

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, № 2, 2016

ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ

г. Томск

**ИЗВЕСТИЯ  
ТОМСКОГО  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО  
УНИВЕРСИТЕТА.  
ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ**

**Редакционная коллегия**

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

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

Подписной индекс по каталогу агентства «Роспечать» – 18054

© ФГАОУ ВО НИ ТПУ, 2016

**УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!**

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

Учредителем является Томский политехнический университет.

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

ISSN 2413-1830

Импакт-фактор РИНЦ 2013 – 0,217

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

Журнал представляет интерес для геологов, химиков, технологов, физиков, экологов, энергетиков, специалистов по хранению и транспортировке георесурсов, 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
- 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, № 2, 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. (Turkey)  
Muravyov S.V., Dr. Sc. (Russia)  
Spitsyn V.G., Dr. Sc. (Russia)  
Kiryanova L.G., managing editor, Cand. Sc. (Russia)  
Glazyrin A.S., managing editor, Cand. Sc. (Russia)

© Tomsk Polytechnic University, 2016

**AIMS AND SCOPES**

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

The journal was founded in 1903.

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

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

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

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

- Geo Assets Exploration and Refining;
- Geo Assets Mining;
- Geo Assets Transportation;
- Geo Assets Deep processing;
- Energy-efficient production and conversion of energy based on Geo Assets;
- Safe disposal of Geo Assets;
- 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

## CONTENTS

- Минеральные формы редких элементов в углях и золах углей Азейского месторождения Иркутского угольного бассейна**  
Ильенок С.С., Арбузов С.И. 6  
**Имитационная модель процесса изменения работоспособности измельчительного оборудования**  
Баласанян С.Ш., Геворгян Э.М. 21  
**Применение нейросетевых алгоритмов для решения задачи восстановления двумерных геополей**  
Каковкин П.А., Друки А.А. 35  
**Новые данные о благороднометалльной минерализации Кингашского ультрамафитового массива (северо-запад Восточного Саяна)**  
Юричев А.Н., Чернышов А.И., Кульков А.С. 44  
**Полициклические ароматические углеводороды в твердом осадке и легколетучие органические соединения в фильтрате снежного покрова Братска**  
Янченко Н.И., Бельх Л.И., Слущкий С.Л., Ланько А.В. 52  
**Расчет и анализ триггерного эффекта приливных сил на наиболее крупные землетрясения**  
Чубаров Д.Л., Кочнев В.А. 59  
**Реологическая и геотермическая характеристики Охотморского плюма**  
Петрищевский А.М. 65  
**Запасание энергии нанопорошком алюминия в напряженно-деформированном состоянии кристаллической решетки**  
Мостовщиков А.В., Ильин А.П., Захарова М.А. 77  
**Использование глинистых материалов для создания барьера безопасности выводимого из эксплуатации реактора АД**  
Чубреев Д.О., Кузнецов Г.В. 83  
**Закономерности распределения химических элементов в вертикальном профиле донных отложений слабoproточных водоемов Томского района**  
Иванов А.Ю. 88  
**Физические основы неразрушающего контроля изоляции обмоток электроприводов горношахтного и нефтепромышленного оборудования**  
Смирнов Г.В., Смирнов Д.Г. 102  
**Локализация карбонатных платформ в ордовикских образованиях Западно-Сибирской геосинеклизы**  
Ковешников А.Е., Конторович В.А., Макаренко С.Н., Татынин Г.М. 117  
**Разрешимость краевых задач, описывающих диффузию атомов пленки в подстилающей поверхности при образовании тонкопленочных структур**  
Тарасенко Е.О., Гладков А.В., Маликова Н.В. 125  
**Экспериментальное исследование и расчет магнитного поля электромагнита постоянного тока с расщепленными полюсами и полюсными наконечниками в комплексе программ Elcut**  
Татевосян А.С., Татевосян А.А., Захарова Н.В., Шелковников С.В., Шелковникова Ю.В. 133
- Mineral modes of rare elements in coals and ashes of coals of Azey deposit in Irkutsk coal basin**  
Ilenok S.S., Arbuzov S.I. 6  
**Simulation model of changing working capacity of grinding equipment**  
Balasanyan S.Sh., Gevorgyan H.M. 21  
**Application of artificial neural networks for solving the problem of two-dimensional geofields reconstruction**  
Kakovkin P.A., Druki A.A. 35  
**New data about noble-metal mineralization of Kingashsky ultramafic massif (Northwest of Eastern Sayan)**  
Yurichev A.N., Chernyshov A.I., Kulkov A.S. 44  
**Polycyclic aromatic hydrocarbons in solid residue and volatile organic compounds in snow cover filtrate of Bratsk**  
Yanchenko N.I., Belykh L.I., Slutsky S.L., Lanko A.V. 52  
**Calculation and analysis of tidal forces trigger effect on the greatest earthquakes**  
Chubarov D.L., Kochnev V.A. 59  
**Rheological and geothermal features of the Okhotsk Sea Plume**  
Petrishchevsky A.M. 65  
**Energy storage in aluminum nanopowder in stress-strain state of crystal lattice**  
Mostovshchikov A.V., Ilyin A.P., Zakharova M.A. 77  
**Using clay materials for developing safety barrier of decommissioning AD reactor**  
Chubreev D.O., Kuznetsov G.V. 83  
**Regularities of chemical elements distribution in vertical profile of bottom sediments in low flow water reservoirs in Tomsk region**  
Ivanov A.Yu. 88  
**Physical basis of non-destructive testing of winding insulation in electric drives of mining and oilfield equipment**  
Smirnov G.V., Smirnov D.G. 102  
**Localization of carbonate platforms in ordovician formations of west-siberian geosyncline**  
Koveshnikov A.E., Kontorovich V.A., Makarenko S.N., Tatyani G.M. 117  
**Resolvability of boundary problems describing film atom diffusion in underlying surface at formation of thin-film structures**  
Tarasenko E.O., Gladkov A.V., Malikova N.V. 125  
**Experimental investigation and calculation of magnetic field of DC electromagnet with split poles and pole pieces in the software complex ELCUT**  
Tatevosyan A.S., Tatevosyan A.A., Zakharova N.V., Shelkovnikov V.S., Shelkovnikova Yu.V. 133

УДК 552.57, 552.52

## МИНЕРАЛЬНЫЕ ФОРМЫ РЕДКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В УГЛЯХ И ЗОЛАХ УГЛЕЙ АЗЕЙСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ИРКУТСКОГО УГОЛЬНОГО БАССЕЙНА

**Ильенок Сергей Сергеевич,**

ассистент кафедры геоэкологии и геохимии  
Национального исследовательского Томского политехнического университета,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: ilenokss@rambler.ru

**Арбузов Сергей Иванович,**

доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры геоэкологии  
и геохимии Национального исследовательского Томского политехнического  
университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.  
E-mail: siarbuzzov@mail.ru

**Актуальность работы** обусловлена необходимостью получения новых данных о редкометалльном потенциале углей Азейского месторождения и разработки методик по изучению форм нахождения элементов в углях и отходах углесжигания, а также возможностью последующей разработки методик по извлечению редких элементов из углей и отходов углесжигания.

**Цель работы:** изучение минеральных форм нахождения редких элементов в углях, золах углей и породных прослоях в угольных пластах Азейского месторождения; демонстрация того, что угли содержат множество минеральных микровключений, богатых редкими элементами.

**Методы исследования:** озоление проб при  $800 \pm 15$  °С с определением зольности в соответствии с ГОСТ 11022–95; сканирующая электронная микроскопия с применением микроскопа Hitachi S-3400N с энергодисперсионным спектрометром Bruker XFlash 4010 для проведения полуколичественного рентгеноспектрального анализа.

**Результаты** свидетельствуют о том, что редкометалльная минералогия углей Азейского месторождения весьма богата. Детальное изучение углей пласта II позволило выявить как распространенные для углей минералы (циркон, монацит, и т. д.), так и совершенно уникальные, такие как Si-Al-Na-Ca-Zr-Sc-Ti-V-Fe-O (пангит?). Выявлена специфическая особенность редкоземельной минерализации углей Азейского месторождения – преобладающей минеральной формой легких лантаноидов являются фторкарбонаты (бастнезит?), имеющие аутигенное происхождение. На контакте с тонштейном выявлено большое количество фосфатов редких земель и кристаллов бадделеита. Оксиды и силикаты урана выявлены как в угле, так и в тонштейне. Во всех урановых минералах установлена примесь циркония (< 5 %). Ториевая минерализация представлена фосфатами редких земель.

### **Ключевые слова:**

Уголь, зола угля, тонштейны, редкие элементы, формы нахождения, сканирующая электронная микроскопия.

### **Введение**

В настоящее время в мировой практике угольные месторождения все чаще рассматриваются не только как топливно-энергетическое сырьё, но и в качестве перспективного источника большой группы редких, рассеянных и благородных металлов [1–3 и др.].

В многочисленных публикациях показано, что отходы использования углей могут содержать высокие, в отдельных случаях промышленно значимые концентрации элементов-примесей [4–6 и др.].

