических (литохимическое опробование по ВОР подпочвенного горизонта на глубине 0,3–0,4 м, литохимическое по ВОР и сколковое (точечное) опробование нижнего надкоренного информативного слоя элювиально-делювиальных отложений в забое шурфов глубиной 1 м, пройденных с интервалом 800 м между шурфами) и геофизических (электро-, грави-, магниторазведка) методов поисков. На этом же этапе осуществлялись геохимические поиски по потокам рассеяния (ПР) масштаба 1:50 000 [10].

Комплексирование методов поисков позволило уже на раннем этапе исследований определить наиболее перспективные поисковые участки для проведения дальнейших геолого-разведочных работ (ГРР) в пределах выявленных рудоконтролирующих зон рассланцевания. Перспективные участки выделялись по первичным ореолам (ПО), ВОР, наличию прожилково-вкрапленной железо-магнезиальной карбонатизации и сульфидизации, кварцевой жильно-прожилковой минерализации в элю-

виально-делювиальных отложениях. По данным ЗАО «НПП ВИРГ-Рудгеофизика», в геофизических полях эти участки отвечают областям разрушения («распада») структуры магнитного поля. Данный признак, вероятно, обусловлен разрушением первичного осадочно-метаморфического пирротина в пределах магнитных маркирующих горизонтов за счет его преобразования в пирит.

На втором этапе поисковых работ в пределах перспективных поисковых участков осуществлялись площадные литохимические поиски по ВОР, проходка линий копушей глубиной 0,8–1,0 м, геолого-поисковые маршруты масштаба 1:10 000. Литохимические поиски по ВОР велись по нестандартной сети – 200×20 м, глубина опробования – 0,3–0,4 м. Проходка линий копушей глубиной 0,8–1,0 м осуществлялась по нижним бортам склонов с интервалом 20–40 м между копушами с целью шлихового и литохимического по ВОР опробования нижнего надкоренного информативного слоя элювиально-делювиальных отложений. Кроме того, производилось сколковое опробование гидротермально-измененных пород с кварцевой жильно-прожилковой, железо-магнезиально-карбонатной и сульфидной вкрапленной минерализацией. Геолого-поисковые маршруты проводились с целью изучения гидротермально-метасоматических процессов, выяснения природы потенциально рудоконтролирующих и рудокаллизующих элементов космодешифрирования, выявления и прослеживания потенциально золотоносных минерализованных зон. Следует отметить, что элювиально-делювиальные отложения практически повсеместно перекрыты почвенно-растительным слоем. Редко отмечаются малосмещенные делювиальные крупнощелбино-глыбовые развалы измененных пород, в связи с чем доступ к информативному слою элювиально-делювиальных отложений возможен лишь с помощью проходки копушей глубиной не менее 0,6 м. Поиски второго этапа позволили выявить потенциально золотоносные минерализованные зоны в пределах нескольких поисковых участков [10].

На третьем этапе поисков с целью локализации золотоносных минерализованных зон выполнялась проходка линий шурфов до коренных пород с интервалом 10–20 м между шурфами и бульдозерных расчисток глубиной 1 м. Осуществлялось шлиховое и литохимическое по ВОР опробование нижнего информативного слоя элювиально-делювиальных отложений в забое шурфов на глубине 1,0–1,4 м, а также бороздовое опробование коренных пород в полотне шурфов. По результатам опробования были выделены наиболее минерализованные участки с содержанием золота более 0,1 г/т в ПО и ВОР для вскрытия бульдозерными расчистками. Поиски этого этапа позволили локализовать серию золотоносных минерализованных зон в юго-восточной части перспективной площади – рудопоявление Южное.

Важным представляется тот факт, что результаты литохимического по ВОР опробования нижнего надкоренного информативного слоя элювиально-делювиальных отложений существенно отличаются от данных стандартного опробования на глубине 0,3–0,4 м, выявляя наиболее высокие аномальные концентрации золота в ВОР. Последние установлены именно по результатам литохимического опробования по ВОР на контакте с коренными породами по горным выработкам. Аномалии золота в ВОР практически совпадают с повышенными содержаниями металла в ПО. Полученные данные показали, что методика литохимического опробования по ВОР нижнего информативного слоя элювиально-делювиальных отложений позволяет с высокой степенью точности определить положение золотоносных минерализованных зон и потенциально рудных зон в их пределах.

Четвертый завершающий этап поисков – комплекс горно-буровых работ. Наиболее перспективные минерализованные участки в пределах золотоносных зон были вскрыты траншеями до коренных пород. По результатам бороздового опробования полотна траншей выявлены эпицентры повышенных содержаний золота (более 0,3 г/т в ПО). Последние были «подсечены» несколькими буровыми скважинами. В результате выявлена серия потенциально рудных зон. Исследования предусматривали весьма незначительный объем бурения, в этой связи требуется постановка дополнительных поисковых работ с целью локализации промышленных золоторудных зон в пределах рудопоявления Южное.

В заключение к методической части исследований следует отметить, что новыми и наиболее эффективными направлениями использованной методики являются: 1) применение комплекса геологических, геофизических и геохимических методов по опорным профилям, позволяющего уже на ранней стадии изучения определить наиболее перспективные потенциально рудоконтролирующие зоны расланцевания и поисковые участки в пределах исследуемых площадей; 2) литохимическое по ВОР опробование нижнего информативного слоя элювиально-делювиальных отложений, которое дает возможность максимально точно локализовать золотоносные минерализованные зоны, непосредственно определить участки для последующих горно-буровых работ и, соответственно, минимизировать затраты на проведение геолого-разведочных работ.

### Результаты исследований

Особенности геологического строения

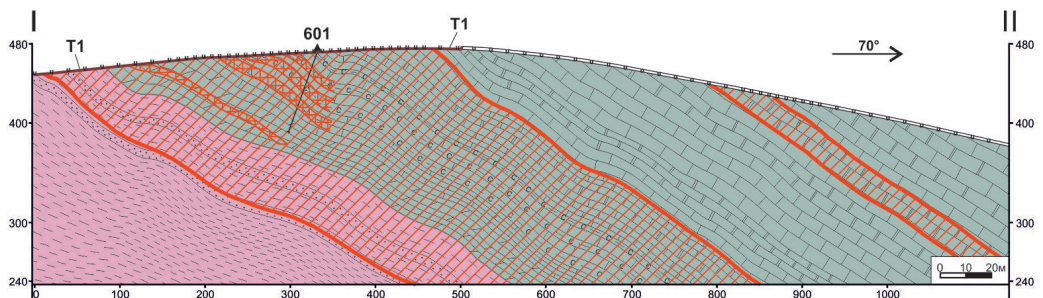
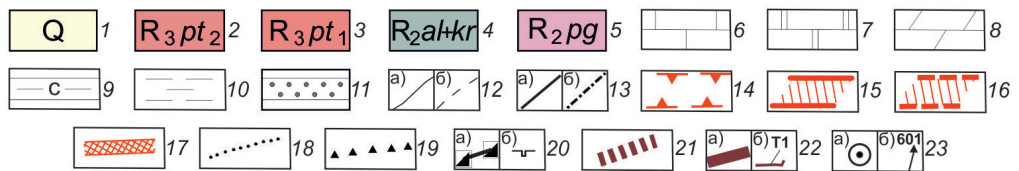
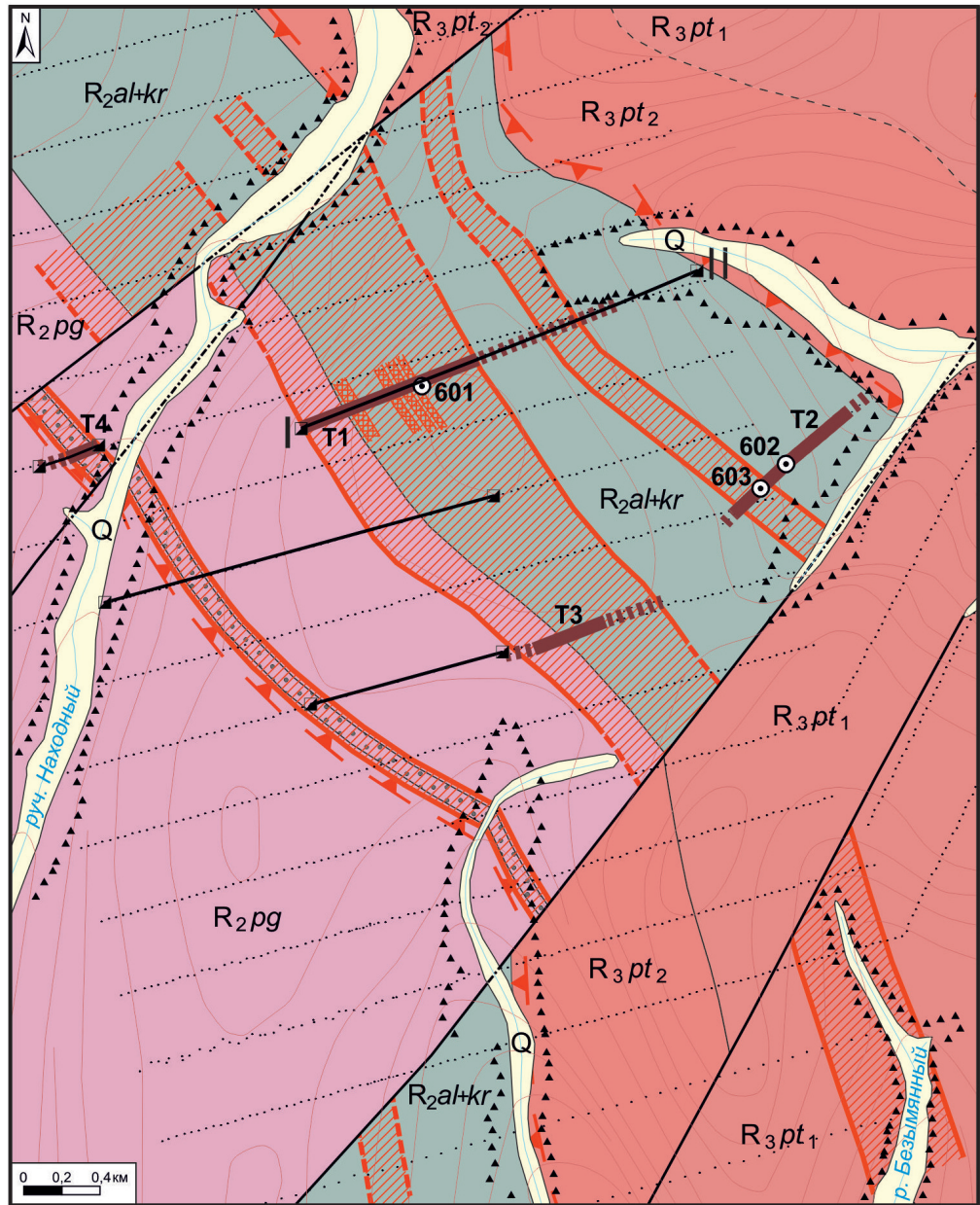
Восточный склон Енисейского кряжа представляет собой вытянутый на 700 км покровно-складчатый пояс ССЗ простирающийся в юго-западном обрамлении Сибирской платформы [7]. Особенностью этой части Енисейского кряжа является широкое развитие средне-верхнерифейских углеродсодер-

жащих терригенно-карбонатных отложений. Средне-Ишимбинская перспективная площадь, расположенная в 120 км к юго-востоку от пгт. Северо-Енисейский (рис. 1), охватывает Нижне-Чиримбинский узел, а также ряд россыпных проявлений золота. Рассматриваемая площадь приурочена к восточному крылу Певунской горст-антиклинали первого порядка в зоне динамического влияния Ишимбинской системы глубинных рудоконтролирующих разломов ССЗ простирающихся. В западной части площади в приядерной части горст-антиклинали получили развитие выходы кристаллического фундамента пенченгинской свиты в экзоконтактовой части с крупным гранитоидным массивом татарско-аяхтинского интрузивного комплекса (рис. 2). В восточном направлении происходит наращивание разреза, здесь распространены отложения свит аладьинской и карточки объединенных ( $R_{al+kr}$ ), потоскуйской свиты ( $R_{pt}$ ).

Зона расланцевания рудопоявления Южное локализована в узле пересечения разрывных нарушений ССЗ направления, сонаправленного Ишимбинской системе разломов, секущими пострудными разрывами субширотной ВСВ ориентировки. Зона расланцевания осложнена мелкой складчатостью высоких порядков, флексурными перегибами. В пределах рудопоявления Певунская горст-антиклиналь представляет собой моноклинал ВСВ падения (рис. 3). Падение вмещающих пород в среднем составляет  $35^{\circ}$ – $40^{\circ}$ . В некоторых участках падение варьирует от  $20^{\circ}$  до  $60^{\circ}$ , что обусловлено мелкой осложняющей складчатостью. Вмещающие породы представлены (от древних к молодым): алевроито-глинистыми сланцами с прослоями кварцитовидных песчаников и кварцитов погорюйской свиты, известняками, мраморизованными известняками с прослоями углеродсодержащих известковисто-глинистых сланцев свит аладьинской и карточки объединенных сухопитской серии, и глинистыми сланцами потоскуйской свиты тунгусикской серии. Присутствие углеродистого вещества (УВ) установлено по данным микроскопических исследований в отложениях основной рудовмещающей толщи – терригенно-карбонатных отложениях нижней пачки свит карточки и аладьинской объединенных, а точнее в прослоях известковисто-глинистых сланцев кварцкальцит-серицитового состава. Содержание УВ в породе незначительно и составляет не более 0,5 %.

Площадь рудопоявления является амагматичной. Однако ее расположение в 15 км восточнее зоны выходов на дневную поверхность гранитоидов татарско-аяхтинского интрузивного комплекса предполагает, в той или иной степени, «влияние» и пространственную связь гранитоидов с формированием золоторудной минерализации рудопоявления. По данным геофизических исследований, выполненных ЗАО «НПП ВИРГ-Рудгеофизика», отрицательная гравиметрическая аномалия, устано-







вленная на площади рудопоявления, может интерпретироваться как скрытый на глубине до 2 км интрузивный массив. То есть, несмотря на амагматичность территории и удаленность от выходов на дневную поверхность интрузивных образований, нельзя исключать связь последних с золоторудной минерализацией объекта исследований.

Рудопоявление Южное расположено в зоне развития низкотемпературных метаморфических образований – серицит-хлоритовой субфации зеленосланцевой фации регионального метаморфизма. Это может являться косвенным благоприятным фактором, свидетельствующим о проявлении регрессивной стадии метаморфизма – диафтореза хлорит-серицитового уровня. По данным ряда авторов, в процессе регрессивного диафтореза в пределах ранее образованных золотоносных зон происходит их обогащение [11, 12].

Гидротермально-метасоматические преобразования широко проявлены в пределах всей рудоконтролирующей зоны рассланцевания рудопоявления Южное. Они представлены, главным образом, площадной (прожилково)-вкрапленной сульфидизацией (преимущественно пиритизацией) и железо-магнезиальной карбонатизацией (буропатизацией). Буропатизации подвержены все стратифицированные образования в пределах зоны рассланцевания, в особенности рудовмещающая терригенно-карбонатная толща свит аладинской и карточки. Кроме того, интенсивно проявлена мусковитизация (серицитизация), а также неравномерное окварцевание.

Буропатизация является многостадийным процессом. Наиболее ранняя буропатизация проявлена площадными изменениями в виде тонкой неравномерной вкрапленности, а также тонких секущих и согласных прожилков. В пределах золотоносных минерализованных зон, как правило, отмечается увеличение содержания вкрапленности бурого шпата, прежде всего анкерита, во вмещающих породах, достигающей 50 об. %. Причем присутствует как вкрапленность тонкого бурого шпата (до 0,5 мм) (до 40–45 об. %), так и крупные оолитоподобные выделения размером более 1–2 мм (до 10–15 об. %), возможно, метаморфогенной природы. В зонах развития кварцевой жильно-прожилковой минерализации буропатизация также проявлена достаточно интенсивно, как в виде самостоятельных тонких ( $\leq 0,5$  мм) секущих и маломощных ( $\leq 1$  мм) послойных прожилков, будинок (линз), а также вкрапленности во вмещающих породах, так и совместно с кварцевыми жильно-прожилковыми образованиями, в основном слагая их зальбандовые части. В массе кварцевых жил часто отмечаются реликты кристаллов крупнокристаллического бурого шпата – сидерита.