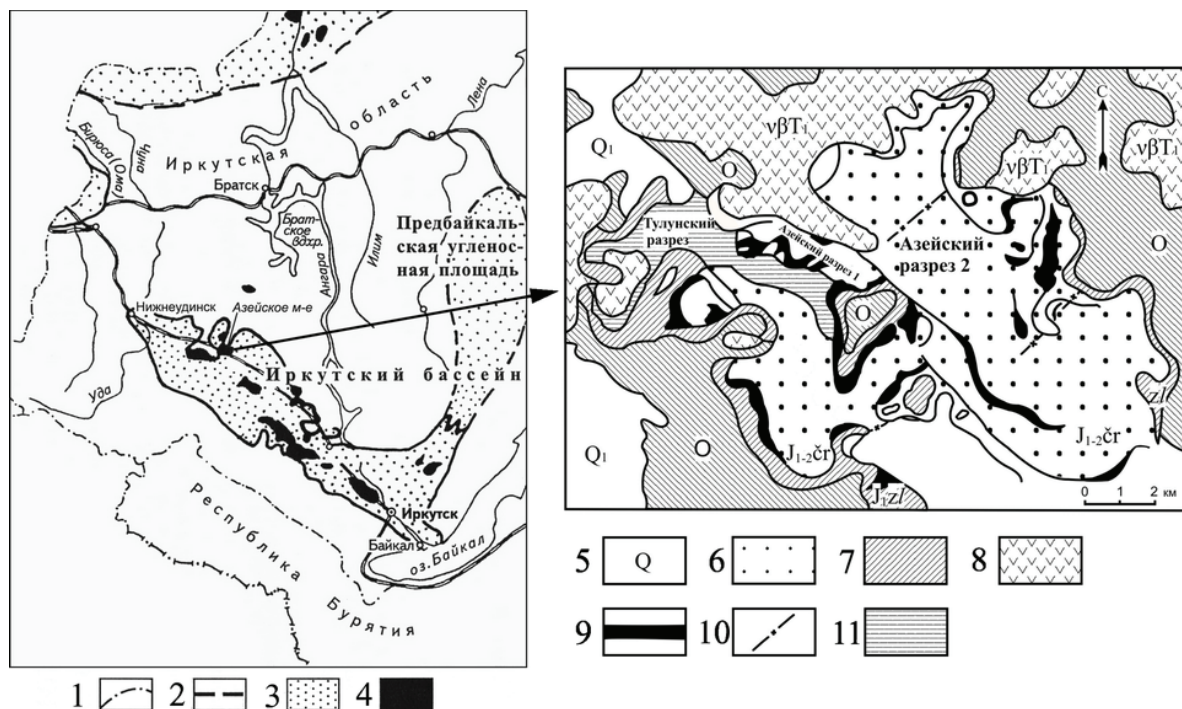
С середины прошлого столетия предпринимаются попытки извлечения из углей и углеотходов отдельных химических элементов (U, Ge, Au, Al, Ga, Sc). Однако эффективность их не столь высока, отчасти из-за недостатка информации о формах нахождения этих элементов в углях и отходах углесжигания. Поскольку знание о формах нахождения является одним из основных факторов, определяющих технологию извлечения, главной задачей данных исследований является поиск и определение минеральных форм элементов в угле и золе угля.

Согласно классификации [7, 8] к редким элементам относятся: Li, Rb, Cs, Be, Sr, Cd, Sc, Ga, Bi, Y, In, REE, Tl, Ge, Zr, Hf, V, Ta, Se, Te, Re.

Для изучения форм нахождения редких элементов в углях применяются разнообразные методы. В данной работе для изучения минеральных форм нахождения использован метод электронной микроскопии. Основное его преимущество – высокая разрешающая способность, что позволяет распознавать минеральные частицы размером до десятков нанометров. Использование энергодисперсионного спектрометра (ЭДС) дает возможность провести количественный рентгеноспектральный анализ их состава [3, 4].

### **Характеристика объекта исследований**

Объектом исследований является Азейское месторождение Иркутского угольного бассейна (рис. 1). Месторождение приурочено к эрозионно-тектонической депрессии в палеозойских отложениях. Угли месторождения – зрелые бурые марки ЗБ. Запасы месторождения по категориям А+В+С<sub>1</sub> на 2002 г. оценивались в 362,6 млн т [9]. Угли месторождения характеризуются повышенными содержаниями группы литофильных редких элементов (Lu, Yb, Sm, Eu, La, Ce, Nd, Th, Hf, Sc, Ta) относительно среднего содержания в бурых углях мира [10].



**Рис. 1.** Обзорная карта Иркутского угольного бассейна и схема Азейского месторождения [9]: 1 – границы субъектов Федерации; 2 – контуры угольных бассейнов; 3 – угольные бассейны и угленосные площади; 4 – основные угольные месторождения и районы; 5 – четвертичные отложения; 6 – Черемховская свита; 7 – Заларинская свита; 8 – трапы; 9 – выходы угольных пластов; 10 – границы областей; 11 – отработанные участки

**Fig. 1.** Location map of Irkutsk coal basin [9] and the map of Azeyskoye deposit: 1 are the borders of subjects of federation; 2 are the contours of coal basins; 3 are the coal basins and coalfields; 4 are the main coal basins and areas; 5 are the quaternary deposits; 6 is Cheremkhovskaya suite; 7 is Zalarinskaya suite; 8 are the traps; 9 are the outcrops of coal seams; 10 are the boundaries of areas; 11 are the worked-out territories

### Методика исследований

Угли Азейского месторождения опробовались бороздовым методом, вкрест простирания угольных пластов по направлению от кровли к почве. Интервал опробования варьировал от 0,5 до 2 м. При детальном изучении изменчивости распределения элементов, особенно в контактовых зонах, размер секции уменьшался вплоть до 2 см (рис. 2). Вес исходной геохимической пробы составлял 0,5–1,5 кг. Из каждой пробы отбирался образец угля для электронно-микроскопического изучения форм нахождения элементов-примесей.

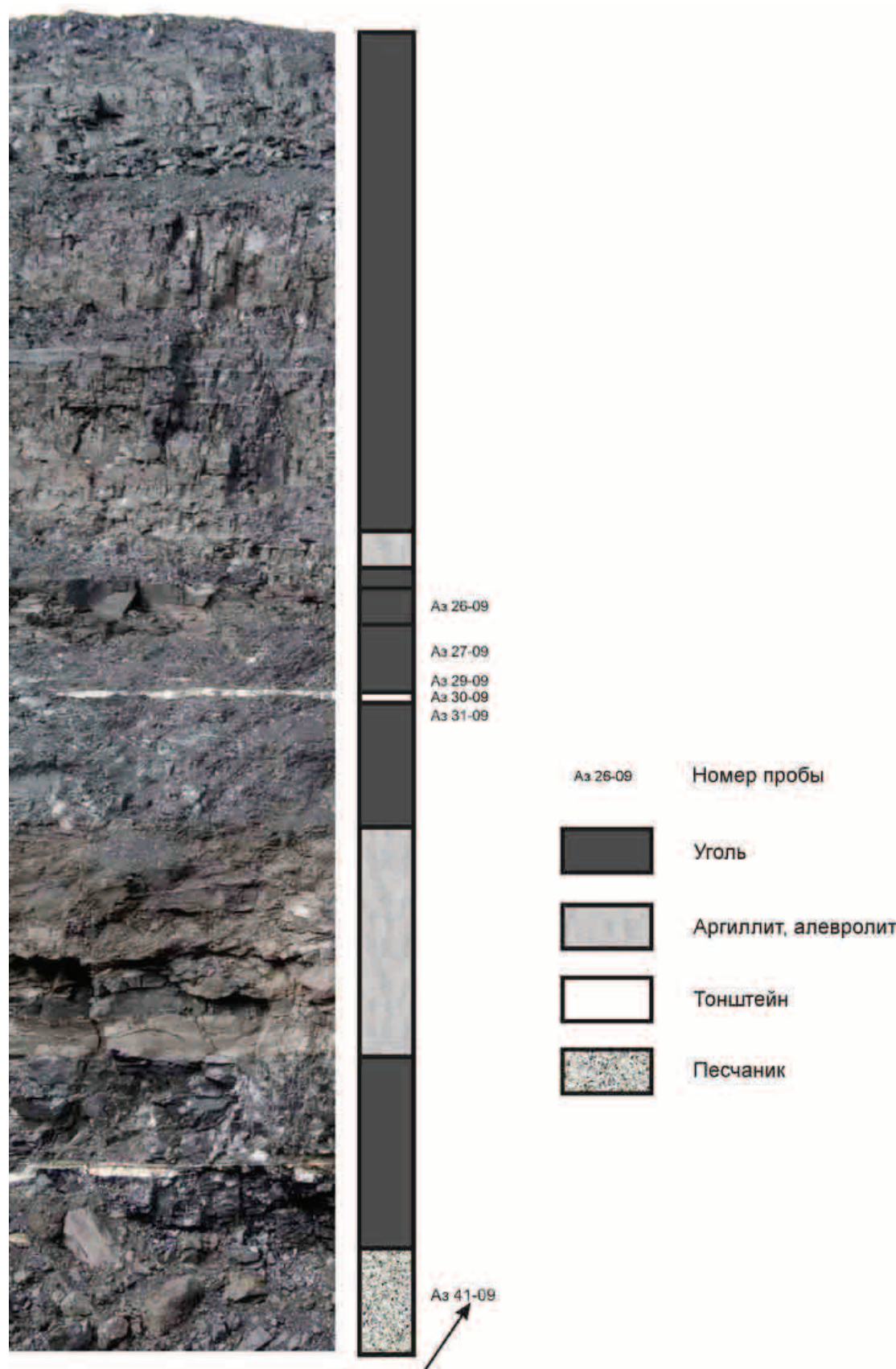
Озоление проб с определением зольности проводилось при  $800 \pm 15$  °С в соответствии с ГОСТ 11022–95 в научно-исследовательской лаборатории по комплексному использованию горючих ископаемых НИ ТПУ (исполнитель – С.Г. Маслов).