Околорудные окварцевание и кварцево-жильно-прожилковые образования проявлены весьма неравномерно. Окварцевание с разной степенью интенсивности развито преимущественно вдоль кварцевых жил и прожилков на расстояние до первых метров, реже до первых десятков метров. Установлены четыре основные генерации кварцевой жильно-прожилковой минерализации: 1) преимущественно

**Рис. 3.** Геологическая схема рудопоявления Южное и геологический разрез по линии I–II. 1 – четвертичные рыхлые отложения; 2–5 – углеродистые карбонатно-терригенные отложения рифея: 2–3 – тунгусикская серия, потоскуйская свита: 2 – верхняя подсвита: глинистые сланцы с прослоями известняков, 3 – нижняя подсвита: алевроито-глинистые сланцы с прослоями известняков и доломитов; 4–5 – сухопитская серия: 4 – свиты аладинская и карточка объединенные: известняки участками мраморизованные, известковистые доломиты с прослоями углеродсодержащих известковисто-глинистых сланцев, 5 – погорюйская свита: алевроито-глинистые сланцы; 6–11 – литологические обозначения (на разрезе): 6 – известняки, 7 – мраморизованные известняки, 8 – известковистые доломиты, 9 – углеродсодержащие известковисто-глинистые сланцы, 10 – алевроито-глинистые сланцы, 11 – кварцитовидные песчаники с прослоями кварцитов; 12 – геологические границы: а) установленные, б) предполагаемые; 13 – разломы: а) установленные, б) предполагаемые; 14 – рудоконтролирующая зона рассланцевания (на плане); 15–16 – золотоносные минерализованные зоны: 15 – установленные, 16 – предполагаемые; 17 – потенциально рудные зоны; 18 – точки литохимического опробования по ВОР; 19–23 – горные выработки: 19 – копуши глубиной 0,8–1,0 м, 20 – шурфы: а) на плане, б) на разрезе, 21 – бульдозерные расчистки глубиной 1 м, 22 – бульдозерные траншеи, пройденные до коренных пород: а) на плане, б) на разрезе, 23 – скважины: а) на плане, б) на разрезе

**Рис. 3.** Geological scheme of the ore occurrence Yuzhnoe and geological section by the profile I–II. 1 are the quaternary sediments; 2–5 are the carbonaceous carbonate-terrigenous sediments of the Riphean: 2–3 is the tungusikskaya formation, potoskuyskaya series: 2 is the upper subseries: shales with interlayers of limestones, 3 is the lower subseries: siltstone shales with interlayers of limestones and dolomites; 4–5 is the sukhopitskaya formation: 4 are the aladinskaya and kartochki series combined: limestones partially marbled, calcareous dolomites with interlayers of carbonaceous calcareous shales, 5 is the pogoryuyskaya series: siltstone shales; 6–11 are the lithological designation (in the geological section): 6 are the limestones, 7 are the limestones partially marbled, 8 are the calcareous dolomites, 9 are the carbonaceous calcareous shales, 10 are the siltstone shales, 11 are the quartzitic sandstones with interlayers of quartzites; 12 are the geological boundaries: a) determined, b) supposed; 13 are the faults: a) determined, b) supposed; 14 is the ore controlling zone of foliation (in the scheme); 15–16 are the gold ore mineralized zones: 15 – determined, 16 – supposed; 17 are the potential gold ore zones; 18 are the points of lithochemical sampling for secondary dispersion halos; 19–23 are the excavations: 19 are the pits with the depth of 0,8–1,0 m, 20 are the bore pits: a) in the scheme, b) in the geological section, 21 are the bulldozer trenches with the depth of 1,0 m, 22 are the bulldozer trenches excavated to bedrock: a) in the scheme, b) in the geological section, 23 are the drill-holes: a) in the scheme, b) in the geological section

щественно мощные (от 2–3 мм до 5–10 см) прожилки и жилы секущего ( $45^{\circ}$ – $50^{\circ}$ ) светлого, в основном молочно-белого, кварца; 2) тонкие, до нитевидных, разнонаправленные, часто взаимопересекающиеся прожилки (в основном менее 2 мм) светло-серого, серого, полупрозрачного кварца, часто с бурым шпатом, секущего как вмещающие породы, так и кварцевые жилы и прожилки первой генерации; 3) редкие прожилки хрусталевидного кварца мощностью 1–5 мм; 4) наиболее поздние прожилки кварц-кальцитового состава мощностью до 1–2 см. Жилы и прожилки первой генерации наиболее интенсивно проявлены в терригенной толще погорюйской свиты, а точнее в горизонтах кварцитовидных песчаников и кварцитов. Жильно-прожилковые образования второй, третьей и четвертой генераций распространены в основном в минерализованных зонах. Продуктивными, по-видимому, являются вторая и третья генерации.

Сульфидизация – один из наиболее интенсивно проявленных процессов в пределах зоны расщепления. Сульфидная минерализация развита в основном в виде разноразмерной вкрапленности пирита преимущественно во вмещающих породах. Выделяются две основных разновидности (стадии образования) вкрапленного пирита: 1) крупные, размером более 2–3 мм (достигают 1,5–2 см), кристаллы кубического пирита, вероятно, диагенетической природы; 2) тонкая наложенная неравномерная вкрапленность пирита размером от <math>0,5</math> мм до 1 мм как кубической, так и осложненных форм (кубиктаэдри, октаэдри, пентагондодекаэдри). Тонкая вкрапленность в основном отмечается в кварцево-жильно-прожилковом пространстве, прослеживается на расстоянии обычно до 3–5 см от жил и прожилков. По данным микроскопических исследований вкрапленность пирита содержит тонкодисперсное золото, которое обнаруживается в пирите всех кристаллических форм продуктивной наложенной стадии.

Процессы мусковитизации (серицитизации) интенсивно развиты в пределах всей зоны расщепления, в основном в ассоциации с зонами кварц-буропшатовых жильно-прожилковых образований, формируя ореолы по их периферии. Средне-крупнокристаллические образования мусковита распространены, преимущественно, в зальбандовых частях кварц-буропшатовых жил.

Характеристика золотоносных минерализованных зон

Результаты исследований позволили выявить серию золотоносных минерализованных зон рудопоявления Южное. Последние локализованы в нижней пачке свит аладынской и карточки объединенных, представленной известняками с прослоями мраморизованных известняков, известковистых доломитов и углеродсодержащих известковисто-глинистых сланцев. Минерализованные зоны сложены в разной степени окварцованными, интенсивно буропшатируемыми, сульфидизи-

рованными, серицитизированными породами. В пределах золотоносных зон отмечается увеличение концентрации тонкой пиритовой вкрапленности до 5–7 об. %. Причем вкрапленность пирита приурочена как к зонам развития кварцевых тонких прожилков, слагая их экзоконтактные части в виде ореолов, так и вне связи с ними.

Наиболее перспективной для выявления промышленного золотого оруденения является зона Центральная, вскрытая траншеей Т1 и пересеченная скважиной 601 (рис. 3). Минерализованная зона имеет субсогласную слоистости ориентировку. Ее мощность составляет около 280 м в центральной части рудопоявления, прослеженная протяженность превышает 800 м. Протяженность по падению составляет более 150 м. Морфологически зона представляет собой линейно-изометричную штокверкоподобную залежь. Зона не имеет четких границ и выделена по данным бороздого опробования (пробирно-атомно-абсорбционный анализ).

В ПО и ВОР зона Центральная отвечает ореолу золота с содержаниями более 0,1 г/т (рис. 4). По периферии ореола золота устанавливаются аномальные концентрации цинка (более 0,007 %). Аномалия золота пространственно сопряжена с аномальным полем марганца (более 0,2 %), связанного с широким распространением марганецсодержащей буропшатизации. По результатам ICP-MS установлено, что минерализованным зонам соответствуют высокие значения W, As, Cu, Co в ВОР. Примечательно, что спектральный анализ, выполнявшийся первоначально, не выявил повышенных концентраций этих элементов.

В пределах зоны Центральной установлены эпицентры с содержаниями золота более 0,3 г/т, выявляемые по данным бороздого опробования, – потенциально рудные зоны, отвечающие участкам увеличения концентрации кварц-буропшатовых прожилков и сульфидной вкрапленности. Содержания золота в отдельных пробах достигают 6,5 г/т. Мощность потенциально рудных зон – 30 м, протяженность более 300 м.

В шлиховых ореолах рудопоявление фиксируется достаточно четко и образует широкий (более 1 км) ореол со средними содержаниями около 8–10 знаков золота на шлиховую пробу. В пределах этого ореола выделяется несколько ореолов наиболее высоких концентраций золота, пространственно отвечающих положению золотоносных минерализованных – от 10 до 19 знаков золота на шлиховую пробу. Достаточно низкие концентрации золота объясняются тонкодисперсной, до пылевидной, размерностью золотин, которые, по всей вероятности, в основной массе «уходят» при промывке шлиховых проб. Отмечено, что шлиховое золото появляется в шлиховых пробах, обогащенных окисленным пиритом. Причем кристаллические формы пирита разнообразны: пентагондодекаэдри, кубиктаэдри, а также кристаллы кубической формы.

Основная часть самородного золота, встреченного в шлиховых пробах, не превышает 0,15 мм, соответствует мелкому и среднему классам. На крупное (более 0,5 мм) приходится не более 10 % всего выявленного самородного золота. Отмечается неокатанный и малоокатанный вид знаков золота. Кристаллы и сростки достаточно хорошо сохраняют грани, интерстициальные и цементационные формы сохраняют угловатость выделений. Самородное золото представлено несколькими морфологическими формами: 1) цементационное золото – наиболее распространенная форма, встречается в сростках с хрусталевидным кварцем, железомagneзиальным карбонатом; 2) интерстициальное

золото – редко встречающаяся форма; 3) трещинное золото – распространенная форма, встречающаяся в зонах окварцевания с большим количеством прожилок молочно-белого кварца. Встречаются монокристаллы золота, а также сростки кристаллов или цепочечные формы.

Специализированное шлихогеохимическое изучение шлиховых проб, в частности электромагнитной и тяжелой немагнитной фракций, показало, что средние содержания золота в них практически не отличаются, в то время как концентрации As, Sb, Bi, W, Cu, Ni, Co, Pb, Zn, Mo в электромагнитной фракции, по данным ICP-MS, в 1,6–2,7 раза выше. Корреляционным анализом в обеих фрак-

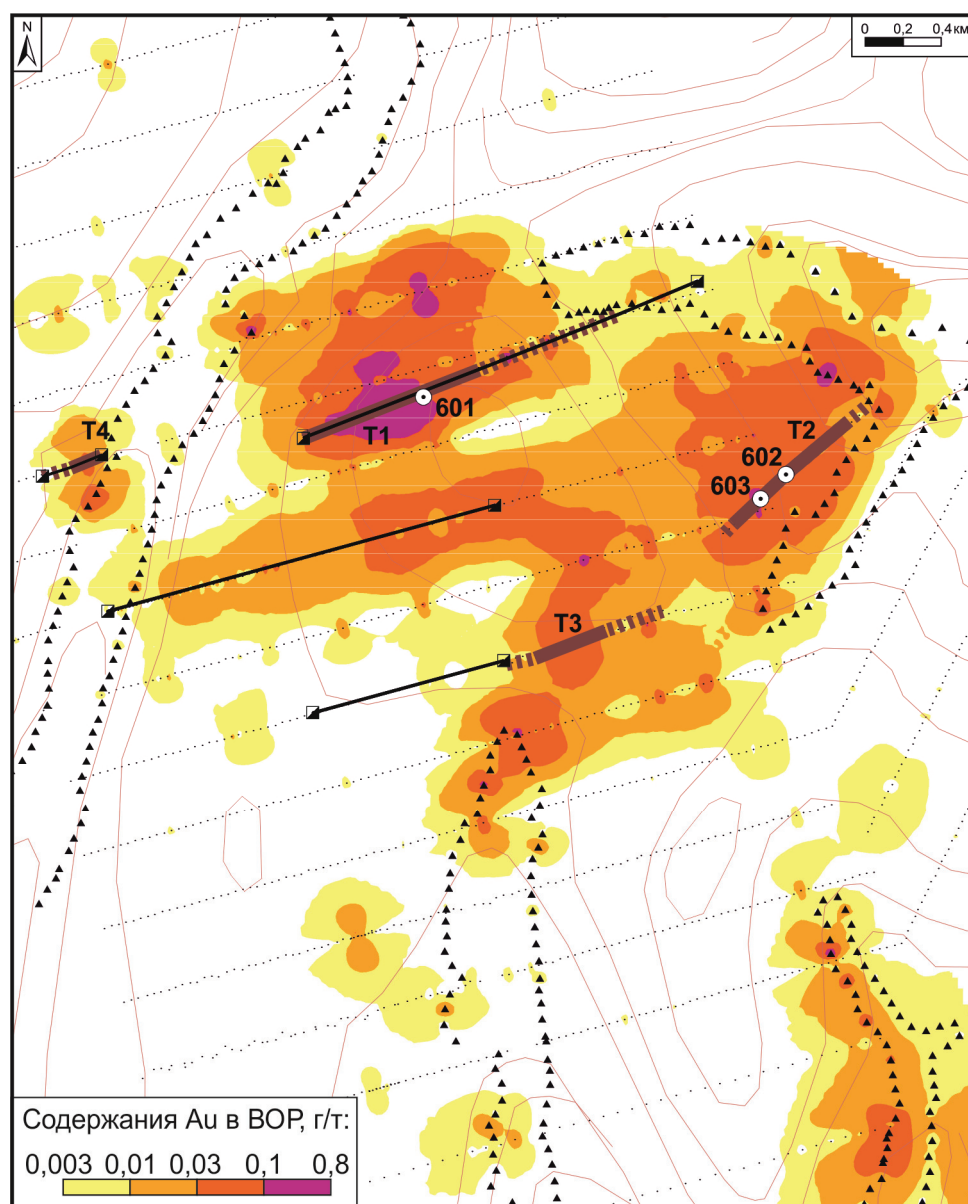


Рис. 4. Карта распределения содержаний золота во вторичных ореолах рассеяния на рудопроявлении Южное. Условные обозначения см. на рис. 3

Fig. 4. Map of gold grades allocation in the secondary dispersion halos at the ore occurrence Yuzhnoe. The legend is in the fig. 3



циях установлена практически идентичная структура корреляционных связей с золотоносной Au–As–Bi и сопутствующей ей Cu–Ni–Co–Mn ассоциациями. Также установлены значимые положительные корреляционные связи в рядах Na–K, Ca–Mn–Sr [13].

По результатам изотопно-геохимических исследований золотоносных образований рудопоявления, выполненных С.Г. Кряжевым (отдел минералогии и изотопной геохимии ФГУП ЦНИ-ГРИ), установлено, что сера, входящая в состав пирита, аномально обогащена тяжелым изотопом ( $\delta^{34}\text{S} = +16...+19 \text{‰}$ ). По этому признаку рудная минерализация отличается от известных золоторудных объектов Енисейского кряжа [14–17]. Обогащение серы сульфидов тяжелым изотопом находит связь исследуемого объекта с золотоносными зонами послонной сульфидной вкрапленности в терригенно-карбонатных толщах крупнообъемного золото-сульфидного Ведугинского месторождения ( $\delta^{34}\text{S} = +12...+14 \text{‰}$ ), а также объектами «карлинского» типа ( $\delta^{34}\text{S} = \text{до } +18 \text{‰}$ ) [18–20].

Таким образом, в результате выполненных исследований выявлено рудопоявление Южное, в пределах которого установлены и локализованы золотоносные минерализованные зоны. Последние отнесены нами к золото-(мало) сульфидному (прожилково)-вкрапленному типу штокверкоподобных минерализованных зон.

#### Обсуждение результатов и выводы

В ходе выполнения исследований автором были проанализированы многочисленные опубликованные и фондовые материалы по золоторудным месторождениям и проявлениям Енисейского кряжа с целью определения благоприятных для рудообразования структурно-вещественных комплексов и обстановок формирования золоторудных месторождений. В результате были составлены прогнозно-поисковые (геолого-поисковые) модели ряда объектов золото-кварцевого (Аяхтинское, Васильевское, Эльдорадо), золото-сурьмяно-кварцевого (Удережское, Раздолинское), золото-(мало) сульфидно-кварцевого (Титимухта, Герфедское, Советское) и золото-сульфидного (Олимпиадинское, Ведугинское, Благодатное, Боголюбское, Тырадинское) геолого-промышленных типов. Среди перечисленных типов золоторудных объектов наибольший интерес, с точки зрения перспектив увеличения минерально-сырьевой базы коренного золота в исследуемом регионе, представляют месторождения и проявления золото-(мало) сульфидно-кварцевого и золото-сульфидного типов, которые, вероятно, следует рассматривать в общей группе объектов с существенно сульфидным рассеянным вкрапленным характером руд с низкими (первые г/т) средними содержаниями золота и крупными объемами [1, 2, 4, 21]. К последним, на данной стадии изучения, предварительно можно отнести золотоносные минерализованные зоны рудопоявления Южное.

При рассмотрении группы месторождений золото-сульфидного и золото-(мало)-сульфидно-кварцевого типов можно выделить ряд некоторых общих и объединяющих их прогнозно-поисковых признаков:

#### 1. Литолого-стратиграфические

Для золото-сульфидного оруденения наиболее благоприятными являются мощные стратифицируемые горизонты и пачки. Следует отметить, что в породах с повышенной углеродистостью (>4–6 %) как сульфиды, так и золото, как правило, отсутствуют [22]. В то же время полное отсутствие углеродистого вещества явно неблагоприятно для образования сульфидной и золотой минерализации. По данным В.М. Яновского, содержания  $C_{\text{орг}}$  варьируют на рудном поле в пределах 0,05–0,25 % [23]. Содержание  $C_{\text{орг}}$  0,03–0,075 % отмечается в зоне рассредоточенной минерализации в ореоле гидротермально-измененных пород. Интервалу промышленной минерализации свойственны содержания  $C_{\text{орг}}$  0,1–0,15 %. В рудной зоне содержания  $C_{\text{орг}}$  повышается до 0,25 %; одновременно повышается изменчивость содержания  $C_{\text{орг}}$  в сечении жильно-прожилковых руд. В тектонитах, в экзоконтактах кварцевых тел и включениях филлитов в метасоматическом кварце концентрация  $C_{\text{орг}}$  достигает 1,5 %.

Золотое оруденение Енисейской золоторудной провинции приурочено к сравнительно узкому стратиграфическому интервалу, охватывая сланцево-гнейсовые комплексы верхов кординской, частично горбилоской и алевролит-сланцевые филлитовые образования удерейской свиты сухопитской серии. В целом это углеродистые терригенные образования с концентрациями  $C_{\text{орг}}$  до 0,2–0,42 %, содержащие как рассеянное органическое вещество, так и графитизированные его разновидности. Кроме того, отмечается повышенная золотоносность этих образований – до 0,2–0,6 г/т [24]. По данным А.М. Сазонова и др., часть золотоносных очагов располагается в полях развития нижней части сухопитской серии, где по объему запасов и ресурсов металла ведущее место в золотоносности осадочного разреза принадлежит кординской свите – 73,4 % запасов металла, приведенных к категории  $C_1$ ; горбилоская и удерейская свиты – 6,9 % и 19,5 % соответственно [1].

#### 2. Магматические

Практически все рассматриваемые объекты Енисейской золоторудной провинции локализованы в областях распространения интрузивных массивов гранитоидного состава, как вскрытых процессами эрозии, так и «слепых» (фиксируемых на глубине гравиметрией). Большинство исследователей придерживается той точки зрения, что с около- и надинтрузивными ореолами гранитоидных массивов связаны все золоторудные месторождения территории [25]. Однако часто такая позиция



основывается лишь на пространственной связи гранитоидов с золоторудными месторождениями. По данным Л.В. Ли и др., в пределах Северо-Енисейского рудного района, включающего Советский, Верхне-Енашиминский и Перевальнинский рудные узлы, количество рудных объектов уменьшается по мере удаления по латерали от гранитоидных интрузий (батолиты татарско-аяхтинского комплекса) [26]. В околоинтрузивном ореоле (0–5 км) находится 41 % месторождений и рудопоявлений (Титимухта – интрузив на глубине 0,5–1,0 км от дневной поверхности), в зоне удаления от интрузива на 5–10 км – 34 % (Эльдорадо), на расстоянии 10–15 км – 13 % (Советское). Предполагается, что большинство интрузий на глубине 3–5 км соединяются в единый батолит и практически весь рудный район расположен в надинтрузивном ореоле [27].

### 3. Структурно-тектонические

Золоторудные месторождения Енисейской золоторудной провинции приурочены к зоне, ограниченной с запада Татарской, а с востока – Ишимбинской системами глубинных разломов; в зонах этих разломов размещено более 80 % известных месторождений и проявлений Енисейского кряжа. Предполагается, что рудные объекты расположены со стороны висячего бока этих разломов и на удалении не более 10–15 км от осевых частей разрывов. Не исключается, что на глубине зоны Татарского и Ишимбинского разломов сливаются, представляя собой единую мощную долгоживущую зону проницаемости, контролирующую движение гидротермальных растворов [2]. По данным ряда исследователей, золото-сульфидное оруденение в терригенных толщах локализуется преимущественно в узлах сопряжения и пересечения зон глубинных разломов [28, 29]. Наиболее активное влияние на локализацию оруденения оказывают скрытые разломы, представленные в верхнем рудо локализирующем ярусе зонами сближенной трещиноватости и расланцевания, и, особенно, узлы их пересечения. Наиболее перспективными на золотое оруденение являются узлы сочленения и пересечений субширотных зон разломов с разломами других направлений, прежде всего диагональной системы. Благоприятны для размещения месторождений фланговые части зон разломов, которые расщепляются на системы более мелких нарушений. Оруденение часто локализуется в изгибах разломов, где происходит их разветвление на системы мелких трещин [30].

Золото-сульфидное оруденение, как правило, локализуется в ядерных частях антиклиналей второго и более мелких порядков, осложняющих более крупные антиклинали. Последние осложняют синклиналильные погребения, входящие в состав синклиналильных погребений (синклинориев). Особенно благоприятны мелкие дополнительные антиклинали в местах изгибов их осей и шарниров. Эта

закономерность проявляется также в региональном плане: повышенные концентрации золота сосредоточены в пределах тех участков антиклинальных структур, где отмечается наиболее резко выраженный изгиб их осей. Наиболее благоприятны сжатые антиклинали, близкие к изоклинальным или изоклиналильным, в меньшей мере – прямые, резко асимметричные, флексуобразные. При этом оруденение располагается в пологих крыльях складок и в их ядерных частях. Подвернутые, крутопадающие крылья менее благоприятны. Наиболее напряженные дислоцированные участки, при прочих равных условиях, являются самыми золотоносными [28, 29].

### 4. Метаморфические

Для прогноза и поисков золоторудных объектов в углеродисто-терригенных комплексах чрезвычайно важным аспектом является установление метаморфических критериев. В работах многих исследователей отмечено, что площади, обрамляющие высокометаморфизованные породы, следует рассматривать как первоочередные для поисков [11, 29, 31–34].

Интенсивность и характер минерализации зависят от степени регионального метаморфизма вмещающих пород. Промышленное золотое оруденение локализуется, как правило, в пределах развития низкотемпературных зон: зеленосланцевой фации – в биотит-хлоритовой (слабо золотоносные кварцевые жилы и зоны прожилково-вкрапленной пирит-пирротиновой золотой минерализации) и, преимущественно, в хлорит-серицитовой (промышленное золотое оруденение прожилково-вкрапленного типа пирит-кварцевого состава и малосульфидные золотоносные кварцевые жилы) субфациях, и частично в самых низкотемпературных частях эпидот-амфиболитовой фации [35]. Установлено, что золото-сульфидное оруденение развито в основном в нижней подзоне хлорит-серицитовой зоны и частично в биотит-хлоритовой, а золотоносные жилы – в верхней подзоне хлорит-серицитовой зоны.

Проведенный сравнительный анализ рудопоявления Южное с известными золоторудными месторождениями Енисейского кряжа обнаруживает сходные черты некоторых геологических элементов изучаемого объекта с основными поисковыми признаками группы золото-сульфидных месторождений [1–3, 36]. Такими элементами являются: а) локализация в пологих частях крыльев складок, осложненных складчатостью более высоких порядков; б) позиция в зоне поперечных разрывных нарушений, являющейся опережающей к Ишимбинскому глубинному разлому; в) пространственное удаление (>10 км) от крупных, выходящих на поверхность интрузивных гранитоидных массивов; возможно наличие скрытых на глубине интрузивов; г) приуроченность к хлоритовой субфации зеленосланцевой фации регионального метаморфизма.

Вместе с этим рудопоявление Южное обладает рядом особенностей, которые не характерны для моделей рассмотренных выше золоторудных месторождений:

- 1) особенностью золоторудной минерализации рудопоявления является ее приуроченность к вышележащим, относительно углеродсодержащих отложений сухопитской серии раннего среднего рифея, терригенно-карбонатным отложениям свит аладьинской и карточки среднего рифея;
- 2) рудопоявление пространственно удалено от интрузивного массива (на расстоянии более 15 км от выхода интрузивного массива на дневную поверхность); однако интерпретация геофизических данных предполагает наличие скрытого интрузива (локальная аномалия силы тяжести);
- 3) сульфидная минерализация представлена лишь пиритом; по результатам анализа ICP-MS содержание золота в монофракциях пирита из минерализованных зон составляет 5–10 г/т; при этом пирит мышьяковистый – содержание мышьяка в монофракциях пирита из минерализованных зон достигает 2 кг/т; установлено, что сера сульфидов аномально обогащена тяжелым изотопом +16...+19 ‰, тогда как в известных золоторудных месторождениях Енисейского кряжа значения серы сульфидов +4...+8 ‰ для золото-сульфидных типов и +11...+14 ‰ – для золото-кварцевых [37].

Таким образом, среди рассмотренных выше типов месторождений Енисейской золоторудной провинции полного аналога для исследуемого объекта не выявляется.

По ряду прогнозно-поисковых признаков рудопоявление имеет сходство с «карлинским» типом. Отнесение объекта исследований к «карлинскому» типу является дискуссионным вопросом,

однако, согласно исследованиям ряда специалистов, к этому типу следует относить объекты, характеризующиеся существенно карбонатным известково-глинистым составом рудовмещающих толщ, стратифицированным характером минерализованных зон и рудных тел, прожилково-вкрапленным оруденением, сульфидным составом руд с тонкодисперсными (микронными) выделениями золота в сульфидах [38–44].

Низкие средние содержания золота в пределах золотоносных минерализованных зон рудопоявления Южное, их крупнообъемное штокверкоподобное строение указывают на сходство с мелкими золоторудными объектами со средними содержаниями золота не более 1,5–2,0 г/т с запасами до 15 т по категории С<sub>2</sub> [45, 46].

### Заключение

Наиболее важным научно-практическим результатом выполненных исследований является выявление золотой минерализации в углеродсодержащей терригенно-карбонатной толще свит аладьинской и карточки. Впервые в регионе установлена золотоносность отложений среднерифейского возраста. В этой связи очевидны перспективы золотоносности восточного склона Енисейского кряжа, в особенности в области зоны влияния Ишимбинского глубинного рудоконтролирующего разлома. Потенциально рудные зоны, выявленные в пределах минерализованной зоны Центральной, рекомендуются для дальнейшего изучения с целью выявления промышленных золоторудных тел.

В дальнейшей работе предполагается провести более детальный анализ и обобщение полученных в ходе исследований данных. Требуется составление прогнозно-поисковой модели рудопоявления, позволяющей вести поиски золоторудных объектов аналогичного типа.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Золоторудная металлогения Енисейского кряжа: геологическая позиция, структурные типы рудных полей / А.М. Сазонов, А.А. Ананьев, Т.В. Полева, А.Н. Хохлов, В.С. Власов, Е.А. Звягина, А.В. Федорова, П.А. Тишин, С.И. Леонтьев // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. – 2010. – Т. 3. – № 4. – С. 371–395.
2. Модели месторождений золота Енисейской Сибири / С.С. Сердюк, Ю.Е. Коморовский, А.И. Зверев, В.К. Оябрь, В.С. Власов, В.Е. Бабушкин, В.А. Кириленко, С.А. Землянский. – Красноярск: СФУ, 2010. – 584 с.
3. Геологическое строение золоторудных месторождений и опыт геологического обслуживания сырьевой базы компании «Полус» в Красноярском крае / В.К. Совмен, Ю.М. Страгис, А.А. Плеханов, С.М. Бибики, Л.П. Кровякова, С.И. Савушкина, В.А. Лохмаков, И.Г. Звездин, В.С. Логачев. – Красноярск: Полус, 2009. – 208 с.
4. Прогнозно-поисковые модели основных формационных типов золоторудных месторождений Енисейского кряжа / А.К. Мкртычян, Е.И. Берзон, В.К. Зуев, А.А. Стороженко, Н.Ф. Васильев, М.Н. Секретарев, А.П. Липишанов, А.С. Варганов, В.А. Москалев, Н.Б. Кононенко, А.Э. Динер // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Центральной Сибири: Материалы юбилейной научно-практ. конф. – Красноярск, 2010. – С. 46–62.
5. Фисенко В.Г., Макаров В.А. Геохимические критерии и термодинамические условия локализации золоторудной минерализации Северо-Восточного склона Енисейского кряжа // Современные проблемы науки и образования. – 2013. URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/geohimicheskie-kriterii-i-termodynamicheskie-usloviya-lokalitsii-zolotorudnoy-mineralizatsii-severo-vostochnogo-sklona-eniseyskogo> (дата обращения: 13.06.2016).
6. Мансуров Р.Х., Зеликсон Б.С., Тарасов А.В. Рудоконтролирующие зоны складчато-разрывных деформаций в средневерхнерифейских карбонатно-терригенных комплексах Енисейской золоторудной провинции // Научно-методические основы прогноза, поисков и оценки месторождений цветных и благородных металлов, алмазов – состояние и перспективы: сборник тез. докл. научно-практ. конф. – М.: ЦНИГРИ, 2016. – С. 98–99.

7. Фисенко В.Г. Предпосылки и признаки золоторудной минерализации северо-восточного склона Енисейского кряжа и перспективы промышленной золотоносности: автореф. дис. ... канд. геол.-минер. наук. – Красноярск, 2016. – 18 с.
8. Иванов А.И. Экспрессный метод поисков золоторудных месторождений в сложных горно-таежных ландшафтах // Руды и металлы. – 2014. – № 1. – С. 36–42.
9. Иванов А.И. Золото Байкало-Патомы (геология, оруденение, перспективы). – М.: ФГУП ЦНИГРИ, 2014. – 215 с.
10. Мансуров Р.Х., Зеликсон Б.С., Курмаев А.В. Применение экспрессной методики поисков золоторудных месторождений в горно-таежных ландшафтах на примере поисковых работ на большеобъемное золотое оруденение в пределах Средне-Ишимбинской площади // Руды и металлы. – 2015. – № 4. – С. 39–50.
11. Иванов А.И. Опыт прогнозирования, поисков и оценки новых золоторудных месторождений в Бодайбинском районе // Отечественная геология. – 2008. – № 6. – С. 11–16.
12. Буряк В.А. Метаморфизм и рудообразование. – М.: Недра, 1982. – 256 с.
13. Мансуров Р.Х., Зеликсон Б.С. Методические аспекты применения шликергеохимического метода при поисках золота в условиях Енисейского кряжа // Научно-методические основы прогноза, поисков и оценки месторождений цветных и благородных металлов, алмазов – состояние и перспективы: сборник тез. докл. научно-практ. конф. – М.: ЦНИГРИ, 2016. – С. 40–41.
14. Metallogeny of Siberia: tectonic, geologic and metallogenic settings of selected significant deposits / R. Seltmann, S. Soloviev, V. Shatov, F. Pirajno, E. Naumov, S. Cherkasov // Australian Journal of Earth Sciences. – 2010. – V. 57. – № 6. – P. 655–706.
15. Re-Os Isotope Systematics of Sulfides from Olympiada Gold Deposit (Yenisei Rige, Russia) / E.A. Naumov, S. Tessalina, A.S. Borisenko, P.A. Nevolko, K.R. Kovalev // Mineralogical Magazine. Goldschmidt 2013. – 2013. – V. 77. – № 5. – P. 1830–1830.
16. Gold Deposits of the Yenisei Ridge (Russia) and Age of Its Formation / A.S. Borisenko, A.M. Sazonov, P.A. Nevolko, E.A. Naumov, S. Tessalina, K.R. Kovalev, V.P. Sukhorukov // Acta Geologica Sinica. – 2014. – V. 88. – № 2. – P. 686–687.
17. Geochemical and isotopic properties of fluids from gold-bearing and barren quartz veins of the Sovetskoye Gold Deposit (Siberia, Russia) / A. Tomilenko, N. Gibsher, Y. Dublyansky, L. Dallai // Economic Geology. – 2010. – V. 105. – № 2. – P. 375–394.
18. Ведугинское золото-сульфидное месторождение (Енисейский кряж) / А.М. Сазонов, А.Э. Романовский, Г.И. Шведов, С.И. Леонтьев, Е.А. Звягина // Руды и металлы. – 1994. – № 2. – С. 86–97.
19. Федорчук В.П. О генезисе золоторудных месторождений карлинского типа // Руды и металлы. – 2000. – № 1. – С. 76–78.
20. Radtke A.S., Rye R.O., Dickson F.W. Geology and stable isotope studies of the Carlin gold deposit, Nevada // Economic Geology. – 1980. – V. 75. – № 5. – P. 641–672.
21. Полева Т.В., Сазонов А.М. Геология золоторудного месторождения Благодатное в Енисейском кряже. – М.: Экономическая газета, 2012. – 290 с.
22. Vilor N.V. Gold in black shales // Geochemistry International. – 1983. – V. 20. – № 2. – P. 167–176.
23. Яновский В.М. Золоторудные месторождения в углеродистых терригенных комплексах. Модели гидротермально-метасоматического оруденения // Успехи современного естествознания. – 2004. – № 2. – С. 87–92.
24. Условия формирования и основы прогноза крупных золоторудных месторождений / М.М. Константинов, В.В. Аристов, М.Е. Вакин, Р.Ф. Данковцев, В.О. Коньшев, Т.Н. Косовец, Н.П. Остроумова, В.К. Политов, Г.С. Симкин, С.Ф. Стружков, В.А. Изотенкова, Н.А. Фогельман, В.М. Яновский. – М.: ЦНИГРИ, 1998. – 155 с.
25. Mikucki E.J. Hydrothermal transport and depositional processes in Archean lode-gold systems: a review // Ore Geology Reviews. – 1998. – V. 13. – № 1. – P. 307–321.
26. Ли Л.В., Нелюбов В.А. Структурные особенности локализации золотого оруденения некоторых месторождений Енисейского Кряжа // Геология и геофизика. – 1970. – № 10. – С. 45–51.
27. Варгунина Н.П. Региональные геохимические факторы золотоносности Енисейского кряжа // Руды и металлы. – 2008. – № 1. – С. 51–66.
28. Буряк В.А. Метаморфогенно-гидротермальный тип промышленного золотого оруденения. – Новосибирск: Наука, 1975. – 44 с.
29. Основы прогнозирования золоторудных месторождений в терригенных комплексах / В.А. Нарсеев, А.А. Сидоров, Н.А. Фогельман, В.М. Яновский, В.А. Буряк. – М.: ЦНИГРИ, 1986. – 192 с.
30. Bonnemaïson M., Marcoux E. Auriferous mineralization in some shear-zones: a three-stage model of metallogenesis // Mineralium Deposita. – 1990. – V. 25. – № 2. – P. 96–104.
31. Буряк В.А., Бакулин Ю.И. Металлогения золота. – Владивосток: Дальнаука, 1998. – 403 с.
32. Иванов А.И. Роль метаморфизма в золотом рудообразовании в углеродистых терригенных и карбонатно-терригенных комплексах на примере Байкало-Патомской металлогенической провинции и его отражение в прогнозно-поисковых моделях // Научно-методические основы прогноза, поисков и оценки месторождений благородных и цветных металлов – состояние и перспективы: сборник тез. докл. научно-практ. конф. – М.: ЦНИГРИ, 2015. – С. 61–62.
33. Powell R., Will T.M., Phillips G.N. Metamorphism in Archean greenstone belts: calculated fluid compositions and implications for gold mineralization // Journal of Metamorphic Geology. – 1991. – V. 9. – № 2. – P. 141–150.
34. Phillips G.N., Powell R. Formation of gold deposits: a metamorphic devolatilization model // Journal of Metamorphic Geology. – 2010. – V. 28. – № 6. – P. 689–718.
35. Yardley B.W.D., Cleverley J.S. The role of metamorphic fluids in the formation of ore deposits // Geological Society, London, Special Publications. – 2015. – V. 393. – № 1. – P. 117–134.
36. Mansurov R.Kh. Principal elements of gold mineralization prospecting model of the prospective area Southern within Sredne-Ishimbinskaya area of Yenisei gold province // New ideas in Earth sciences: XII International scientific-practical conference. – М.: MGRI-RSPGU, 2015. – P. 128–128.
37. Yakubchuk A., Stein H., Wilde A. Results of pilot Re–Os dating of sulfides from the Sukhoi Log and Olympiada orogenic gold deposits, Russia // Ore Geology Reviews. – 2014. – V. 59. – P. 21–28.
38. Константинов М.М. Золоторудные месторождения типа карлин и критерии их выявления // Руды и металлы. – 2000. – № 1. – С. 70–76.
39. Cline J.S. Carlin-type gold deposits in Nevada: Critical geological characteristics and viable models // Economic geology. – 2005. – V. 100. – P. 451–484.
40. Deposition of gold in Carlin-type deposits: the role of sulfidation and decarbonation at Twin Creeks, Nevada / D.P. Stenger, S.E. Kesler, D.R. Peltonen, C.J. Tapper // Economic geology. – 1998. – V. 93. – № 2. – P. 201–215.
41. Cline J.S., Hofstra A.H. Ore fluid evolution at the Getchell Carlin-type gold deposit, Nevada, USA // European Journal of Mineralogy. – 2000. – V. 12. – P. 195–212.
42. The giant Carlin gold province: a protracted interplay of orogenic, basinal, and hydrothermal processes above a lithospheric boundary / P. Emsbo, D.I. Groves, A.H. Hofstra, F.P. Bierlein // Mineralium Deposita. – 2006. – V. 41. – P. 517–525.