Изучение минеральных форм элементов в углях и золах углей на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) Hitachi S-3400N с ЭДС Bruker XFlash 4010 для проведения рентгеноспектрального анализа проводилось в МИНОЦ «Урановая геология» при кафедре геоэкологии и геохимии ТПУ. Исследование проб проводилось в режиме низкого вакуума с детектором обратно-рассеянных

электронов. Определение состава отдельных минералов выполнено с использованием ЭДС.

Отбор проб для изготовления образцов и последующего электронно-микроскопического исследования проводился на основании результатов нейтронно-активационного анализа. Из массива изученных проб было выбрано 6 образцов. Главным критерием отбора было аномальное содержание редких элементов. Подготавливались следующие разновидности препаратов:

- угольный образец, залитый эпоксидной смолой (пашка), отполированный с применением алмазных паст (до 0,01 мм) и напылённый углеродом для предотвращения накопления заряда на поверхности образца;
- зола, цементированная эпоксидной смолой, отполированная с применением алмазных паст (до 0,01 мм), напылённая углеродом;
- угольная пыль (уголь, истёртый до 0,074 мкм), нанесённая на углеродный скотч и обработанная сжатым газом для предотвращения загрязнения колонны микроскопа, напылённая углеродом;
- зола угля, нанесённая на углеродный скотч, обработанная сжатым газом, напылённая углеродом.



**Рис. 2.** Схема расположения исследованных образцов в разрезе пласта II

**Fig. 2.** Scheme of the studied samples arrangement in the II seam section



**Таблица.** Элементный состав углей и тонштейнов пласта II Азейского месторождения

**Table.** Element composition of coals and tonsteins of the seam II of Azey deposit

Код/Code	Порода/Rock	Ad	Sc	La	Ce	Nd	Sm	Eu	Tb	Yb	Lu	Hf	Th	U
Аз-26-09	Тонштейн/Tonstein	–	42,3	47,4	72,6	82,7	7,8	2,3	1,6	3,6	0,5	1,6	5,9	1,5
Аз-27-09	Уголь/Coal	8,3	19,6	8,5	16,4	2,1	2,8	0,8	0,8	2,5	0,4	1,9	3,9	1,4
Аз-29-09	Уголь/Coal	9,9	13,3	34,5	60,0	27,7	5,5	1,3	0,9	2,4	0,3	7,6	16	3,5
Аз-30-09	Тонштейн/Tonstein	68,5	10,1	73,4	128	47,7	11,5	2,1	1,4	1,8	0,2	5,0	11,1	3,2
Аз-31-09	Уголь/Coal	6,6	14,3	13,9	25,9	10,1	3,0	0,8	0,7	2,4	0,3	6,6	12,7	3,8
Аз-41-09	Уголь/Coal	14,3	41,5	81,9	137	69,4	12,5	3,1	2,1	5,3	0,7	3,4	15,7	2,6

Примечание:  $A^d$  – зольность сухой массы угля, %.

Note:  $A^d$  is the ash content of coal dry solid matter, %.

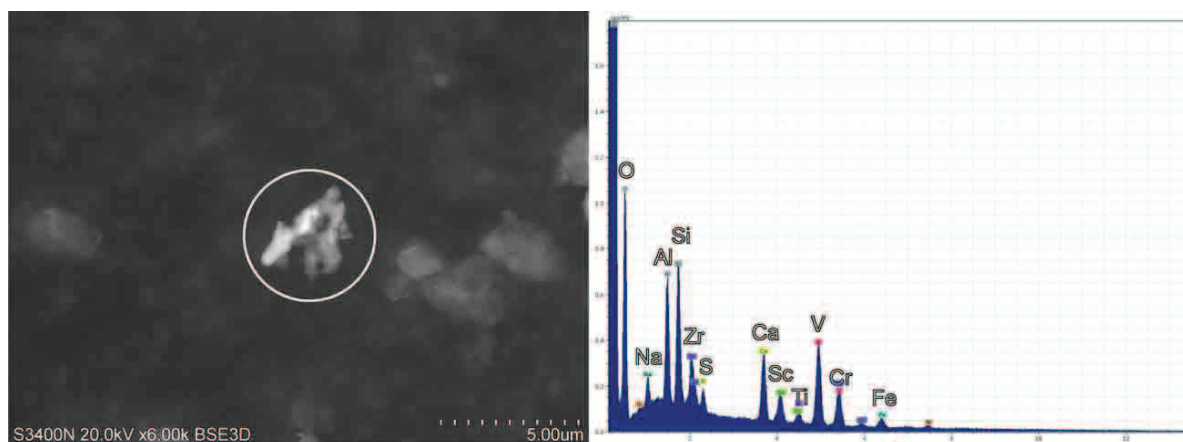
### Формы нахождения редких металлов в углях и золе углей

В процессе изучения минеральных форм редких элементов в углях было выявлено значительное количество минералов. Редкометалльная минерализация представлена главным образом циркониевыми (циркон, бадделейт) и редкоземельными (бастнезит, монацит) микровключениями. Также обнаружены уникальные редкометалльные минералы необычного состава, такие как Si-Al-Na-Ca-Zr-Sc-Ti-V-Fe-O.

**Скандий.** По формам нахождения скандия в углях Азейского месторождения опубликовано несколько работ [11, 18, 19]. Крюкова и др. [11] показали, что после выделения из угля фракции гуминовых веществ около 90 % от общего количества элемента, содержащегося в исходной пробе, концентрируется в остаточной фракции. В обзорных статьях, посвященных геохимии и формам нахождения скандия в углях Северной Азии [12–19], рассматриваются геохимия, соотношение минеральных и органических форм его нахождения в углях региона, в том числе приведены некоторые сведения о формах скандия в углях Азейского месторождения. В целом отмечено преобладание органической формы нахождения скандия в углях. Самостоятельных минеральных форм скандия, исходя из литературных данных, в углях до сих пор не обнаружено.

В углях Азейского месторождения методом сканирующей электронной микроскопии выявлено одно зерно Sc-содержащего минерала. Состав частицы: Si-Al-Na-Ca-Zr-Sc-Ti-V-Fe-O (~2 % Sc), размер ~4 мкм (рис. 3). Содержание скандия в этой пробе угля составляет 13,3 г/т, что втрое превышает кларк для бурых углей [10]. Находка микрофазы подобного состава в золе угля описана нами ранее [20, 21]. Существуют два минерала, схожих по химическому составу с изученным зерном: пангит (panguite,  $(Ti,Zr,Si,Sc,Al,Y,V,Cr,Mg,Ca,Fe)_3O_3$ ) [22] и кангит (kanguite,  $(Sc,Ti,Al,Zr,Mg,Ca)_2O_3$ ) [23]. Оба минерала были обнаружены только в углеродистом метеорите Альенде (Allende), упавшем в 1969 г. Эти минералы были сравнительно недавно зарегистрированы в международной минералогической ассоциации – в 2010 и 2011 гг. соответственно. Происхождение пангита и кангита считается исключительно космическим. Зерно, обнаруженное в угле Азейского месторождения, по видимому, является аутигенным. На это указывает специфичная неправильная форма частицы, характерная для минеральных фаз, сформированных *in situ*.