43. Ressel M.W., Henry C.D. Igneous geology of the Carlin trend, Nevada: Development of the Eocene plutonic complex and significance for Carlin-type gold deposits // *Economic geology*. – 2006. – V. 101. – P. 347–383.
44. Magmatic-hydrothermal origin of Nevada's Carlin-type gold deposits / J.L. Muntean, J.S. Cline, A.C. Simon, A.A. Longo // *Nature Geoscience*. – 2011. – V. 4. – P. 122–127.
45. Richards J.P. Postsubduction porphyry Cu–Au and epithermal Au deposits: Products of remelting of subduction-modified lithosphere // *Geology*. – 2009. – V. 37. – P. 247–250.
46. Soloviev S.G., Kryazhev S.G., Dvurechenskaya S.S. Geology, mineralization, stable isotope geochemistry, and fluid inclusion characteristics of the Novogodnee-Monto oxidized Au-(Cu) skarn and porphyry deposit, Polar Ural // *Mineralium Deposita*. – 2013. – V. 48. – P. 603–625.

*Поступила 01.07.2016 г.*

#### **Информация об авторах**

**Мансуров Р.Х.**, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник отдела благородных металлов Центрального научно-исследовательского геологоразведочного института цветных и благородных металлов.



UDC 550.812:553.074:553.411

## CERTAIN FEATURES OF GEOLOGICAL STRUCTURE AND GOLD MINERALIZATION OF THE ORE OCCURRENCE YUZHNOE (YENISEI RIDGE)

Rinat Kh. Mansurov,  
rinman81@bk.ru

Central Research Institute of Geological Prospecting for non-ferrous and precious metals,  
129, bld.1, Varshavskoe shosse, Moscow, 117545, Russia.

*The relevancy of the discussed issue is caused by the need to detect new gold ore deposits within the Yenisei ridge to replenish mineral resources of gold ore in Russia.*

**The main aim** of the study is to explore the features of geological structure and gold ore mineralized zones of ore occurrence Yuzhnoe in order to forecast gold ore bodies, and to substantiate the continuation of geological exploration.

**The methods used in the study.** The exploration is implemented by the express method of prospecting gold ore deposits in difficult mountain-taiga landscapes using a complex of litho-geochemical sampling for secondary dispersion halos, schlich, point and trench sampling; spectrochemical analysis for determining gold content, ICP-MS, atomic-and-absorption, X-ray phase analysis and isotope-geochemical methods were used.

**The results.** The complex of prospecting methods allowed the author to reveal ore-controlling zone of fold-discontinuous deformations and localize within it the ore occurrence Yuzhnoe. The latter is located in the south-eastern part of Sredne-Ishimbinskaya area in the zone of dynamic influence of Ishimbinskiy deep fault system. The gold ore mineralized zones were revealed within the ore occurrence. They are presented by a series of lode gold stockwork subparallel bedding zones with low average gold content. A detection of gold ore bodies is forecasted within the most wide and lengthy zone Centralnaya, where the geological exploration is recommended to be continued. The author has compared the ore occurrence with model objects and determined a set of common criteria and indicators of the ore occurrence with lode gold-sulfide deposits of the Yenisei ridge – Olimpiadninskoye, Veduginskoye, etc. and with «carlin» type deposits.

**Conclusions.** For the first time in the region the gold ore mineralized zones in carbonate-terrigenous carbonaceous sediments of kartochki and aladyinskaya series of the Middle Riphean were detected. The perspectives of gold-bearing mineralization of the eastern slope of the Yenisei ridge are defined.

### Key words:

Eastern slope of the Yenisei ridge, gold ore occurrence Yuzhnoe, aladyinskaya and kartochki series, gold ore mineralized zones.

### REFERENCES

1. Sazonov A.M., Ananyev A.A., Poleva T.V., Khokhlov A.N., Vlasov V.S., Zvyagina E.A., Fedorova A.V., Tishin P.A., Leontyev S.I. Gold-ore metallogeny of the Yenisei ridge: geological-structural position, structural types of ore fields. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, 2010, vol. 4, no. 3, pp. 371–395. In Rus.
2. Serdyuk S.S., Komorovsky Yu.E., Zverev A.I., Oyaber V.K., Vlasov V.S., Babushkin V.E., Kirilenko V.A., Zemlyansky S.A. *Modeli mestorozhdeniy zolota Eniseyskoy Sibiri* [Gold deposits models of Yeniseian Siberia]. Krasnoyarsk, Siberian Federal University, 2010. 584 p.
3. Sovmen V.K., Stragis Yu.M., Plekhanov A.A., Bibik S.M., Krovlyakova L.P., Savushkina S.I., Lokhnikov V.A., Zvezdin I.G., Logachev V.S. *Geologicheskoe stroenie zolotorudnykh mestorozhdeniy i opyt geologicheskogo obsluzhivaniya syr'evoy bazy kompanii «Polyus» v Krasnoyarskom krae* [Geological structure of gold deposits and experience of geological servicing of Polyus Company raw materials base in Krasnoyarsk region]. Krasnoyarsk, Verso Publ., 2009. 208 p.
4. Mkrtchyan A.K., Berzon E.I., Zuev V.K., Storoyenko A.A., Vasilyev N.F., Sekretarev M.N., Lipishanov A.P., Varganov A.S., Moskalev V.A., Kononenko N.B., Diner A.E. Prognozno-poiskovye modeli osnovnykh formatsionnykh tipov zolotorudnykh mestorozhdeniy Eniseyskogo kryazha [Forecast-search model of the main formation types of gold deposits of the Yenisei ridge]. *Geologiya i mineralno-syr'evyye resursy Tsentralnoy Sibiri. Materialy yubileynoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Geology and mineral resources of Central Siberia. Proceeding on the jubilee scientific conference]. Krasnoyarsk, 2010. pp. 46–62.
5. Fisenko V.G., Makarov V.A. Geochemical prerequisites and thermodynamic conditions for gold mineralization localization at northeastern slope of the Yenisei ridge. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya – Actual problems of science and education*, 2013, no. 6. In Rus. Available at: <http://cyberleninka.ru/article/n/geohimicheskie-kriterii-i-termodynamicheskie-usloviya-lokalitsii-zolotorudnoy-mineralizatsii-severo-vostochnogo-sklona-eniseyskogo> (accessed 13 June 2016).
6. Mansurov R.Kh., Zelikson B.S., Tarasov A.V. Rudokontroliruyushchie zony skladchato-razryvnykh deformatsiy v sredne-verkhnerifeykskikh karbonatno-terrigennykh kompleksakh Eniseyskoy zolotorudnoy provintsii [Ore-controlling zones of fold-discontinuous deformations in carbonate-terrigenous sediments of the Upper-Middle Riphean within the Yenisei gold province]. *Nauchno-metodicheskie osnovy prognoza, poiskov i otsenki mestorozhdeniy tsvetnykh i blagorodnykh metallov, almazov – sostoyanie i perspektivy. Sbornik tezisev dokladov nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Science and methodology bases of forecasting, prospecting and evaluating deposits of non-ferrous and precious metals, diamonds – state and prospects. Abstracts of the scientific-practical conference]. Moscow, TsNIGRI, 2016. pp. 98–99.
7. Fisenko V.G. *Predposylki i priznaki zolotorudnoy mineralizatsii severo-vostochnogo sklona Eniseyskogo kryazha i perspektivy promyshlennoy zolotonosnosti*. Dis. Kand. nauk [Background and features of gold mineralization of the north-eastern slope of the Yenisei ridge and prospects of industrial gold content. Dr. Diss.]. Krasnoyarsk, 2016. 18 p.
8. Ivanov A.I. A set of bedrock gold-oriented techniques and methods for exploration in the mountainous taiga environments. *Rudy i metally – Ores and Metals*, 2014, no. 1, pp. 36–42. In Rus.

9. Ivanov A.I. *Zoloto Baykalo-Patoma (geologiya, orudnenie, perspektivy)* [Gold of the Baikal-Pathom (geology, ore mineralization, prospects)]. Moscow, TsNIGRI Publ., 2014. 215 p.
10. Mansurov R.Kh., Zelikson B.S., Kurmaev A.V. Express method of prospecting gold deposits in difficult mountain-taiga landscapes on the example of prospecting lode gold mineralization within the Sredne-Ishimbinskaya area. *Rudy i metally – Ores and Metals*, 2015, no. 4, pp. 39–50. In Rus.
11. Ivanov A.I. Experience in forecasting, prospecting and evaluating new gold ore deposits in Bodaibo region. *Otechestvennaya geologiya – National Geology*, 2008, no. 6, pp. 11–16. In Rus.
12. Buryak V.A. *Metamorfizm i rudoobrazovanie* [Metamorphism and ore genesis]. Moscow, Nedra Publ., 1982. 256 p.
13. Mansurov R.Kh., Zelikson B.S. Metodicheskie aspekty primeniya shlikhogeokhimičeskogo metoda pri poiskakh zolota v usloviyakh Eniseyskogo kryazha [Methodical aspects of application of schlich and geochemical methods in prospecting gold mineralization in the Yenisei ridge conditions]. *Nauchno-metodicheskie osnovy prognoza, poiskov i otsenki mestorozhdeniy tsvetnykh i blagorodnykh metallov, almazov – sostoyanie i perspektivy. Sbornik tezisov dokladov nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Science and methodology bases of forecasting, prospecting and evaluating deposits of non-ferrous and precious metals, diamonds – state and prospects. Abstracts of the scientific-practical conference]. Moscow, TsNIGRI Publ., 2016. pp. 40–41.
14. Seltmann R., Soloviev S., Shatov V., Pirajno F., Naumov E., Cherkasov S. Metallogeny of Siberia: tectonic, geologic and metallogenetic settings of selected significant deposits. *Australian Journal of Earth Sciences*, 2010, vol. 57, no. 6, pp. 655–706.
15. Naumov E.A., Tessalina S., Borisenko A.S., Nevolko P.A., Kovalev K.R. Re-Os Isotope Systematics of Sulfides from Olympiada Gold Deposit (Yenisei Rige, Russia). *Mineralogical Magazine*, 2013, vol. 77, no. 5, pp. 1830.
16. Borisenko A.S., Sazonov A.M., Nevolko P.A., Naumov E.A., Tessalina S., Kovalev K.R., Sukhorukov V.P. Gold Deposits of the Yenisei Ridge (Russia) and Age of Its Formation. *Acta Geologica Sinica*, 2014, vol. 88, no. 2, pp. 686–687.
17. Tomilenko A., Gibsher N., Dublyansky Y., Dallai L. Geochemical and isotopic properties of fluids from gold-bearing and barren quartz veins of the Sovetskoye Gold Deposit (Siberia, Russia). *Economic Geology*, 2010, vol. 105, pp. 375–394.
18. Sazonov A.M., Romanovsky A.E., Shvedov G.I., Leontyev S.I., Zvyagina E.A. Veduginskoe gold-sulphide deposit (The Yenisei ridge). *Rudy i metally – Ores and Metals*, 1994, no. 2, pp. 86–97. In Rus.
19. Fedorchuk V.P. On genesis of carlin-type gold deposits. *Rudy i metally – Ores and Metals*, 2000, no. 1, pp. 76–78. In Rus.
20. Radtke A.S., Rye R.O., Dickson F.W. Geology and stable isotope studies of the Carlin gold deposit, Nevada. *Economic Geology*, 1980, vol. 75, pp. 641–672.
21. Poleva T.V., Sazonov A.M. *Geologiya zolotorudnogo mestorozhdeniya Blagodatnoe v Eniseyskom kryazhe* [Geology of the Blagodatnoe gold ore deposit within the Yenisei ridge]. Moscow, Ekonomicheskaya gazeta Publ., 2012. 290 p.
22. Vilor N.V. Gold in black shales. *Geochemistry International*, 1983, vol. 20, pp. 167–176.
23. Yanovskiy V.M. Zolotorudnye mestorozhdeniya v ugleorodistykh terrigenykh kompleksakh. Modeli gidrotermalno-metasomaticheskogo orudneniya [Gold ore deposits within carbonaceous terrigenous complexes. Models of hydrothermal-metasomatic ore mineralization]. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 2004, no. 2, pp. 87–92.
24. Konstantinov M.M., Aristov V.V., Vakin M.E., Dankovtsev R.F., Konyshov V.O., Kosovets T.N., Ostroumova N.P., Politov V.K., Simkin G.S., Struzhkov S.F., Izotenkova V.A., Fogelman N.A., Yanovskiy V.M. *Usloviya formirovaniya i osnovy prognoza krupnykh zolotorudnykh mestorozhdeniy* [Conditions of formation and basis of forecast of lode gold ore deposits]. Moscow, TsNIGRI Publ., 1998. 155 p.
25. Mikucki E.J. Hydrothermal transport and depositional processes in Archean lode-gold systems: a review. *Ore Geology Reviews*, 1998, vol. 13, pp. 307–321.
26. Li L.V., Nelyubov V.A. Strukturnye osobennosti lokalizatsii zolotogo orudneniya nekotorykh mestorozhdeniy Eniseyskogo kryazha [Structural features of localization of gold ore mineralization of several deposits of the Yenisei ridge]. *Geologiya i geofizika*, 1970, no. 10, pp. 45–51.
27. Vargunina N.P. Regional geochemical factors of gold ore mineralization of the Yenisei ridge. *Rudy i metally – Ores and Metals*, 2008, no. 1, pp. 51–66. In Rus.
28. Buryak V.A. *Metamorfogenno-gidrotermalny tip promyshlennogo zolotogo orudneniya* [Metamorphic-hydrothermal type of economic gold ore mineralization]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1975. 44 p.
29. Narseev V.A., Sidorov A.A., Fogelman H.A., Yanovskiy V.M., Buryak V.A. *Osnovy prognozirovaniya zolotorudnykh mestorozhdeniy v terrigenykh kompleksakh* [Bases of forecasting gold ore deposits in terrigenous complexes]. Moscow, TsNIGRI Publ., 1986. 192 p.
30. Bonnemaision M., Marcoux E. Auriferous mineralization in some shear-zones: a three-stage model of metallogenesis. *Mineralium Deposita*, 1990, vol. 25, pp. 96–104.
31. Buryak V.A., Bakulin Yu.I. *Metallogeniya zolota* [Gold metallogeny]. Vladivostok, Dalnauka Publ., 1998. 403 p.
32. Ivanov A.I. Rol metamorfizma v zolotom rudoobrazovanii v ugleorodistykh terrigenykh i karbonatno-terrigenykh kompleksakh na primere Baykalo-Patomskoy metallogenicheskoy provintsii i ego otrazhenie v prognozno-poiskovykh modelyakh [The role of metamorphism in gold ore mineralization in carbonaceous terrigenous and carbonate-terrigenous complexes by the example of Baikal-Patom metallogenic province and its reflection in forecast-search models]. *Nauchno-metodicheskie osnovy prognoza, poiskov i otsenki mestorozhdeniy tsvetnykh i blagorodnykh metallov, almazov – sostoyanie i perspektivy. Sbornik tezisov dokladov nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Science and methodology bases of forecasting, prospecting and evaluating deposits of non-ferrous and precious metals, diamonds – state and prospects. Abstracts of the scientific-practical conference]. Moscow, TsNIGRI Publ., 2015. pp. 61–62.
33. Powell R., Will T.M., Phillips G.N. Metamorphism in Archean greenstone belts: calculated fluid compositions and implications for gold mineralization. *Journal of Metamorphic Geology*, 1991, vol. 9, pp. 141–150.
34. Phillips G.N., Powell R. Formation of gold deposits: a metamorphic devolatilization model. *Journal of Metamorphic Geology*, 2010, vol. 28, pp. 689–718.
35. Yardley B.W.D., Cleverley J.S. The role of metamorphic fluids in the formation of ore deposits. *Geological Society, London, Special Publications*, 2015, vol. 393, pp. 117–134.
36. Mansurov R.Kh. Principal elements of gold mineralization prospecting model of the prospective area Southern within Sredne-Ishimbinskaya area of Yenisei gold province. *XII International scientific-practical conference. New ideas in Earth sciences*. Moscow, MGRI-RSPGU Publ., 2015. pp. 128.
37. Yakubchuk A., Stein H., Wilde A. Results of pilot Re–Os dating of sulfides from the Sukhoi Log and Olympiada orogenic gold deposits, Russia. *Ore Geology Reviews*, 2014, vol. 59, pp. 21–28.
38. Konstantinov M.M. Gold ore deposits of carlin-type and the criteria for their detecting. *Rudy i metally – Ores and Metals*, 2000, no. 1, pp. 70–76. In Rus.
39. Cline J.S. Carlin-type gold deposits in Nevada: Critical geological characteristics and viable models. *Economic geology*, 2005, vol. 100, pp. 451–484.

40. Stenger D.P., Kesler S.E., Peltonen D.R., Tapper C.J. Deposition of gold in Carlin-type deposits: The role of sulfidation and decarbonation at Twin Creeks, Nevada. *Economic geology*, 1998, vol. 93, no. 2, pp. 201–215.
41. Cline J.S., Hofstra A.H. Ore fluid evolution at the Getchell Carlin-type gold deposit, Nevada, USA. *European Journal of Mineralogy*, 2000, vol. 12, pp. 195–212.
42. Emsbo P., Groves D.I., Hofstra A.H., Bierlein F.P. The giant Carlin gold province: a protracted interplay of orogenic, basinal, and hydrothermal processes above a lithospheric boundary. *Mineralium Deposita*, 2006, vol. 41, pp. 517–525.
43. Ressel M.W., Henry C.D. Igneous geology of the Carlin trend, Nevada: Development of the Eocene plutonic complex and significance for Carlin-type gold deposits. *Economic geology*, 2006, vol. 101, pp. 347–383.
44. Muntean J.L., Cline J.S., Simon A.C., Longo A.A. Magmatic–hydrothermal origin of Nevada's Carlin-type gold deposits. *Nature Geoscience*, 2011, vol. 4, pp. 122–127.
45. Richards J.P. Postsubduction porphyry Cu–Au and epithermal Au deposits: Products of remelting of subduction-modified lithosphere. *Geology*, 2009, vol. 37, pp. 247–250.
46. Soloviev S.G., Kryazhev S.G., Dvurechenskaya S.S. Geology, mineralization, stable isotope geochemistry, and fluid inclusion characteristics of the Novogodnee-Monto oxidized Au-(Cu) skarn and porphyry deposit, Polar Urals. *Mineralium Deposita*, 2013, vol. 48, pp. 603–625.

Received: 1 July 2016.

#### Information about the authors

**Rinat Kh. Mansurov**, Cand. Sc., senior researcher, Russian Federal Subsoil Resources Management Agency, Central Research Institute of Geological Prospecting for non-ferrous and precious metals.

УДК 504.75:504.05:550.47

## ВЛИЯНИЕ ТЕХНОГЕНЕЗА НА ФОРМИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА ВОЛОС ДЕТСКОГО НАСЕЛЕНИЯ

Наркович Дина Владимировна<sup>1</sup>,  
Narkovich@tpu.ru

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

Коваль Елена Владимировна<sup>1</sup>,  
lena\_kowal@mail.ru

Корогод Наталья Петровна<sup>2</sup>,  
natalya\_korogod@mail.ru

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

<sup>2</sup> Павлодарский государственный педагогический институт,  
Казахстан, 140000, г. Павлодар, ул. Мира, 60/2.

**Актуальность работы** обосновывается необходимостью установления критериев оценки состояния окружающей среды. Биогеохимическое изучение всех объектов и компонентов биосферы является весьма актуальной задачей современности. Локальные техногенные преобразования территорий вызывают спонтанные неравномерные поступления элементов в живые организмы. Для оценки степени этого поступления хорошо зарекомендовало себя изучение элементного состава волос человека. Они являются депонирующей средой и могут служить индикатором антропогенного изменения природной среды.

**Цель работы:** изучение специфики формирования элементного состава волос детского населения под влиянием процессов техногенеза.

**Методы исследования:** инструментальный нейтронно-активационный анализ (количественное определение 29 химических элементов), масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS).

**Результаты.** Установлены особенности формирования элементного состава волос детей (3–18 лет) в зоне Северного промышленного узла г. Томска, для чего изученная территория была разделена на сектора с учетом преобладающей «розы ветров» (оси проведены через г. Томск). Первый, подверженный наибольшему влиянию техногенеза, – север-северо-восточный сектор, характеризуется преимущественным по сравнению с другими секторами накоплением в волосах Sc, Cr, Zn, Lu, Hf, Au, Th, U, Cs. Второй – восточный сектор, выделяется максимальным по сравнению с другими секторами накоплением Se, Yb, Ag, Eu в концентрациях, выше среднеобластных значений. Третий – западный сектор, характеризуется самым высоким уровнем накопления Sb. Четвертый, южный сектор, можно рассматривать как фоновый с низкими концентрациями большинства из изученных элементов. Дополнительно было проведено сравнение полученных данных с результатами содержания химических элементов в составе волос населения городов Северск и Томск. Анализ показал, что г. Северск в сравнении с другими изученными территориями характеризуется максимальным накоплением Vg, Ta, U и Se. Для проб волос, отобранных на территории г. Томска, специфичными элементами можно считать La, Sm и Eu. В поселках, расположенных вблизи хвостохранилищ, отмечается накопление элементов в изученном материале в количествах, превышающих фоновый уровень до 6,5 раза. Для волос из обоих поселков характерен высокий уровень (выше 2,5 фона) содержания Au, Ag, Tl, Re, Eu, Li.

**Выводы.** Элементный состав детского населения на территории Томского района отражает специфику техногенного влияния разнопрофильных производств Северного промышленного узла г. Томска и в целом формируется под совокупным влиянием природных и техногенных факторов. На участках, подверженных наибольшему техногенному прессингу (в север-северо-восточном направлении от г. Томска), в составе волос отмечаются более высокие концентрации элементов по сравнению со среднеобластными показателями и фоном и более широкий перечень таких элементов. Городские территории выделяются накоплением в детских волосах брома и редкоземельных элементов. Населенные пункты, не подверженные основному влиянию промышленных объектов и находящиеся в тридцатикилометровой зоне воздействия СХК, при изменении преимущественного направления ветрового переноса веществ также испытывают техногенное воздействие. Юг Томского района можно рассматривать как фоновый с низкими концентрациями большинства из изученных элементов. Томский район как наиболее техногенно-трансформированная территория отмечается специфичным концентрированием в волосах детей элементов-лантаноидов. Показатели соотношения радиоактивных и редкоземельных элементов являются яркими индикаторами условий техногенеза. На территориях со складированными отходами обогатительного производства отмечается концентрирование в волосах детского населения химических элементов, отражающих специфику добываемого и перерабатываемого сырья. Таким образом, волосы детей служат ярким показателем техногенной нагрузки на территории проживания.

### Ключевые слова:

Волосы детей, элементный состав, биогеохимическая специфика, окружающая среда, редкоземельные элементы, техногенез.



## Введение

Потенциально любая промышленная технология содержит угрозу здоровью человека и экологии. При этом воздействие на все природные среды носит накопительный характер и может продолжаться годами. К локальным факторам, формирующим состав волос в районах деятельности промышленных предприятий, относится как воздействие самих техногенных объектов, так и наличие геохимических аномалий ввиду расположения месторождений полезных ископаемых, а также объектов хранения отходов горнорудного сырья.

Отходы горнодобывающей и металлургической промышленности, считающиеся низкотоксичными, до настоящего времени складываются и хранятся в различных накопителях, зачастую без соблюдения соответствующих экологических норм и требований. К сожалению, не учитывается долговременность действия таких источников. В результате почва, подземные и поверхностные воды многих регионов подвержены интенсивному загрязнению в течение десятков лет. А по трофическим цепям происходит передача загрязняющих веществ человеку.

В связи с необходимостью оценки экологической ситуации в таких регионах все большую актуальность приобретают исследования, позволяющие сравнительно легко и эффективно оценивать обстановку. Для этих целей хорошо зарекомендовало себя изучение элементного состава биосубстратов человека (волосы, ногти, кровь и др.), состав которых может выступать в качестве геоиндикатора изменения природной среды под влиянием урбанизации и хозяйственной деятельности человека [1, 2]. Правомерность и эффективность использования волос в анализе эколого-токсикологических корреляций доказана результатами многих исследователей [3–9] и рядом международных координационных программ, выполненных под эгидой Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ) [10, 11].

Волосы человека способны депонировать химические элементы в своей структуре в высоких концентрациях. Кроме того, простота отбора проб и легкая подготовка их для анализа – выгодные преимущества этого материала.

## Характеристика территории и объекта исследования

К территориям с развитым техногенезом относится зона Северного промышленного узла (СПУ) г. Томска. Здесь сосредоточена основная масса промышленных предприятий Томского района, среди которых предприятия агропромышленного и топливно-энергетического комплексов, крупнейший в стране нефтехимический комбинат (ТНХК). Кроме того, на данной территории функционирует крупнейший в России завод по производству оружейного плутония и обогащенного урана, предприятие ядерно-топливного цикла – Сибирский химический комбинат (СХК).

Комбинат включал реакторное, радиохимическое и металлургическое производства, а также 5 промышленных реакторов (из которых до последнего времени эксплуатировались два, а в настоящее время остановлены все), 50 хранилищ жидких и твердых радиоактивных отходов и скважины, через которые производится закачка в подземные горизонты жидких радиоактивных отходов [12].

Проведенные после аварии 6 апреля 1993 г. на СХК комплексные исследования позволили картировать ореолы распространения загрязняющих веществ, в том числе радиоактивных, в зоне влияния данного объекта. Как показали исследования летней экспедиции НПО «Тайфун» (г. Обнинск), загрязнение почв цезием-137 близлежащих территорий по преобладающему направлению ветрового переноса обусловлено штатными и аварийными выбросами СХК за весь период работы. Обнаруженные в процессе съемки участки с повышенной плотностью загрязнения местности цезием-137 (от 0,2 до 1 Кюри/км<sup>2</sup>) расположены широким веером и находятся вне охраняемой территории СХК на удалении до 30...40 км от него, преимущественно в северо-восточном направлении (рис. 1). Цезий-137 является одним из характерных веществ, выбрасываемых при работе предприятий комбината [12, 13].

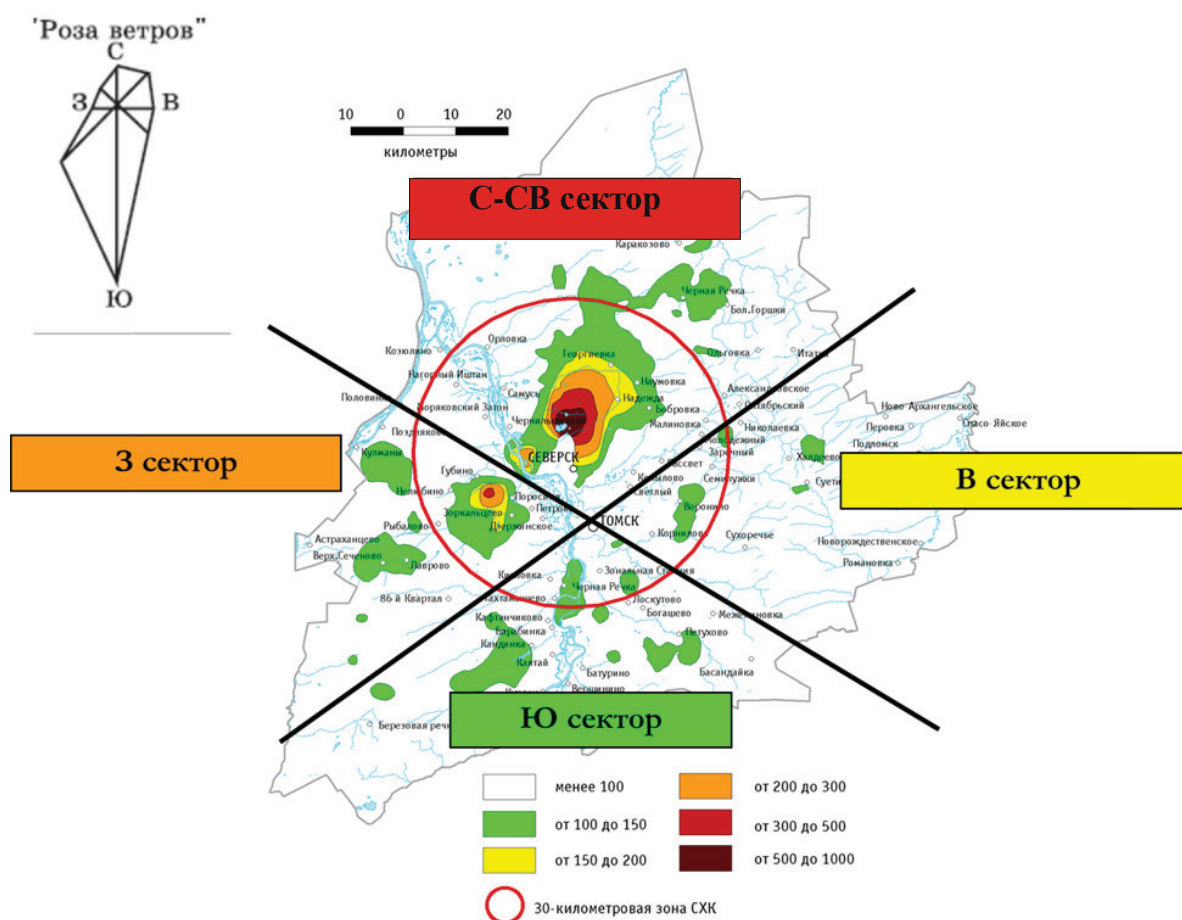
Кроме того, по данным картирования за 1993 г. и изучения элементного состава различных природных сред техногенному влиянию в наибольшей степени подвержены г. Северск и северо-восточный сектор района относительно г. Томска – это зона ветрового переноса веществ с территорий Северного промышленного узла (предприятия СХК, ТНХК и ряд других) и предприятий г. Томска [14–17].

Для выявления ситуации в Томском районе он был условно разделен на сектора влияния Томск-Северской промышленной агломерации с учетом преобладающей «розы ветров» (оси проведены через г. Томск). Были выделены сектора: 1) север-северо-восточный, 2) восточный, 3) южный, 4) западный (рис. 1).

К первому сектору отнесены следующие населенные пункты: Козюлино, Моряковский Затон, Орловка, Кижирово, Самусь, Черная Речка (Юкса), Наумовка, Георгиевка. В состав второго сектора включены: Воронино, Семилужки, Октябрьское, Копылово, Конино, Корнилово, Рассвет, Новоархангельск, Халдеево. В третий сектор входят: Черная Речка и Лоскутово. В составе четвертого сектора оказались: Зоркальцево, Губино, Нелюбино, Березкино, Половинка.

Сравнительный анализ содержаний химических элементов был произведен и для городов Томск и Северск.

В статье также рассматриваются территории с наличием таких техногенных систем, как складированные отходы обогащения сульфидных руд. Исследования проводились в Кемеровской области в



**Рис. 1.** Схематическая карта плотности загрязнения почв  $^{137}\text{Cs}$  ( $\text{mKv}/\text{m}^2$ ) вокруг СХК по результатам аэрогамма-съёмки на сентябрь 1993 г. (по материалам НПО «Тайфун») с изменениями. Территория Томского района условно разделена на сектора по степени влияния предприятий Северного промышленного узла. Условные обозначения: Ю сектор – южный сектор влияния СПУ (условно фоновая территория); В сектор – восточный сектор влияния СПУ; З сектор – западный сектор влияния СПУ; С-СВ сектор – сектор север-северо-восточного направления влияния СПУ

**Fig. 1.** Schematic map of  $^{137}\text{Cs}$  soil contamination density ( $\text{mKv}/\text{m}^2$ ) around the Siberian Chemical Combine by the results of airborne gamma-shooting in September 1993 (based on the SPA «Typhoon»), as amended. The territory of Tomsk region is conventionally divided into sectors according to the degree of influence of the enterprises of the Northern industrial junction: Ю сектор is the southern sector of the impact of Northern industrial junction (background area); В сектор is the eastern sector of the impact of Northern industrial junction; З сектор is the western sector of the impact of Northern industrial junction; С-СВ сектор is the sector of north-northeastern direction of the impact of Northern industrial junction.

населенных пунктах Урск, Комсомольск и Макарак. Первые два поселка расположены в непосредственной близости к хвостохранилищам крупных горно-обогатительных заводов. Урское хвостохранилище было образовано в 30-х годах прошлого века и содержит отходы цианирования первичных полиметаллических Cu-Zn-серноколчеданных руд зоны окисления Урского месторождения. Хвосты Комсомольского хвостохранилища являются отходами Комсомольского золотоизвлекательного завода. Он был введен в эксплуатацию в 1937–1940 гг. На заводе цианированием перерабатываются золото-арсенопирит-кварцевые руды. Поселок Макарак Кемеровской области, расположенный в удалении от объектов складирования отходов горно-обогатительных предприятий, был выбран в качестве фонового объекта.

#### Методика исследований

Отбор образцов волос детского населения на территории Томского района производился в период с 2000 по 2011 г. Пробы волос были взяты у детей (мальчиков и девочек) в возрасте от 3 до 18 лет. Всего исследовано 182 образца. В Кемеровской области исследования проводились в 2015 г., количество образцов волос составило 21 шт. Методика отбора проб выполнялась в соответствии с рекомендациями МАГАТЭ (1980) [10, 11].