**Стронций.** Согласно [10], среднее содержание стронция для бурых углей оценивается величиной 120 г/т. В изученных углях содержание стронция ниже предела обнаружения нейтронно-актива-



**Рис. 3.** Частица сложного элементного состава в угольной пыли Азейского месторождения

**Fig. 3.** A particle of complex element composition in coal dust of Azey deposit

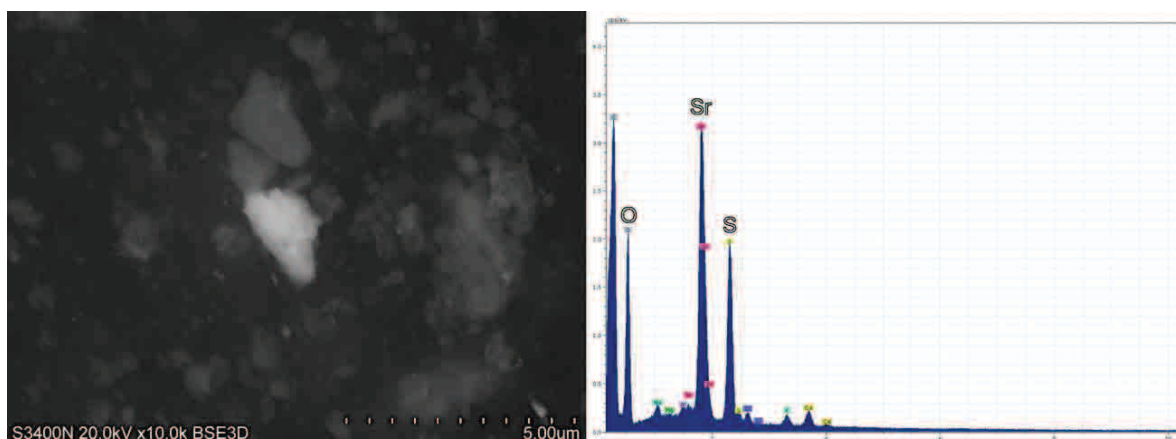


Рис. 4. Зерно целестина в золе угля Азейского месторождения

Fig. 4. Tselestin grain in ash of coal of Azey deposit

ционного анализа, однако при электронно-микроскопических исследованиях выявлено несколько минеральных фаз, содержащих стронций.

Главным образом он обнаружен в составе сульфатов стронция (Sr-S-O, предположительно целестин). Зёрна целестина выявлены исключительно в тонштейнах и в золе углей в непосредственном контакте с тонштейнами (рис. 4). Размер частиц в среднем около 2,5 мкм, максимальный размер составляет 4 мкм. Обогащение приконтактных зон стронцием описано в ряде работ Я.Э. Юдовича [24–26].

Двухпроцентная примесь Sr выявлена в зернах барита (рис. 5). Малочисленные включения Sr-барита установлены в окисленном угле и углистой породе (тонштейне). Форма выделений разнообразна, от микровключений неправильной формы (~2 мкм) до хорошо огранённых кристаллов размером ~6 мкм.

Аналогичные данные получены ранее Р.Б. Финкельманом [27], обнаружившим крандаллит, Sr-барит и целестин в американских углях.

Обогащение угля целестином вблизи тонштейна, вероятно, является следствием разрушения кислой пирокластики, а находки барита в различных участках угольного пласта вне связи с тонштейном являются следствием обогащения торфяника водами из области сноса и последующего образования аутигенной минерализации.

**Цирконий и гафний.** Самыми распространенными минералами циркония в угле считается силикат циркония – циркон [27–30 и др.]. В литературе также упоминаются единичные находки оксида циркония (бадделеита?) [30–32]. Следовые содержания циркония были выявлены в анатазе китайскими учеными [30]. Гафний является геохимическим аналогом циркония, поэтому предполагается, что минералами-носителями гафния также являются циркон и бадделеит [6].

Электронно-микроскопическое изучение образцов из Азейского месторождения показало, что в изученных углях циркониевая минерализация представлена преимущественно цирконом и бадделеитом (?). Примесь циркония (<5 %) встречается

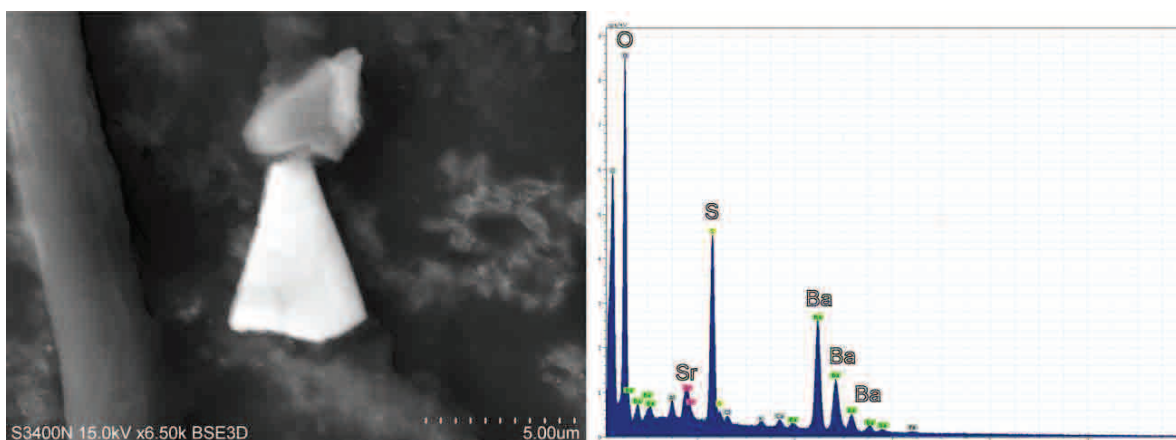


Рис. 5. Зерно барита с примесью Sr в золе угля Азейского месторождения

Fig. 5. Barite grain with Sr impurity in ash of coal of Azey deposit

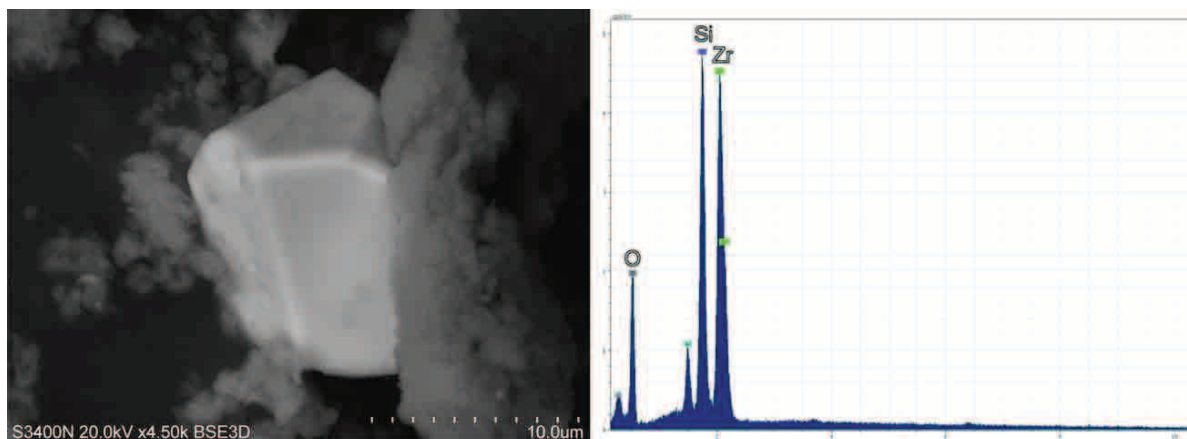


Рис. 6. Кристалл циркона с хорошо выраженными гранями в золе угля Азейского месторождения

Fig. 6. Zirconium crystal with well-marked edges in ash of coal of Azey deposit

во всех урановых минералах, обнаруженных в углях месторождения (см. Уран), а также отмечена в составе частицы сложного поликомпонентного состава (см. Скандий).

Кристаллы циркона выявлены в тонштейне и в золе углей (рис. 6). Форма кристаллов в основном призматическая. Многие кристаллы имеют механические повреждения. Одной из причин их разрушения может быть пробоподготовка. Размер кристаллов, обнаруженных в тонштейне, в среднем составляет 20–40 мкм. Отдельные кристаллы достигают размеров ~60 мкм. Размер зёрен, установленных в золе угля, – 5–15 мкм. В образцах окисленного угля максимальный размер частиц достигает 45 мкм. Часто во включениях циркона диагностируется примесь Hf (~2 %).

Во многих кристаллах наблюдаются отпечатки включений других минералов, которые, вероятно,

выкрошились при шлифовке. Такие цирконы обнаружены как в тонштейне, так и в угле.

Отсутствие окатанности и коэффициент удлинения кристаллов циркона (менее 2) в тонштейнах Азейского месторождения свидетельствуют в пользу выводов о пирокластическом происхождении тонштейнов в связи с риолитовым вулканизмом [20, 21]. В пользу этого вывода также косвенно говорят и размеры включений – цирконы в тонштейне втрое крупнее цирконов в углях. Все кристаллы циркона в тонштейне имеют незначительные механические повреждения, располагаются в каолините. Цирконы в угле предположительно имеют аутигенное происхождение. Они довольно редко встречаются в неизмененном угле, но часто встречаются в природно-окисленном.

Среднее содержание гафния в углях пласта II – 1,6 г/т, что незначительно превышает кларк для

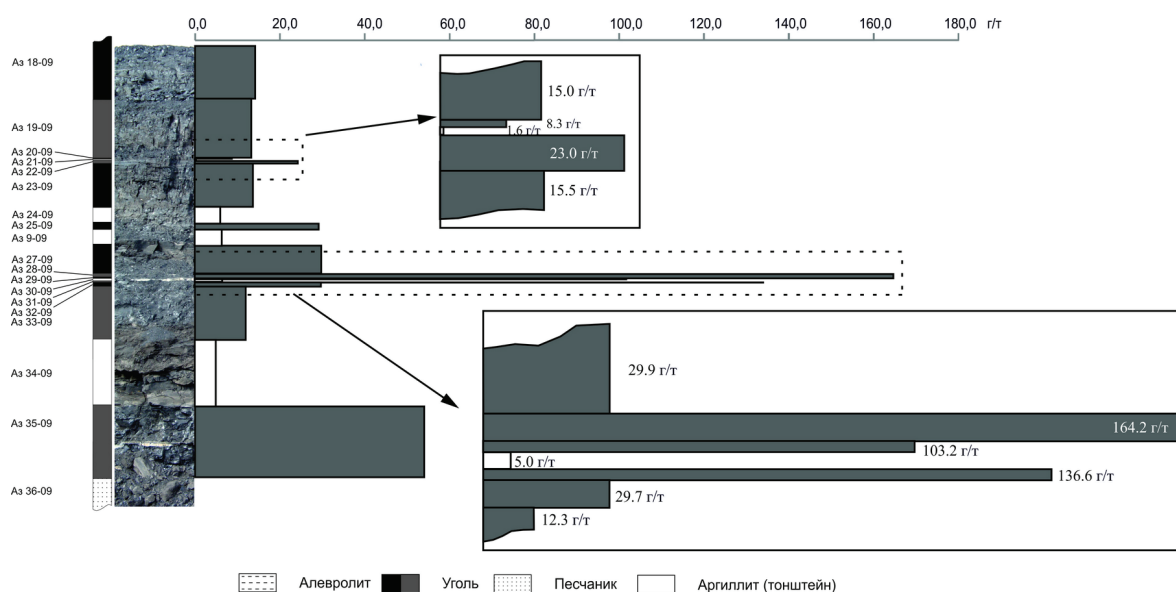


Рис. 7. Распределение гафния в золе угля в разрезе пласта II

Fig. 7. Hafnium distribution in coal ash in the II seam section

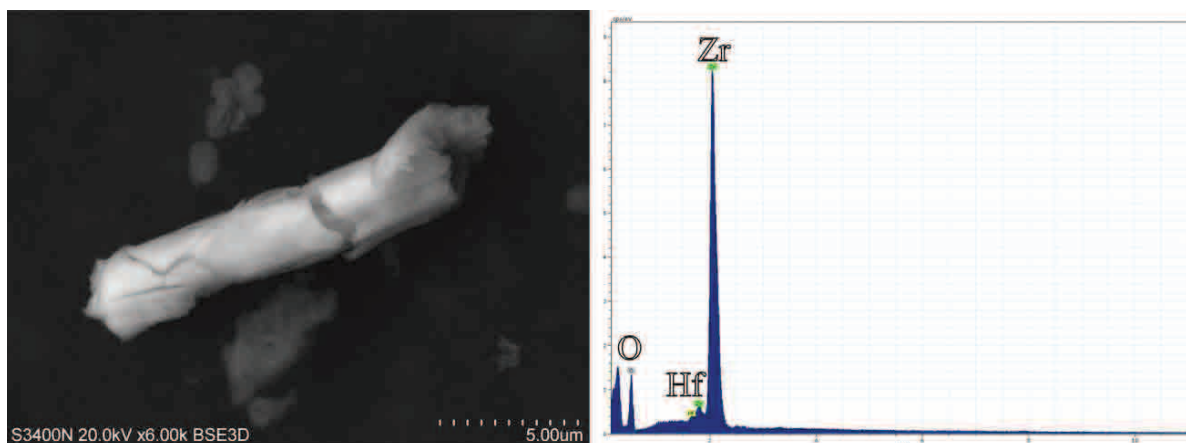


Рис. 8. Шестоватый кристалл бадделеита

Fig. 8. Sperry crystal of baddeleyite

бурых углей, который составляет 1,2 г/т [10]. Однако наблюдается значительное обогащение гафнием углей на контакте с тонштейном (рис. 7), где его содержание достигает 7,6 г/т. При низкой зольности угля на этом участке ( $A^a < 5\%$ ) содержание гафния в золе превышает 160 г/т.

Электронно-микроскопическое изучение углей в притонштейновой зоне показало наличие значительного количества оксидов циркония (бадделеита?), содержащих ~2 % примеси гафния. Эти находки вполне объясняют гафниевую аномалию на контакте с тонштейном. Примесь гафния обнаружена и в цирконах, но в изученных пробах цирконы представлены лишь единичными включениями. Исключение составляет окисленный уголь, в котором обнаружено повышенное по сравнению с неизменным углем количество циркона. С участками окисленных углей связана еще одна гафниевая аномалия.

Кристаллы оксида циркония длиннопризматические, шестоватые, таблитчатые, реже призматические и волокнистые (рис. 8). Встречаются еди-

ничные кристаллы неправильной формы. Вероятно, обогащение притонштейновых зон угля цирконием и гафнием связано с их выносом из тонштейна. Такое обогащение может быть следствием разрушения микрозёрен циркона либо других цирконийсодержащих минералов в агрессивной среде торфяника с последующим формированием аутигенных минералов. Обогащение притонштейновых зон гафнием наряду с цирконием упоминается в ряде работ [24, 33, 34 и др.].

Таким образом, основной минеральной формой нахождения циркония и гафния в изученных пробах угля, золы угля и тонштейнов является циркон ( $ZrSiO_4$ ) и бадделеит ( $ZrO_2$ ). При этом в притонштейновых зонах угольного пласта преобладающей минеральной формой является бадделеит.

**Висмут.** По минеральным формам нахождения висмута в углях существует крайне малое количество публикаций. Отчасти это может быть следствием того, что кларк висмута для бурых углей всего 0,84 г/т [10]. Поскольку висмут является элементом-халькофилом, можно предпо-

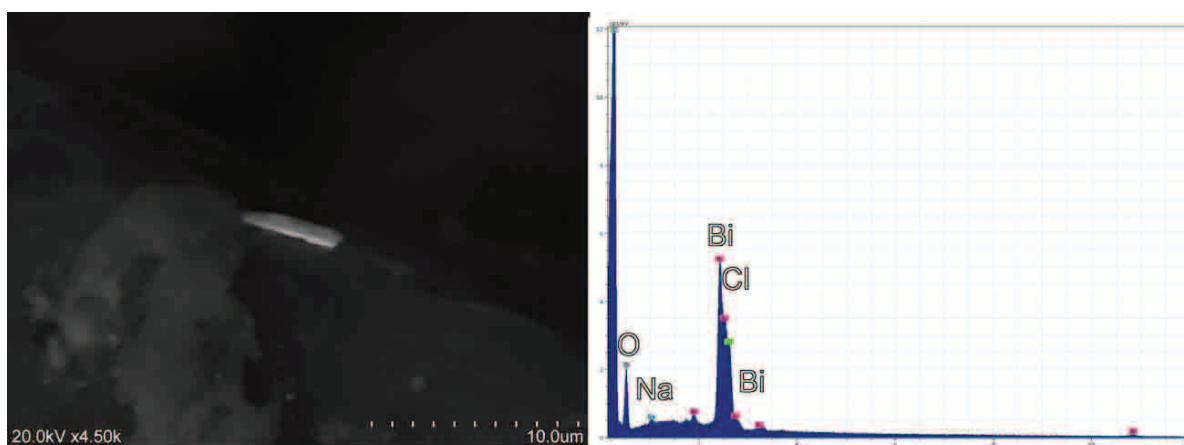


Рис. 9. Пластинчатое включение Bi-Cl-O-состава в породном прослое Азейского месторождения

Fig. 9. Lamellar inclusion of Bi-Cl-O composition in a rock interlayer of Azey deposit

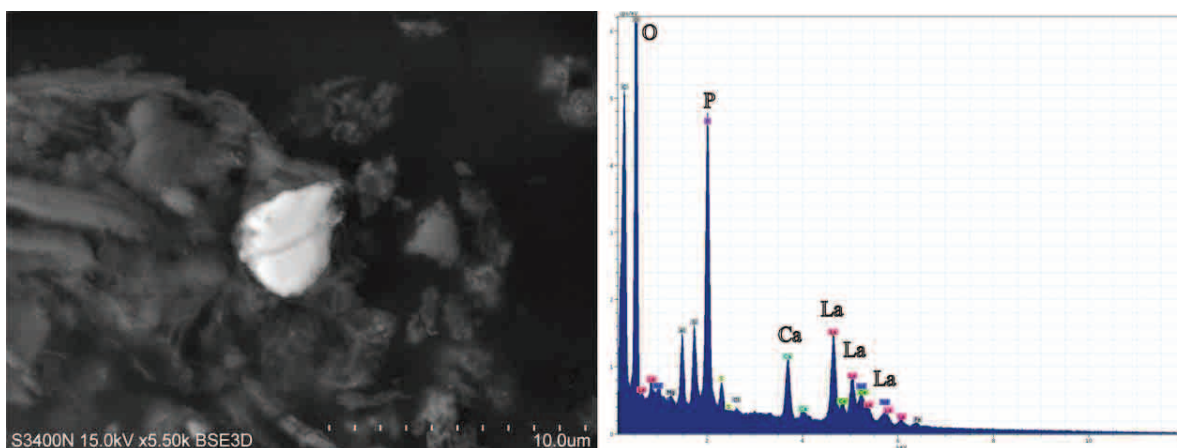


Рис. 10. Зерно лантанового монацита в аморфном алюмосиликатном веществе золы угля и его элементный состав

Fig. 10. La-monzite grain in amorphous Al-Si substance of coal ash and its element composition

жить, что и в углях основная форма висмута – сульфидная. В монографии Р.Б. Финкельмана [27] описывается находка одного зерна сульфида висмута, отмечена примесь висмута в зерне сфалерита и галенита.