Отбор материала производился у детей дошкольного и школьного возраста. В выборку включались дети, не имеющие отклонений по медицинским показателям, коренные жители.

Волосы отбирались не менее чем с пяти точек головы (затылочной, височной, теменной, лобной областей). Пряди срезались ножницами из нер-

жавеющей стали в нескольких миллиметрах от корня, упаковывались в полиэтиленовые пакеты. Масса пробы составляла 200...500 мг. При взятии образцов фиксировался возраст, пол, полное имя, адрес проживания и место рождения.

В пробоподготовку входила отмывка волос дважды попеременно в ацетоне и дистиллированной воде и высушивание при комнатной температуре. При очистке волос от внешних загрязнений использовался широко применяемый способ, эффективность которого показана в работах Л.И. Жук и А.А. Киста [1, 18]. Для подготовки к аналитическим исследованиям проба волос измельчалась ножницами из нержавеющей стали до сегментов длиной около 0,5 см.

Для количественного определения химических элементов в волосах детского населения Томского района Томской области использовался метод многоэлементного инструментального нейтронно-активационного анализа, выполненный на Томском исследовательском ядерном реакторе ИРТ-Т в лаборатории ядерно-геохимических методов исследования кафедры геоэкологии и геохимии Томского политехнического университета (аналитики А.Ф. Судыко и Л.В. Богутская). Измерения производились на гамма-спектрометре с германий-литиевым детектором.

Элементоопределение для волос детей из Кемеровской области было выполнено на масс-спектрометре с магнитным сектором ELEMENT-2 (Finnigan MAT), обладающем двойной фокусировкой и позволяющем регистрировать сигнал в трех разрешениях. В качестве внутреннего стандарта выбран Rh с концентрацией 0,2 нг/л. Для градуирования при расчетах содержаний использованы сертифицированные мультиэлементные растворы CLNS 1–4 (SPEX, USA). Правильность результатов ICP-MS

контролировалась с помощью стандартного образца Байкальского окуня БОЖ-2. Анализ выполнялся в Химико-аналитическом центре «Плазма» (г. Томск) (аналитик Н.В. Федюнина).

#### Результаты исследований и их обсуждение

Основная доля изученных элементов в составе волос детей в Томском районе имеет достаточно большой разброс значений от минимума к максимуму, что говорит о высокой неоднородности геохимической обстановки на территории района, обусловленной наличием сильных источников воздействия (рис. 2).

Проведенная сравнительная характеристика накопления химических элементов в волосах детей на близлежащих к СПУ территориях (согласно делению по секторам), показала, что наиболее широкий спектр элементов в концентрациях, превышающих среднеобластные значения, выделяется именно для сектора север-северо-восточного направления. Здесь наблюдается преимущественное для всей изученной территории района накопление в волосах Sc, Cr, Zn, Lu, Hf, Au, Th (рис. 3). Уровень накопления Cs в волосах детей хоть и находится ниже среднеобластного, но значительно превышает показатели в других секторах, и в целом этот элемент фиксируется в зоне влияния СХЖ и на городских территориях (рис. 3). Среди локальных источников возможного поступления перечисленных элементов могут быть ТЭЦ и ГРЭС городов Томска и Северска, работающие на угле, а также некоторые промышленные предприятия областного центра. По данным А.Ю. Шатилова, эти источники являются преобладающими по поступлению анализируемых элементов с пылеаэрозольными выпадениями [15].

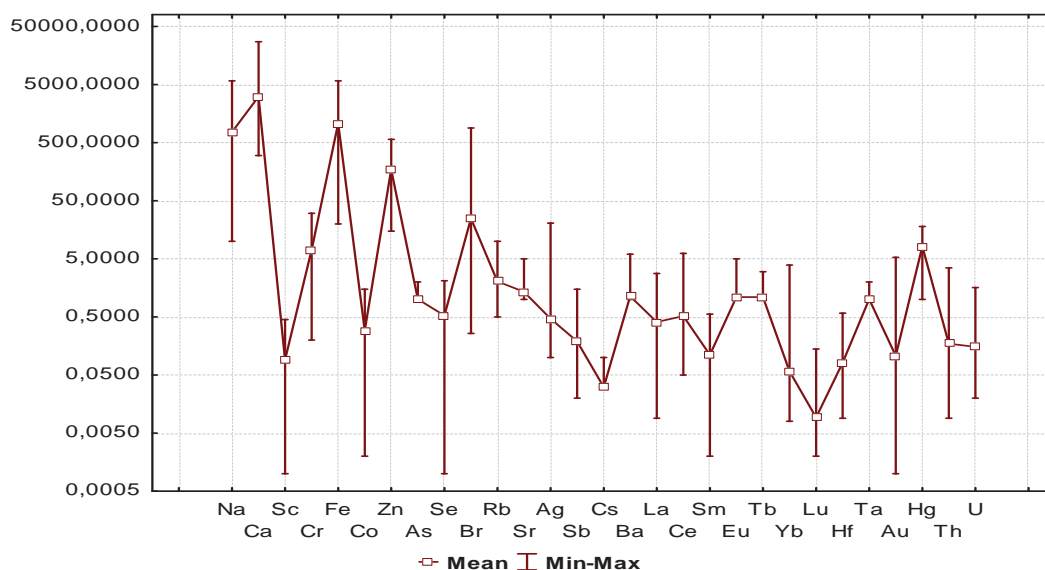
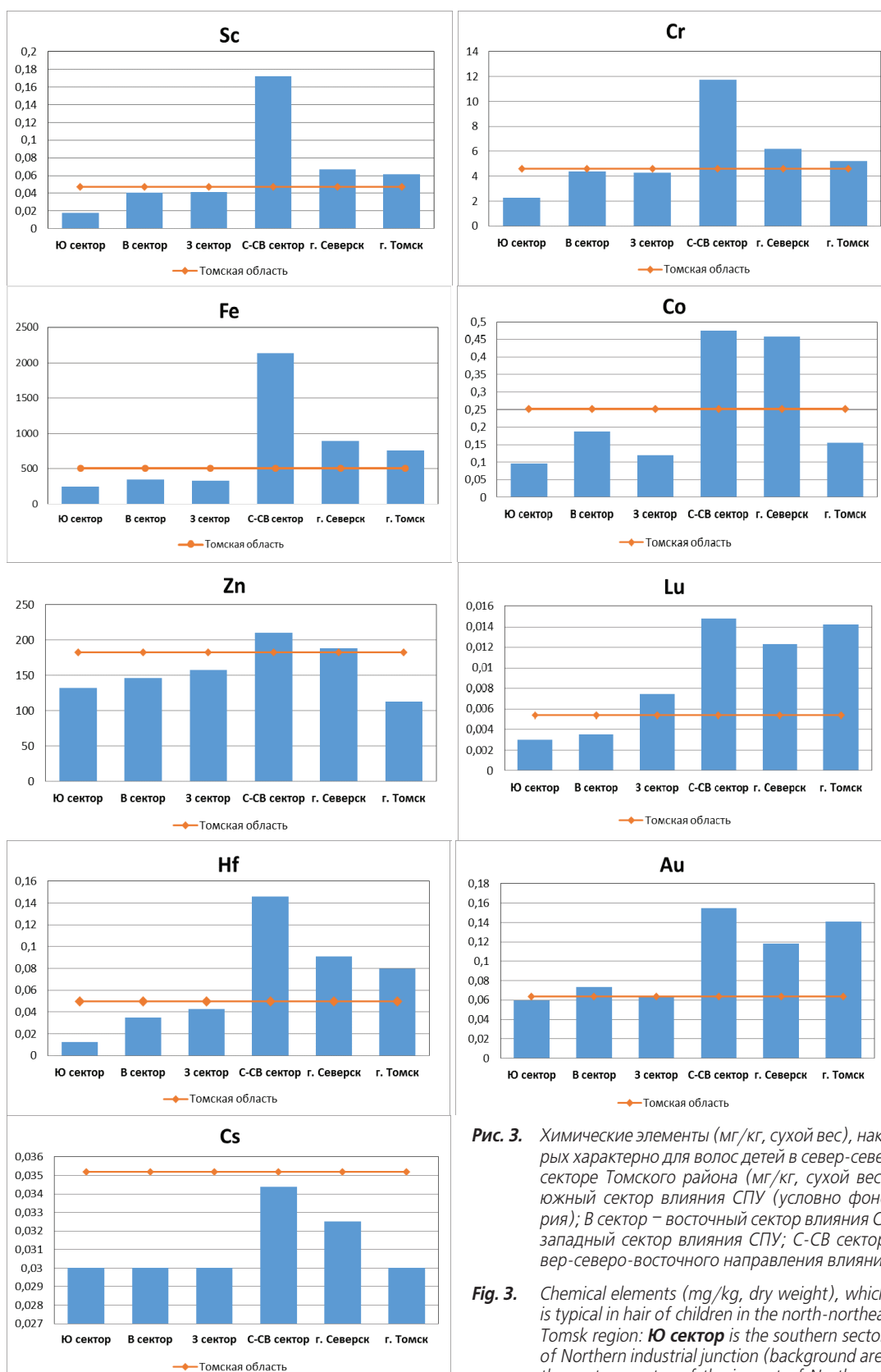


Рис. 2. Среднее содержание элементов в волосах детского населения Томского района (мг/кг сухого веса)

Fig. 2. Average content of elements in the hair of the infant population of Tomsk region (mg/kg, dry weight)

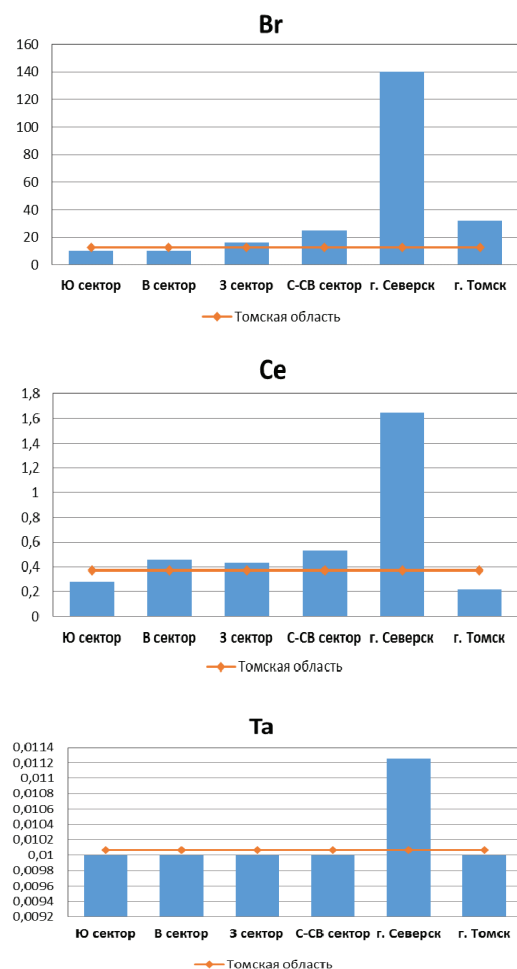


**Рис. 3.** Химические элементы (мг/кг, сухой вес), накопление которых характерно для волос детей в север-северо-восточном секторе Томского района (мг/кг, сухой вес): Ю сектор – южный сектор влияния СПУ (условно фоновая территория); В сектор – восточный сектор влияния СПУ; З сектор – западный сектор влияния СПУ; С-СВ сектор – сектор север-северо-восточного направления влияния СПУ

**Fig. 3.** Chemical elements (mg/kg, dry weight), which accumulation is typical in hair of children in the north-northeastern sector of Tomsk region: Ю сектор is the southern sector of the impact of Northern industrial junction (background area); В сектор is the eastern sector of the impact of Northern industrial junction; З сектор is the western sector of the impact of Northern industrial junction; С-СВ сектор is the sector north-northeastern direction of the impact of Northern industrial junction



В целом предприятия топливно-энергетического комплекса, а также промышленные объекты г. Томска, оказывают сильное воздействие на природные среды, что приводит к повышенному относительно среднеобластных показателей содержанию в волосах Sc, Cr, Fe, Co, Hf. Именно с неоднородностью распределения связан факт присутствия в пробах на контрольных участках и более удаленных от промышленных предприятий территориях элементов в количествах, не превышающих пределы определения данным видом анализа [19].

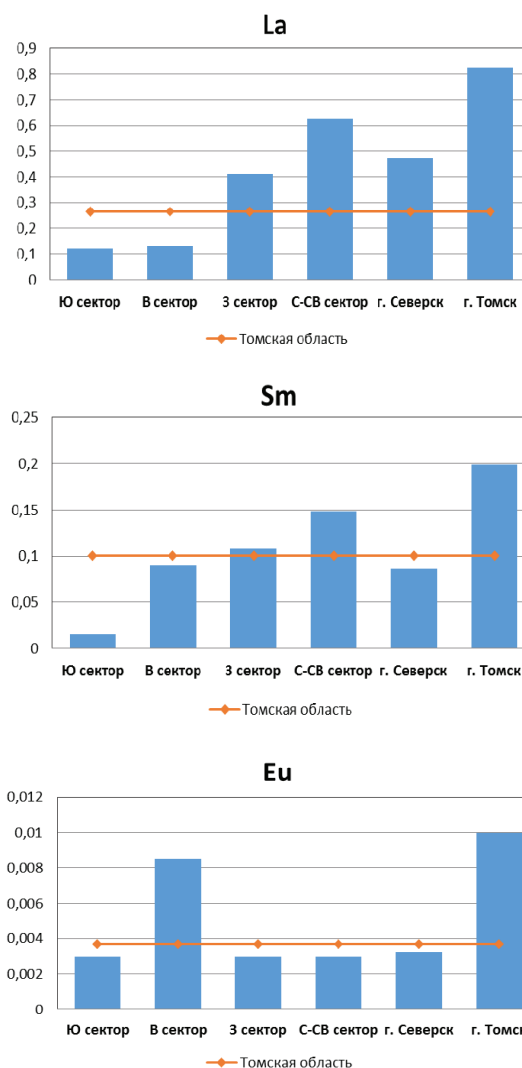


**Рис. 4.** Химические элементы (мг/кг, сухой вес), накопление которых характерно для волос детей из г. Северска. Условные обозначения: Ю сектор – южный сектор влияния СПУ (условно фоновая территория); В сектор – восточный сектор влияния СПУ; З сектор – западный сектор влияния СПУ; С-СВ сектор – сектор север-северо-восточного направления влияния СПУ

**Fig. 4.** Chemical elements (mg/kg, dry weight), which accumulation is typical for children's hair of Seversk: Ю сектор is the southern sector of the impact of Northern industrial junction (background area); В сектор is the eastern sector of the impact of Northern industrial junction; З сектор is the western sector of the impact of Northern industrial junction; С-СВ сектор is the sector north-northeastern direction of the impact of Northern industrial junction

В то же время импактные зоны дают в целом по району превышение над средним относительно области уровнем, составляющее минимально в 1,2 раза для Sm, а максимально – в 2,7 раз для Th [20].

Город Северск, по сравнению с Томском и выделенными секторами, характеризуется максимальным накоплением Br, Ta, U и Ce (рис. 4, 7).



**Рис. 5.** Химические элементы (мг/кг, сухой вес), накопление которых характерно для волос детей из г. Томска. Условные обозначения: Ю сектор – южный сектор влияния СПУ (условно фоновая территория); В сектор – восточный сектор влияния СПУ; З сектор – западный сектор влияния СПУ; С-СВ сектор – сектор север-северо-восточного направления влияния СПУ

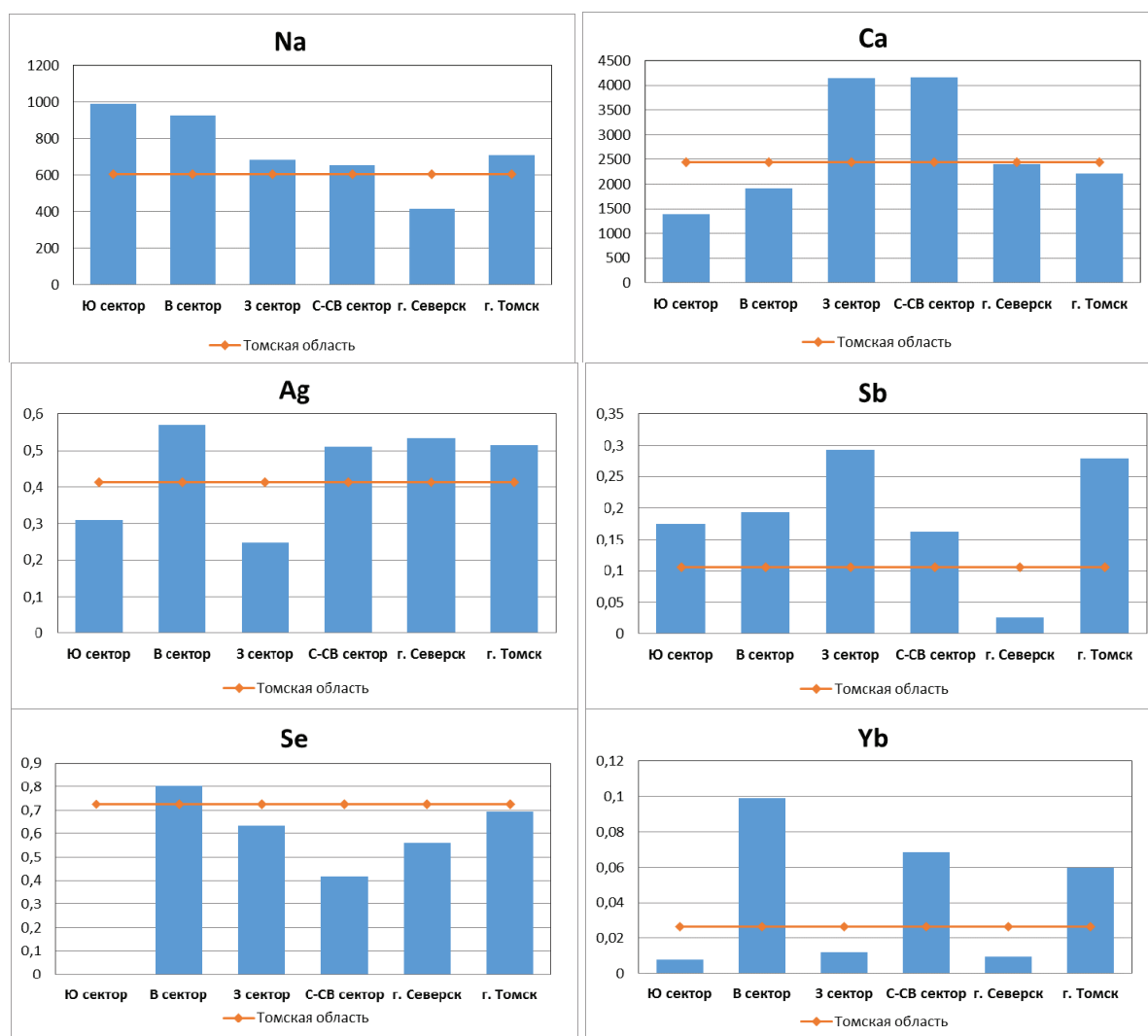
**Fig. 5.** Chemical elements (mg/kg, dry weight), which accumulation is typical for children's hair of Tomsk: Ю сектор is the southern sector of the impact of Northern industrial junction (background area); В сектор is the eastern sector of the impact of Northern industrial junction; З сектор is the western sector of the impact of Northern industrial junction; С-СВ сектор is the sector north-northeastern direction of the impact of Northern industrial junction

Для волос, отобранных на территории г. Томска, специфичными элементами можно считать La, Sm и Eu (рис. 5). Причем последний также выявлен в повышенных концентрациях и в пробах из восточного сектора, что, вероятно, может свидетельствовать и влиянии на формирование состава волос на этих территориях месторождений циркон-ильменитовых песков с примесями редкоземельных элементов.