Методом электронной микроскопии в Азейском месторождении выявлены единичные включения висмутовых минералов. Пластинчатые и чешуйчатые кристаллы Bi-Cl-O-состава (добреит?) обнаружены в окисленном угле, золе угля, а также в породном прослое (рис. 9) внутри угольного пласта. Содержание Bi в частице – 47 %, содержание Cl – 5 %. Размеры частиц – 3,5–5 мкм. Породный прослой сильно углефицирован, частица установлена в органической матрице, на сколе. Одно включение также установлено в органической массе в угле.

Известно, что добреит является продуктом разрушения (окисления) висмутита [35]. Можно предположить, что это аутигенный добреит, образовавшийся по висмутину. Не исключено, что добреит в золе сформировался в процессе сжигания угля. Угли Азейского месторождения являются малосернистыми. Это может быть причиной того, что сульфидной формы висмута не обнаружено.

**Редкоземельные элементы.** Исходя из литературных данных, самой распространённой минеральной формой нахождения лёгких лантаноидов в углях считаются фосфаты редких земель [27, 32, 36, 37 и др.]. В отличие от этого, в углях Азейского месторождения преобладают карбонаты редких земель. Фосфатами обогащены только угли непосредственно на контакте с тонштейнами, тогда как фтор-карбонаты обнаружены во всех изученных угольных пробах.

В угле притонштейновой зоны попадают участки, содержащие множество микроминеральных включений фосфатов редких земель (монацита?) размерностью ~0,5 мкм. Кроме того, попадают и частицы глинистых минералов (каолинит?), содержащие включения фосфатов редких земель (рис. 10). В золе угля монацит обнаружен

как в свободной форме (отдельные кристаллы и кристаллы в алюмосиликатной пленке), так и в глинистых минералах, что согласуется с упомянутыми ранее результатами изучения образцов угля. Примесь тория в монацитах составляет от 1 до 5,8 %. Единичные включения монацита обнаружены в тонштейне. Все частицы характеризуются неправильной формой.

Сумма легких редких земель (Ce, La, Nd) на контакте с тонштейном достигает 1,54 кг/т в золе угля (рис. 11).

Из диаграммы видно, что легкими лантаноидами в большей степени обогащены зоны над тонштейном, чем под ним. Особенностью угля над тонштейном является то, что в золе угля, помимо монацита (?), обнаружены фосфаты редких земель, обогащенные торием (до ~15 % Th) и кальцием (цералит?).

Лантановый монацит выявлен в золе окисленного угля (рис. 10). Располагается частица в алюмосиликатной матрице. Ее размер около 5 мкм.

Редкоземельные минералы фтор-карбонатного состава, диагностированные по составу как бастнезит [(Ce,La)(CO<sub>3</sub>)F], паризит [Ca(Ce,La)<sub>2</sub>(CO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>F<sub>3</sub>], а также не определенный карбонатный минерал (Ce-La-Fe-C-O), являются самой распространенной формой лёгких лантаноидов в бурых углях Азейского месторождения. Наличие фтор-карбонатов является специфической особенностью углей Азейского месторождения, поскольку в углях других месторождений Иркутского бассейна эти минералы обнаружены не были. Глобулярные включения фтор-карбонатов размером от 1 до 9 мкм выявлены во всех изученных пробах (рис. 12). Редко встречаются зёрна другой формы. Все частицы имеют извилистую, петельчатую поверхность. Во всех минералах присутствует от 3,0 до 8,5 % примеси Fe. Детальное картирование поверхности одного из сферических включений показало, что оксид железа заполняет полости между частицами фтор-карбонатов (является цементирующим). Не исключено участие микропор-

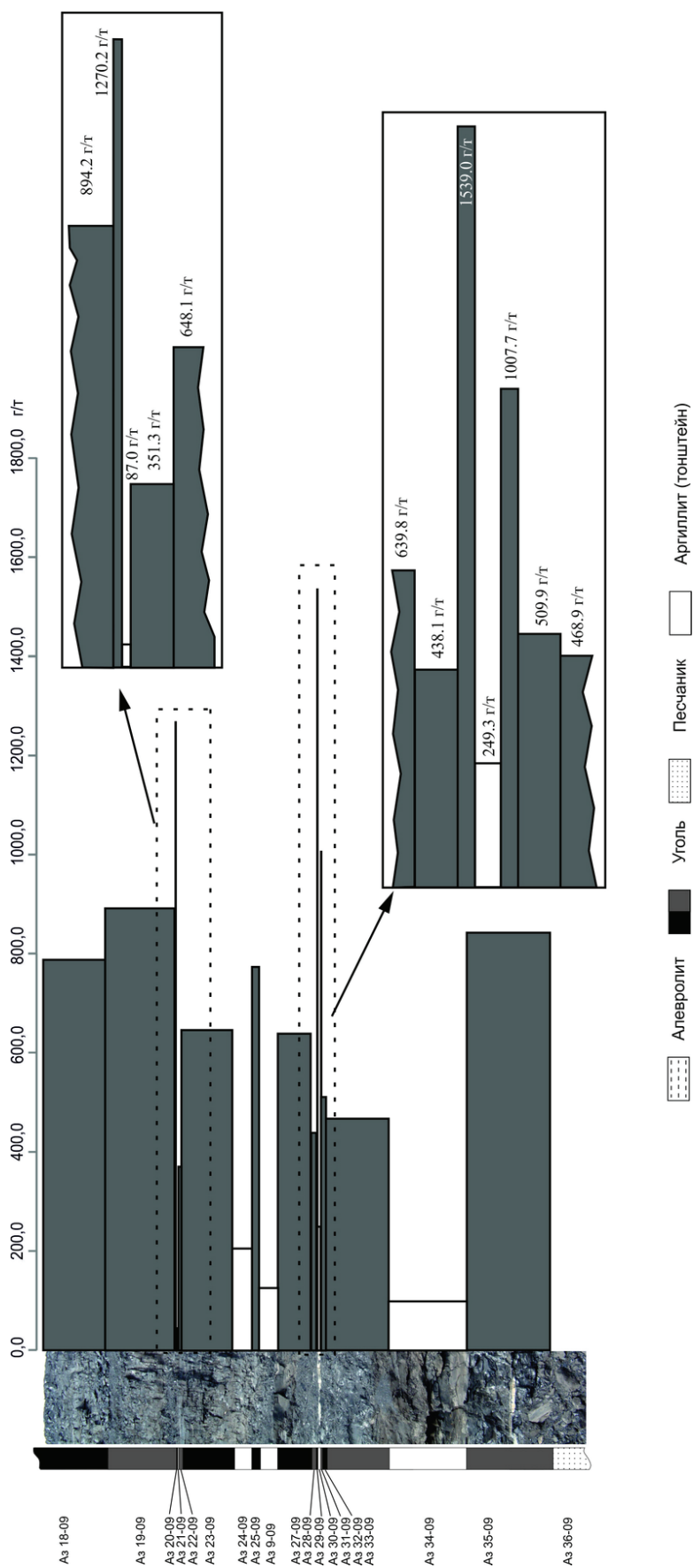
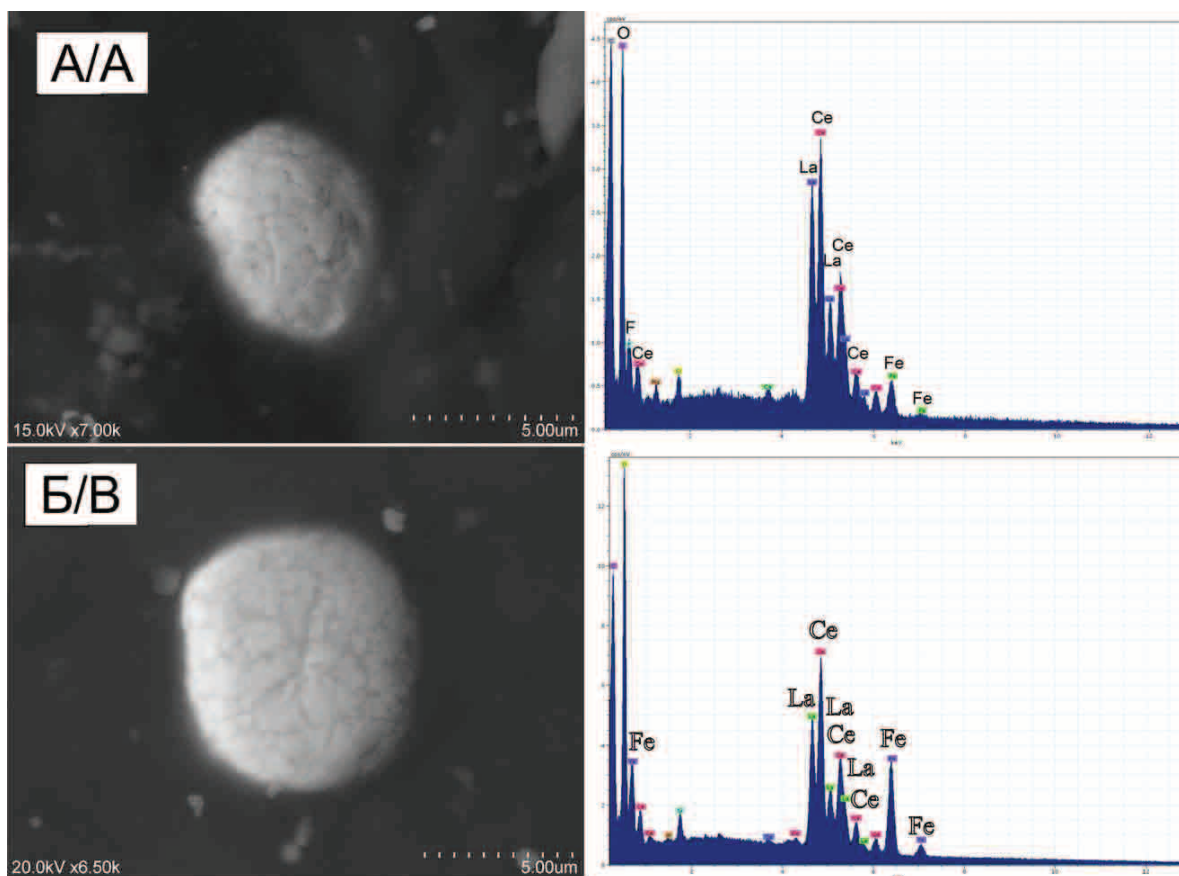


Рис. 11. Распределение суммы легких редкоземельных элементов (La, Ce, Nd) в золе угля в разрезе пласта II Азейского месторождения

Fig. 11. Distribution of light rare earth elements amount (La, Ce, Nd) in coal ash of coal seam section II of Azei deposit



**Рис. 12.** Редкоземельные минералы в угле Азейского месторождения: а) глобулярное включение бастнезита; б) глобулярное включение Ce-La-Fe-C-O-состава

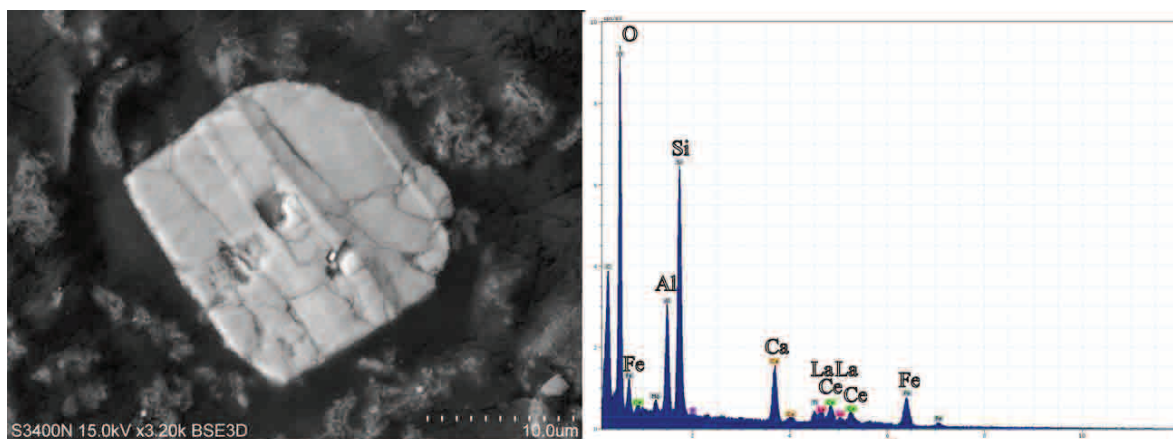
**Fig. 12.** Rare earth minerals in the coal of Azey deposit: a) globular inclusion of bastnaesite; b) globular inclusion of Ce-La-Fe-CO composition

ганизмов в образовании таких выделений. В статье [38] приводятся примеры структур, в том числе и сферических, образованных при участии микроорганизмов.

Зерно сложного состава (Al-Si-Fe-Ca-Ce-La-O) размером 17 мкм обнаружено в золе окисленного угля (рис. 13). В поперечном срезе зерна наблюда-

ется неоднородное строение. Вероятно, это объясняется рельефом поверхности, так как рентгеноспектральный анализ не показал отличия химического состава.

Включение Ce-Fe-Cl-O-состава найдено в тонштейне. Частица размером около 1,5 мкм располагается в углеродистом веществе тонштейна.



**Рис. 13.** Зерно Al-Si-Fe-Ca-Ce-La-O-состава в золе угля Азейского месторождения

**Fig. 13.** Grain of Al-Si-Fe-Ca-Ce-La-O composition in coal ash of Azey deposits

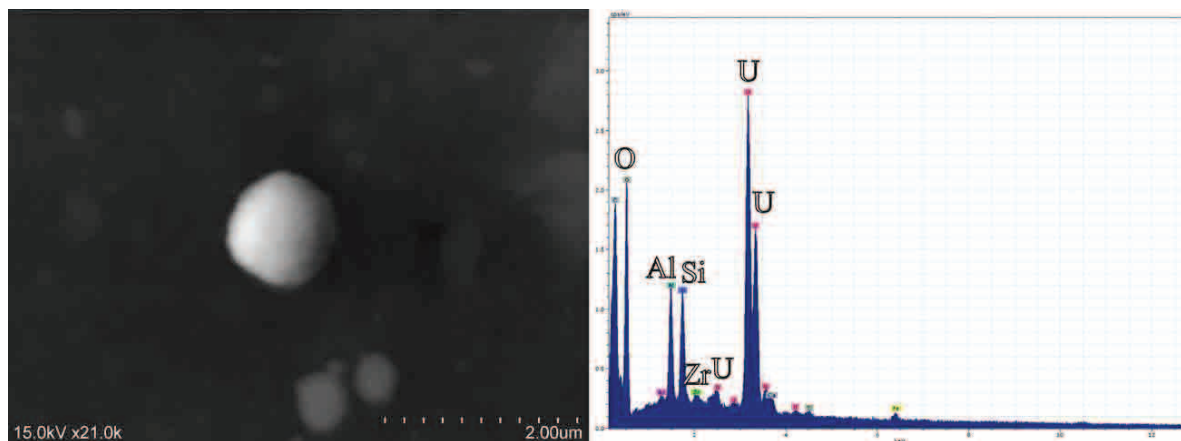


Рис. 14. Глобулярное зерно уранинита в тонштейне

Fig. 14. Globular grain of uraninite in tonstein

Карбонатная форма нахождения лантаноидов в углях Азейского месторождения хотя и является довольно редкой для углей в целом, но не исключительна. Находки бастнезита и разнообразных соединений редких земель с сидерофильными металлами, главным образом с железом, описаны в работах В.В. Середина [1, 39 и др.], изучавшего anomalно обогащенные лантаноидами угли Павловского месторождения в Приморье.

**Уран.** В изученных пробах выявлены немногочисленные включения 2-х типов урановых минералов, по составу схожих с уранинитом и коффинитом.

Уранинит обнаружен в угле и в тонштейне (рис. 14). Форма зерен разнообразна. В тонштейне встречаются сферические, скорлуповидные образования и зерна неправильной формы. Размеры частиц варьируют от 500 нм до 10 мкм в длину. В угле уранинит выявлен как в органическом веществе, так и в каолините. Форма выделений уранинита в тонштейне и наличие в энергодисперсионном спектре серы позволяет предположить модель его накопления путем восстановления урана на сероводородных пузырьках [40, 41].

Единичные включения коффинита размером от 550 нм до 3 мкм выявлены в органическом веществе угля. Форма зерен неправильная (рис. 15).

Во всех урановых минералах, найденных в угле и золе углей, за редким исключением, присутствует примесь  $Zr < 5\%$  (рис. 14).

#### Заключение

Полученные результаты свидетельствуют о том, что редкометалльная минералогия углей Азейского месторождения весьма богата. Детальное изучение углей пласта II позволило выявить как распространенные для углей минералы (циркон, монацит и т. д.), так и совершенно уникальные, такие как Si-Al-Na-Ca-Zr-Sc-Ti-V-Fe-O (пангит?).