В качестве источника сурьмы в состав волос детей на территории Томского района могут рассматриваться промышленные предприятия г. Томска (ТЭЦ-3), а также Томский нефтехимический комбинат, именуемый в настоящее время «Сибур» [15, 16, 21, 22]. По нашим данным, более высокий уровень накопления Sb отмечается именно в западном секторе и на территории г. Томска (рис. 6).

При изменении преимущественного направления ветрового переноса веществ населенные пункты южного и западного сектора, находящиеся в тридцатикилометровой зоне воздействия СХК, также испытывают техногенное воздействие. Это отражается в превышении относительно среднеобластного уровня содержания в волосах детей Sb, Lu, La и др. элементов (рис. 3, 5, 6).

При рассмотрении графиков содержаний химических элементов для восточного сектора можно отметить следующие особенности: первое – только в данном секторе фиксируется накопление Se в концентрациях, выше среднеобластных значений; второе – здесь происходит максимальное накопление Yb и фиксируется превышение в накоплении Ag; третье – в волосах детей Eu накапливается вы-



**Рис. 6.** Содержание химических элементов в составе волос детского населения (мг/кг, сухой вес) в различных секторах Томского района и на урбанизированных территориях. Условные обозначения: Ю сектор – южный сектор влияния СПУ (условно фоновая территория); В сектор – восточный сектор влияния СПУ; З сектор – западный сектор влияния СПУ; С-СВ сектор – сектор север-северо-восточного направления влияния СПУ

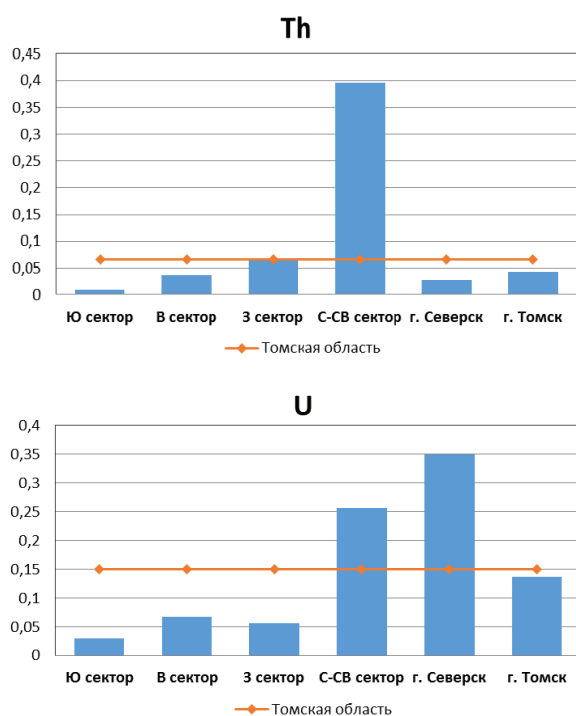
**Fig. 6.** Chemical element content in children's hair (mg/kg, dry weight) in different sectors of Tomsk region and the cities of Seversk and Tomsk: Ю сектор is the southern sector of the impact of Northern industrial junction (background area); В сектор is the eastern sector of the impact of Northern industrial junction; З сектор is the western sector of the impact of Northern industrial junction; С-СВ сектор is the sector north-northeastern direction of the impact of Northern industrial junction

ше среднеобластных значений (рис. 5, 6). По совокупности выделенных особенностей можно говорить о преимущественном влиянии природных факторов на формирование элементного состава волос в восточном секторе, под которыми, с высокой степенью вероятности, стоит подразумевать влияние месторождений циркон-ильменитовых песков с примесями редкоземельных элементов и других геологических особенностей территории.

Южный сектор можно рассматривать как фоновый с низкими концентрациями большинства из изученных элементов.

Распределение радиоактивных элементов на рассматриваемой территории Томского района имеет свои особенности. Уран, наряду с La, Ce и Ta, нами отнесен к группе элементов, поступающих в окружающую среду в результате работы предприятий ядерно-топливного цикла. Ранее для территории Челябинской области с наличием объекта ядерно-топливного цикла ПО «Маяк» был установлен схожий спектр элементов, накапливающихся в составе волос выше среднего уровня [23].

Максимальные концентрации урана в волосах отмечаются у детей, проживающих в г. Северске, в меньших количествах он накапливается в волосах в север-северо-восточном секторе (рис. 7).



**Рис. 7.** Содержание радиоактивных элементов (мг/кг, сухой вес) в волосах детского населения в разных секторах Томского района и гг. Северск и Томск

**Fig. 7.** Content of radioactive elements (mg/kg, dry weight) in children's hair in different sectors of Tomsk region and the cities of Seversk and Tomsk

Значительные превышения среднеобластного уровня по содержанию Th зафиксированы в секто-

ре север-северо-восточного направления от г. Томска (рис. 7). В максимальных количествах Th представлен в волосах детей п. Моряковский Затон. Возможно, мы наблюдаем факт комплексного природно-техногенного влияния, обусловленного как проявлениями циркон-ильменитовых песков вблизи поселка [24], так и функционированием в данном населенном пункте стекольного завода, использовавшего для своей работы пески туганского типа. За счет данной аномалии Томский район характеризуется максимальным накоплением Th среди всех 16-ти районов Томской области [20].

Влияние техногенеза на накопление радиоактивных (U, Th) и редкоземельных элементов (TR) ярко демонстрируют графики их отношений. Так, для отношения Th к сумме TR в волосах детей Томского района характерны максимальные показатели (рис. 8, а).

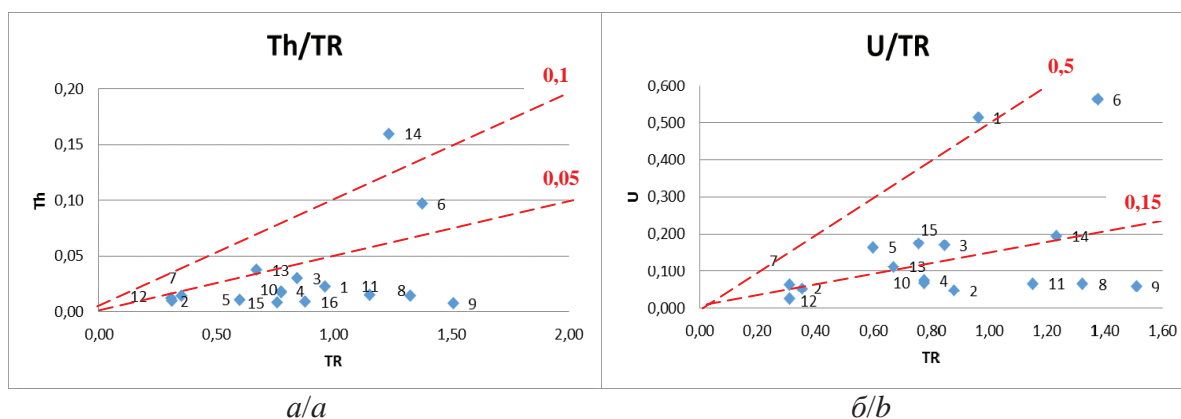
Следует отметить также достаточно высокие показатели концентрации Th и TR в волосах детей Каргасокского района Томской области, природу возникновения которых мы пока объяснить не можем. Этот район, наряду с другим северным нефтегазоносным районом – Александровским, характеризуется максимальным накоплением урана в волосах детского населения (рис. 8, б). Томский район стоит на третьем месте по уровню содержания урана в волосах.

Ранее проведенные на территории Томской области исследования позволили выявить в районе Северного промышленного узла увеличение концентрации и изменение отношений некоторых редкоземельных элементов в ряде сред. Отмечалось, что интенсивный совокупный ореол редкоземельных элементов обусловлен как природными, так и антропогенными факторами со стороны СХК, ТНХК, что особенно ярко просматривается по изучению геохимических особенностей снега [24].

Для волос характерен комбинированный путь поступления элементов в их структуру, в большей степени обусловленный пылеарозольными включениями.

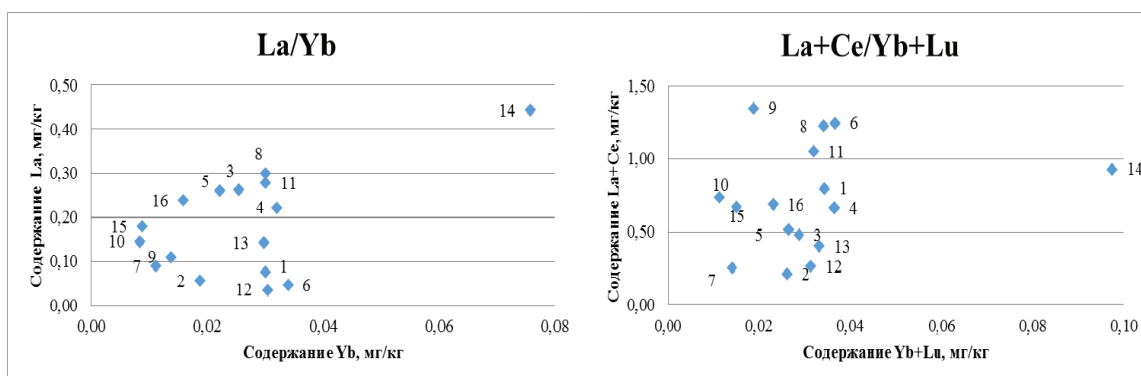
Полученные нами данные подтверждают результаты по другим средам на территории СПУ. При рассмотрении отношений легких лантаноидов к тяжелым (La/Yb) и их сумм (La+Ce/Yb+Lu) Томский район характеризуется обособленным положением среди других районов (рис. 9), что обуславливается высокими концентрациями тяжелых лантаноидов в составе волос детей на данной территории. Подобная картина подтверждает смешанную природу поступления элементов в изучаемую биосреду.

Территории, подвергающиеся мощному техногенному прессингу, имеют специфический биогеохимический портрет. Следует отметить, что индикаторная роль элементов на техногенно-напряженных территориях подтверждается нашими последними данными по изучению территорий рас-



**Рис. 8.** Показатель отношения содержания а) Th и б) U к сумме редкоземельных элементов в волосах детского населения в районах Томской области: 1 – Александровский; 2 – Асиновский; 3 – Бакчарский; 4 – Верхнекетский; 5 – Зырянский; 6 – Кargasокский; 7 – Кожевниковский; 8 – Колпашевский; 9 – Кривошеинский; 10 – Молчановский; 11 – Парabelьский; 12 – Первомайский; 13 – Тегульдeтский; 14 – Томский; 15 – Чаинский; 16 – Шегарский

**Fig. 8.** Ratio of a) Th and b) U to the total content of rare earth elements in children's hair in Tomsk region districts: 1 – Alexandrovsky; 2 – Asinovsky; 3 – Bakcharsky; 4 – Verkhneketsky; 5 – Zyriansky; 6 – Kargasoksky; 7 – Kozhevnikovsky; 8 – Kolpashevsky; 9 – Krivosheinsky; 10 – Molchanovsky; 11 – Parabelsky; 12 – Pervomaysky; 13 – Teguldetsky; 14 – Tomsky; 15 – Chainsky; 16 – Shegarsky



**Рис. 9.** Показатели La/Yb и La+Ce/Yb+Lu по данным элементного состава волос детского населения в районах Томской области: 1 – Александровский; 2 – Асиновский; 3 – Бакчарский; 4 – Верхнекетский; 5 – Зырянский; 6 – Кargasокский; 7 – Кожевниковский; 8 – Колпашевский; 9 – Кривошеинский; 10 – Молчановский; 11 – Парabelьский; 12 – Первомайский; 13 – Тегульдeтский; 14 – Томский; 15 – Чаинский; 16 – Шегарский

**Fig. 9.** Indicators of La/Yb and La+Ce/Yb+Lu according to data of elemental composition of children's hair in Tomsk region districts: 1 – Alexandrovsky; 2 – Asinovsky; 3 – Bakcharsky; 4 – Verkhneketsky; 5 – Zyriansky; 6 – Kargasoksky; 7 – Kozhevnikovsky; 8 – Kolpashevsky; 9 – Krivosheinsky; 10 – Molchanovsky; 11 – Parabelsky; 12 – Pervomaysky; 13 – Teguldetsky; 14 – Tomsky; 15 – Chainsky; 16 – Shegarsky

положения хвостохранилищ горнодобывающих производств (поселки Комсомольск и Урск Кемеровской области).

По отношению к фону (п. Макарак Кемеровской области) можно выделить следующие геохимические ряды накопления элементов в составе волос детского населения:

- 1) в п. Комсомольск Ag 5,3 > Au 4,4 > Tl 3,7 > Ba 2,9 > V 2,8 > Eu 2,6 > Re 2,6 >> Li 2,5 > Er 2,4 > Na = K 2,2 > Ca = Bi = U 2 > Be 1,9 > Mg = Sr = Pt 1,8 > Sb 1,7 > Lu 1,6 > Ti = As 1,5;
- 2) в п. Урск Re 6,5 > Au 5,6 > Sb 5,2 > Ag 5 > Ta 5 > Eu 4,3 > Sn 4,2 > Li 3,5 > Be 3,4 > U 3,3 > Tl 3 > Mg 2,7 > Na 2,2 > K = Ca = As 2 > Sr 1,8 > Ni 1,7 > Pt 1,6 > Er 1,5.

Складированные отходы обогащения оказывают неблагоприятное влияние на окружающие территории. Высвобождение и миграция элементов из хвостов приводит к их широкому распространению и последующему концентрированию в различных объектах окружающей среды. Волосы человека накапливают в своей структуре химические элементы в больших количествах. В целом, чем больше поток поступающих в структуру волос элементов, тем выше уровень накопления. В поселках, расположенных вблизи хвостохранилищ, отмечается накопление элементов в изученном материале в количествах, превышающих фоновый уровень в 1,5–6,5 раза. Для волос из обоих поселков характерен высокий уровень (выше 2,5 фона) со-



держания Au, Ag, Tl, Re, Eu, Li. Имеющиеся различия, вероятнее всего, обусловлены минералогеохимическим составом складированных в хвостохранилищах отходов.

#### Выводы

Элементный состав детского населения на территории Томского района отражает специфику техногенного влияния разнопрофильных производств Северного промышленного узла г. Томска и в целом формируется под совокупным влиянием природных и техногенных факторов. На участках, подверженных наибольшему техногенному прессингу (в север-северо-восточном направлении от г. Томска), в составе волос отмечаются более высокие концентрации элементов, по сравнению со среднеобластными показателями и фоном, и более широкий перечень таких элементов. Городские территории выделяются накоплением в детских волосах брома и редкоземельных элементов. Населенные пункты, не подверженные основному влиянию промышленных объектов и находящиеся в тридцати-

километровой зоне воздействия СХК, при изменении преимущественного направления ветрового переноса веществ также испытывают техногенное воздействие. Юг Томского района можно рассматривать как условно фоновый с низкими концентрациями большинства из изученных элементов.

Томский район как наиболее техногенно-трансформированная территория отмечается специфичным концентрированием в волосах детей элементов-лантаноидов. Показатели соотношения радиоактивных и редкоземельных элементов являются яркими индикаторами условий техногенеза.

На территориях со складированными отходами обогатительного производства отмечается концентрирование в волосах детского населения химических элементов, отражающих специфику добываемого и перерабатываемого сырья. Таким образом, волосы детей служат ярким показателем техногенной нагрузки на территории проживания.

*Исследования на территории Кемеровской области выполнены за счет гранта Российского научного фонда (проект № 15-17-10011).*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кист А.А. Феноменология биогеохимии и бионеорганической химии. – Ташкент: ФАН, 1987. – 235 с.
2. Kist A.A., Zhuk L.I. Human hair composition and the problems of global ecology. – Tashkent, USSR: Institute of Nuclear Physics of the Uzbek Academy of Sciences, 1991. – 60 p.
3. Assessment of trace elements in scalp hair of a young urban population in Brazil / M.F.H. Carneiro, M. Moresco, G.R. Chagas, V.C. Oliveira Souza, C. Rhoden, Jr. F. Barbosa // *Biological Trace Element Research*. – 2011. – V. 143. – Iss. 2. – P. 815–824.
4. Distribution of aluminum in hair of Brazilian infants and correlation to aluminum-adjuvanted vaccine exposure / D. Bohrer, M. Schmidt, C.M. Rejane, G. Dórea José // *Clinica Chimica Acta*. – 2014. – V. 428. – P. 9–13.
5. Indoor metallic pollution and children exposure in a mining city / E. Barbieri, E. Fontúrbel Francisco, C. Herbas, L. Barbieri Flavia, J. Gardon // *Science of the Total Environment*. – 2014. – V. 487. – P. 13–19.
6. Pan Y., Li H. Trace elements in scalp hair from potentially exposed individuals in the vicinity of the Bayan Obo mine in Baotou, China // *Environmental Toxicology and Pharmacology*. – 2015. – V. 40. – P. 678–685.
7. Rodushkin I., Axelsson M.D. Application of double focusing sector field ICP-MS for multielemental characterization of human hair and nails. P. II. A study of the inhabitants of northern Sweden // *The Science of the Total Environment*. – 2000. – V. 262 (1–2). – P. 21–36.
8. Biomonitoring of arsenic, cadmium, lead, manganese and mercury in urine and hair of children living near mining and industrial areas / I. Molina-Villalba, M. Lacasaca, M. Rodriguez-Barranco, A.F. Hernandez, B. Gonzalez-Alzaga, C. Aguilar-Garduco, F. Gil // *Chemosphere*. – 2015. – V. 124. – P. 83–91.
9. Gil F., Hernandez A.F. Toxicological importance of human biomonitoring of metallic and metalloid elements in different biological samples // *Food and Chemical Toxicology*. – 2015. – V. 80. – P. 287–297.
10. Ryabukhin Y.S. Activation analysis of hair as an indicator of contamination of man by environmental trace element pollutants. – Vienna: IAEA, 1978. – PL/50. – 135 p.
11. Element analysis of biological materials. Current problems and techniques with special reference to trace elements. Appendix II. Technical reports series. – № 197. – Vienna: IAEA, 1980. – P. 351–367.
12. Рихванов Л.П. Общие и региональные проблемы радиоэкологии. – Томск: Изд-во ТПУ, 1997. – 384 с.
13. Состояние компонентов природной среды Томской области по данным эколого-геохимического мониторинга и здоровье населения / Л.П. Рихванов, Е.Г. Язиков, Н.В. Барановская, А.М. Беляева, Л.В. Журняк, А.В. Таловская, О.А. Денисова, Ю.И. Сухих // *Безопасность жизнедеятельности*. – 2008. – № 1. – С. 29–37.
14. Аэрозоли в природных планшетах Сибири / А.П. Бояркина, В.В. Байковский, Н.В. Васильев и др. – Томск: Изд-во Томского ун-та, 1993. – 157 с.
15. Барановская Н.В., Игнатова Т.Н., Рихванов Л.П. Уран и торий в органах и тканях человека // *Вестник Томского государственного университета*. – 2010. – № 339. – С. 182–188.
16. Шатилов А.Ю. Вещественный состав и геохимическая характеристика пылевых атмосферных выпадений на территории Обского бассейна: автореф. дис. ... канд. г.-м. наук. – Томск, 2001. – 23 с.
17. Минералогеохимический состав природно-техногенной составляющей почв Томской агропромышленной агломерации / Е.Г. Язиков, Р.В. Голева, Л.П. Рихванов и др. // *Сибирский экологический журнал*. – 2006. – № 3. – С. 315–324.
18. Zhuk L.I., Kist A.A. Human hair neutron activation analysis: analysis on population level and mapping // *Czechoslov. J. Phys.* – 1999. – V. 49. – S. 1. – P. 339–346.
19. Барановская Н.В. Содержание Fe, Cr, Co, Sc, Hf в волосах населения Томской области // *Проблемы геологии и географии Сибири: Вестник ТГУ. – Серия «Науки о Земле» (геология, география, метеорология, геодезия)*. – 2003. – Приложение № 3 (V). – С. 126–128.
20. Барановская Н.В., Швецова Д.В., Судыко А.Ф. Региональная специфика элементного состава волос детей, проживающих на территории Томской области // *Известия Томского политехнического университета*. – 2011. – Т. 319. – № 1. – С. 212–220.
21. Таловская А.В. Геоэкологическая оценка территории Томск-Северской промышленной агломерации по результатам изуче-

- ния пылеаэрозольных выпадений // Записки горного института. Полезные ископаемые России и их освоение. – 2006. – Т. 167. – Ч. 2. – С. 128–131.
22. Экология Северного промышленного узла г. Томска. Проблемы и решения / под ред. А.М. Адама. – Томск: Изд-во ТГУ, 1994. – 260 с.
23. Барановская Н.В. Закономерности накопления и распределения химических элементов в организмах природных и природно-антропогенных экосистем: автореф. дис. ... д-ра биол. наук. – Томск, 2011. – 46 с.
24. Циркон-ильменитовые россыпные месторождения как потенциальный источник развития Западно-Сибирского региона / под ред. Е.Н. Трибунского. – Кемерово: Сарс, 2001. – 217 с.

*Поступила 09.06.2016 г.*

#### **Информация об авторах**

**Наркович Д.В.**, кандидат геолого-минералогических наук, старший преподаватель кафедры геоэкологии и геохимии Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

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

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

**Корогод Н.П.**, кандидат биологических наук, доцент кафедры общей биологии Павлодарского государственного педагогического института.

UDC 504.75:504.05:550.47

## INFLUENCE OF TECHNOGENESIS ON FORMING ELEMENT COMPOSITION OF CHILDRENS HAIR

**Dina V. Narkovich<sup>1</sup>,**  
Narkovich@tpu.ru

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

**Elena V. Koval<sup>1</sup>,**  
lena\_koval@mail.ru

**Natalia P. Korogod<sup>2</sup>,**  
natalya\_korogod@mail.ru

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

<sup>2</sup> Pavlodar State Pedagogical Institute,  
60/2, Mira Street, Pavlodar, 140000, Kazakhstan.

**The relevance** of the research is supported by the necessity to elaborate the criteria for assessing the environment condition. Biogeochemical study of all objects and components of the biosphere is rather relevant task of modern times. Local technogenic transformations of areas cause spontaneous, irregular income of elements to the living organisms. Study of element composition of human hair proved itself to be good for assessing this income degree. Human hair is a deposit environment and can serve as an indicator for anthropogenic change of the environment.

**The aim** of the study is to investigate the accumulation specificity of chemical elements in the content of children's hair under the influence of technogenesis and to find the indicators of this influence.

**The research methods:** instrumental neutron activation analysis (quantitative determination of 29 chemical elements), mass-spectrometry with inductively coupled plasma ICP-MS.

**Results.** The authors have determined the peculiarities of formation of element composition of children's hair (3–18 years old) in the area of Northern industrial hub of Tomsk. For this purpose, the investigated area was divided into sectors taking into account the prevailing «wind rose» (the axes were run across Tomsk). The first sector – the north–north-eastern – is subject to the most influence of technogenesis; in comparison with other sectors it is characterized by the maximal accumulation of Sc, Cr, Zn, Lu, Hf, Au, Th, U, Cs in hair. The second one, the eastern sector, in comparison with the others is distinguished by the maximal accumulation of Se, Yb, Ag, Eu with concentrations, which are higher than average regional values. The third, western, sector is characterized by the highest Sb accumulation level. The fourth one, the southern sector, can be considered as the background sector with low concentrations of the most studied elements. In addition, the authors compared the data with the results of investigation of chemical elements content in the hair of Seversk and Tomsk residents. The investigation shown that Seversk, compared to other areas, is characterized by the maximal accumulation of Br, Ta, U and Ce. For the hair samples from Tomsk, La, Sm and Eu are specific. In the villages, located near tailings, the accumulation level of elements 6,5 times exceeds the background level. For the hair from both villages, the high level (2,5 times exceeds the background) of Au, Ag, Tl, Re, Eu, Li contents is specific.

**Conclusions.** The element composition of children's hair in the studied area reflects the specificity of technogenic influence of different manufacturing enterprises in Northern industrial hub of Tomsk; and in general, it is formed under the additive effects of natural and technogenic aspects. In the areas with the most active technogenic impact, the concentrations of element in the hair are higher and the range of elements is wider in comparison with the average regional factors and background data. Urban territories are distinguished by Br and rare earth elements accumulation in children's hair. Human settlements, which are not subject to the main impact of industrial enterprises and located in thirty-kilometer area of SCC impact, at prevailing direction of wind transfer of the substances, suffer the technogenic influence. The southern part of Tomsk district can be considered as background area with low concentrations of the majority of the studied elements. The indices of elements ratio are significant indicators of technogenesis conditions. Tomsk district as the most technogenic-transformed area is characterized by specific concentration of lanthanides in the children's hair. In the territories with the stored wastes of enrichment production, the concentration of chemical elements, reflecting the specificity of the produced and recycled materials, is specific for children's hair. Therefore, children's hair is the demonstrating factor of technogenic load on the residential areas.

### Key words:

Children's hair, elemental composition, biogeochemical specificity, environment, rare earth elements, technogenesis.

The research in the territory of Kemerovo region was carried out using the grant of the Russian Science Foundation (project no. 15–17–10011).

## REFERENCES

- Kist A.A. *Fenomenologiya biogeokhimii i bioneorganicheskoy khimii* [Phenomenology of biogeochemistry and bioinorganic chemistry]. Tashkent, FAN, 1987. 235 p.
- Kist A.A., Zhuk L.I. *Human hair composition and the problems of global ecology*. Tashkent, USSR, Institute of Nuclear Physics of the Uzbek Academy of Sciences, 1991. 60 p.
- Carneiro M.F.H., Moresco M., Chagas G.R., Oliveira Souza V.C., Rhoden C., Barbosa Jr. F. Assessment of trace elements in scalp hair of a young urban population in Brazil. *Biological Trace Element Research*, 2011, vol. 143, Iss. 2, pp. 815–824.
- Bohrer D., Schmidt M., Marques Rejane C., Dorea José G. Distribution of aluminum in hair of Brazilian infants and correlation to aluminum-adjuvanted vaccine exposure. *Clinica Chimica Acta*, 2014, vol. 428, pp. 9–13.
- Barbieri E., Fontúrbel Francisco E., Herbas C., Barbieri Flavia L., Gardon J. Indoor metallic pollution and children exposure in a mining city. *Science of the Total Environment*, 2014, vol. 487, pp. 13–19.
- Pan Y., Li H. Trace elements in scalp hair from potentially exposed individuals in the vicinity of the Bayan Obo mine in Baotou, China. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 2015, vol. 40, pp. 678–685.
- Rodushkin I., Axelsson M.D. Application of double focusing sector field ICP-MS for multielemental characterization of human hair and nails. Part II. A study of the inhabitants of northern Sweden. *Science of the Total Environment*, 2000, vol. 262, pp. 21–36.
- Molina-Villalba I., Lacasaca M., Rodriguez-Barranco M., Hernandez A.F., Gonzalez-Alzaga B., Aguilar-Garduco C., Gil F. Biomonitoring of arsenic, cadmium, lead, manganese and mercury in urine and hair of children living near mining and industrial areas. *Chemosphere*, 2015, vol. 124, pp. 83–91.
- Gil F., Hernandez A.F. Toxicological importance of human biomonitoring of metallic and metalloid elements in different biological samples. *Food and Chemical Toxicology*, 2015, vol. 80, pp. 287–297.
- Ryabukhin Y.S. *Activation analysis of hair as an indicator of contamination of man by environmental trace element pollutants*. Vienna, IAEA, 1978. PL/50. 135 p.
- Element analysis of biological materials. Current problems and techniques with special reference to trace elements. *Appendix II. Technical reports series*. No. 197. Vienna, IAEA, 1980. pp. 351–367.
- Rikhvanov L.P. *Obshchie i regionalnye problemy radioekologii* [General and regional problems of radioecology]. Tomsk, TPU Publ. house, 1997. 384 p.
- Rikhvanov L.P., Yazikov E.G., Baranovskaya N.V., Belyaeva A.M., Zhorniyak L.V., Talovskaya A.V., Denisova O.A., Sukhikh Yu.I. Sostoyanie komponentov prirodnoy sredy Tomskoy oblasti po dannym ekologo-geokhimicheskogo monitoringa i zdorove naseleniya [State of environmental components of Tomsk region according to ecological-geochemical monitoring and population health]. *Bezopasnost zhiznedeyatelnosti*, 2008, no. 1, pp. 29–37.
- Boyarkina A.P., Baykovsky V.V., Vasilev N.V. *Aerizoli v prirodnykh planshetakh Sibiri* [Aerosols in natural plates of Siberia]. Tomsk, Tomsk University Press, 1993. 157 p.
- Shatilov A.Yu. *Veshchestvennyy sostav i geokhimicheskaya kharakteristika pylevykh atmosferykh vypadeniy na territorii Obsskogo basseyna*. Avtoref. Dis. Kand. nauk [Material composition and geochemical characteristics of atmospheric deposition of dust on the territory of the Ob basin. Cand. Dis. Abstract]. Tomsk, 2001. 23 p.
- Baranovskaya N.V., Ignatova T.N., Rikhvanov L.P. Uranium and thorium in human organs and tissues. *Tomsk State University Journal, Earth Science Series*, 2010, no. 339, pp. 182–188. In Rus.
- Yazikov E.G., Goleva R.V., Rikhvanov L.P. Mineralogo-geokhimicheskii sostav prirodno-tekhnogennoy sostavlyayushchey pochvy Tomskoy agropromyshlennoy aglomeratsii [Mineralogical and geochemical composition of natural and technogenic components of the soils of Tomsk Agricultural and Industrial Agglomeration]. *Contemporary Problems of Ecology*, 2006, no. 3, pp. 315–324.
- Zhuk L.I., Kist A.A. Human hair neutron activation analysis: analysis on population level and mapping. *Czechoslov. J. Phys.*, 1999, vol. 49, S. 1, pp. 339–346.
- Baranovskaya N.V. Soderzhanie Fe, Cr, Co, Sc, Hf v volosakh naseleniya Tomskoy oblasti [The content of Fe, Cr, Co, Sc, Hf in the hair of the Tomsk region population]. *Problemy geologii i geografii Sibiri: Tomsk State University Journal, Earth Science Series*, 2003, Appendix 3 (V), pp. 126–128.
- Baranovskaya N.V., Shvetsova D.V., Sudyko A.F. Regional specificity of the elemental composition of childrens hair living on the territory of Tomsk region. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2011, vol. 319, no. 1, pp. 212–220. In Rus.
- Talovskaya A.V. Geoekologicheskaya otsenka territorii Tomsk-Severskoy promyshlennoy aglomeratsii po rezul'tatam izucheniya pyleaerizolnykh vypadeniy [Geoecological estimation of the territory of Tomsk-Seversk industrial agglomeration as a result of studying the dust-aerosols fallout]. *Zapiski gornogo instituta. Poleznyie iskopaemyie Rossii i ikh osvoenie*, 2006, vol. 167, P. 2, pp. 128–131.
- Baranovskaya N.V. Zakonomernosti nakopleniya i raspredeleniya khimicheskikh elementov v organizmakh prirodnykh i prirodno-antropogennykh ekosistem. Avtoref. Dis. Dokt. Nauk [Regularities of accumulation and distribution of chemical elements in the organism of natural and natural-anthropogenic ecosystems. Dr. Diss. Abstratc]. Tomsk, 2011. 46 p.
- Tsirkon-ilmenitovye rossypnye mestorozhdeniya – kak potentsialnyy istochnik razvitiya Zapadno-Sibirskogo regiona*. [Zircon-ilmenite placer deposits as a potential source of development of the West Siberian region]. Ed. by E.N. Tribunsky. Kemerovo, Sars Publ., 2001. 217 p.
- Ekologiya Severnogo promyshlennogo uzla g. Tomsk. Problemy i resheniya* [Ecology of the Northern industrial junction of Tomsk. Problems and solutions]. Ed. by A.M. Adam. Tomsk, Tomsk State University Press, 1994. 260 p.

Received: 9 June 2016.

## Information about the authors

**Dina V. Narkovich**, Cand. Sc., senior lector, National Research Tomsk Polytechnic University.

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

**Elena V. Koval**, graduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Natalia P. Korogod**, Cand. Sc., associate professor, Pavlodar State Pedagogical Institute.



**Компьютерная верстка** *О.Ю. Аршинова*  
**Корректурa** *Д.В. Заремба*  
**Перевод на английский язык** *С.В. Жаркова*  
**Дизайн обложки** *Т.В. Буланова*

Фотографии на обложке взяты из личного архива  
*Валерия Касаткина*

Руководство для авторов и образец оформления статьи: [izvestiya.tpu.ru](http://izvestiya.tpu.ru)

Подписано к печати 30.08.2016. Формат 60x84/8. Бумага «Снегурочка».  
Печать XEROX. Усл. печ. л. 15,01. Уч.-изд. л. 13,57.  
Заказ 328-16. Тираж 500 экз.



**Издательство**

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