Для скандия собственные минеральные формы не характерны. Он присутствует в виде органических соединений и, возможно, в форме примеси в цирконе и в других аксессуориях. Кроме того, установлена единственная скандийсодержащая минеральная частица сложного состава (Si-Al-Na-Ca-Zr-Sc-Ti-V-Fe-O). Неправильная форма и сложный со-

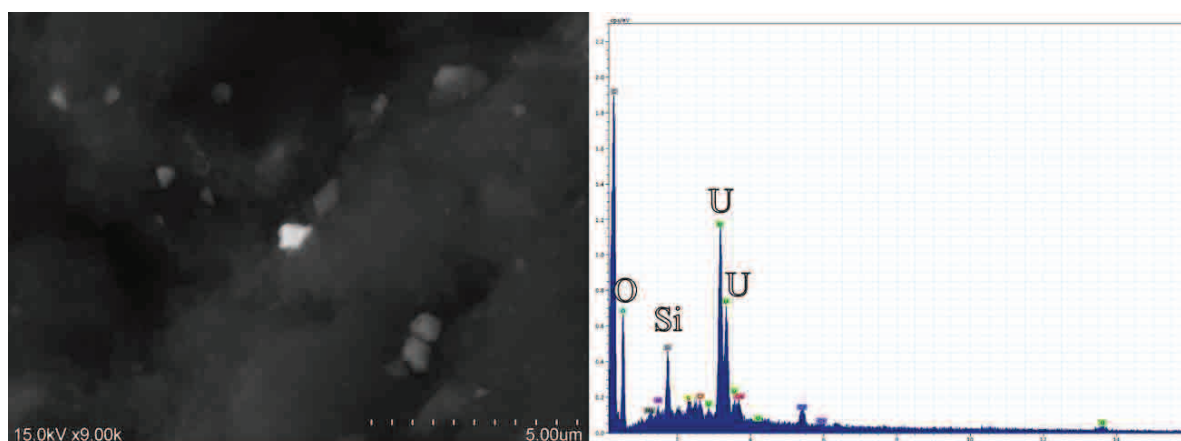


Рис. 15. Зерно коффинита (в центре снимка) и его энергетический спектр

Fig. 15. Coffinite grain (in the center of the picture) and its energy spectrum



став минеральной частицы позволяет предположить ее аутигенное образование.

Выявлена специфическая особенность редкоземельной минерализации углей Азейского месторождения – преобладающей минеральной формой легких лантаноидов являются фтор-карбонаты (бастнезит?), имеющие аутигенное происхождение. Форма их выделений преимущественно сферическая. Не исключено участие микроорганизмов в образовании сферических выделений. Фосфаты редких земель в углях месторождения распространены меньше. Ими обогащены угли на контакте с тонштейном. Вероятно, это связано с выщелачиванием лантаноидов из тонштейна и формированием аутигенной минерализации на контакте с ним.

Главной минеральной формой стронция является целестин. Встречается Sr-барит, образовавшийся, вероятно, в процессе окисления углей. Оба минерала имеют аутигенное происхождение.

Циркониевая минерализация, судя по химическому составу и морфологии выделений, представлена цирконом и бадделейтом. Кроме того, примесь циркония выявлена в урановых минералах и в Sc-содержащем зерне сложного состава. Отсутствие следов транспортировки циркона в углях и тонштейнах позволяет предположить пирокластическую и аутигенную его природу. Контрастные гафниево-аномалии в углях и золе угля на кон-

такте с тонштейном объясняются значительным количеством бадделейта. Обогащение цирконием и гафнием угля на контакте с тонштейном может быть следствием выщелачивания их из первичных минералов пирокластике и накопления на границе с тонштейном в форме аутигенного бадделейта.

Минеральные формы висмута редки. Единственный минерал, определенный по химическому составу как добреит, обнаружен в углях месторождения.

Основными минералами-носителями тория являются фосфаты редких земель. Уголь над тонштейном и под ним аномально обогащен торием, что может быть связано с его выщелачиванием из первичной пирокластике. Здесь установлены многочисленные находки фосфатов, содержащих до 15 % тория.

Урановая минерализация в углях представлена оксидами и силикатами урана аутигенного происхождения. Форма выделений оксидов урана в тонштейне позволяет предположить, что их формирование происходило путем восстановления урана на сероводородных пузырьках.

*Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ № 16-35-00472 мол\_а, № 16-55-53122 ГФЕН\_а и № 16-05-00405 А.*

*Авторы выражают благодарность Леониду Петровичу Рихванову за конструктивную критику и предложения по улучшению статьи.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Seredin V.V., Dai S. Coal deposits as potential alternative sources for lanthanides and yttrium // Int. J. Coal Geol. – 2012. – V. 94. – P. 67–93.
3. Арбузов С.И., Ершов В.В. Геохимия редких элементов в углях Сибири. – Томск: Изд. дом «Д-Принт», 2007. – 468 с.
4. Юровский А.З. Минеральные компоненты твердых горючих ископаемых. – М.: Недра, 1968. – 214 с.
5. Леонов С.Б., Федотов К.В., Сенченко А.Е. Промышленная добыча золота из золошлаковых отвалов тепловых электростанций // Горный журнал. – 1998. – № 5. – С. 67–68.
6. Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Ценные элементы-примеси в углях. – Екатеринбург: УРОРАН, 2006. – 538 с.
7. Солодов Н.А., Семенов Е.И., Бурков В.В. Геологический справочник по тяжелым литофильным редким металлам. – М.: Недра, 1987. – 438 с.
8. Редкие металлы на мировом рынке. Т.1. / под. ред. Т.Ю. Усовой. – М.: ИМГРЭ, 2008. – 162 с.
9. Угольная база России. Т. III. Угольные бассейны и месторождения Восточной Сибири. – М.: ООО «Геоинформцентр», 2002. – 488 с.
10. Ketris M.P., Yudovich Ya.E. Estimations of Clarkes for Carbonaceous biolithes: World averages for trace element contents in black shales and coals // International Journal of Coal Geology. – 2009. – V. 78. – P. 135–148.
11. Крюкова В.Н., Вязова Н.Г., Латышев В.П. Распределение скандия в веществе углей Восточной Сибири // Химия твердого топлива. – 2001. – № 3. – С. 73–76.
12. 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.
13. Редкие элементы в углях Кузнецкого бассейна / С.И. Арбузов, В.В. Ершов, А.А. Поцелуев, Л.П. Рихванов. – Кемерово: Изд-во КПК, 2000. – 246 с.
14. 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.
15. Середин В.В., Арбузов С.И., Алексеев В.П. Скандиеносные угли Яхлинского месторождения, Западная Сибирь // Доклады РАН. – 2006. – Т. 409. – № 5. – С. 677–682.
16. Геохимия и металлоносность углей Красноярского края / С.И. Арбузов, А.В. Волостнов, В.В. Ершов, Л.П. Рихванов, В.С. Миронов, В.С. Машенькин. – Томск: STT, 2008. – 300 с.
17. Скандий в углях Северной Азии (Сибирь, российский Дальний Восток, Монголия, Казахстан) / С.И. Арбузов, А.В. Волостнов, В.С. Машенькин, А.М. Межибор // Геология и геофизика. – 2014. – Т. 55. – № 11. – С. 1649–1660.
18. Scandium (Sc) geochemistry in coals (Siberia, Russian Far East, Mongolia, Kazakhstan, and Iran) / S.I. Arbutov, A.V. Volostnov, A.M. Mezhibor, V.I. Rybalko, S.S. Plenok // International Journal of Coal Geology. – 2014. – V. 125. – P. 22–35.
19. Arbutov S.I., Maslov S.G., Plenok S.S. Modes of occurrence of scandium in coals and peats (a review) // Solid Fuel Chemistry. – 2015. – V. 49. – № 3. – P. 167–182.
20. Природа тонштейнов Азейского месторождения Иркутского угольного бассейна / С.И. Арбузов, А.В. Волостнов, С.С. Ильенок, В.И. Рыбалко // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321. – № 3. – С. 89–97.

21. Nature of Tonsteins in the Azeisk Deposit of the Irkutsk Coal Basin (Siberia, Russia) / S.I. Arbutov, A.M. Mezhibor, D.A. Spears, S.S. Ilenok, M.V. Shal'dybin, E.V. Belaya // *Int. J. of Coal Geology*. – 2016. – V. 152. – P. 99–111.
22. Panguite,  $(\text{Ti}^{4+}, \text{Sc}, \text{Al}, \text{Mg}, \text{Zr}, \text{Ca})_{13}\text{O}_3$ , a new ultra-refractory titania mineral from the Allende meteorite: Synchrotron micro-diffraction and EBSD / C. Ma, O. Tschauer, J.R. Beckett, G.R. Rossman, W. Liu // *American Mineralogist*. – 2012. – V. 97. – P. 1219–1225.
23. Kangite,  $(\text{Sc}, \text{Ti}, \text{Al}, \text{Zr}, \text{Mg}, \text{Ca}, \text{o})_3\text{O}_3$ , a new ultra-refractory scandia mineral from the Allende meteorite: Synchrotron micro-Laue diffraction and electron backscatter diffraction / C. Ma, O. Tschauer, J.R. Beckett, G.R. Rossman, W. Liu // *American Mineralogist*. – 2013. – V. 98. – P. 870–878.
24. Юдович Я.Э. Геохимия ископаемых углей. – Л.: Наука, 1978. – 262 с.
25. Юдович Я.Э. Распределение элементов в вертикальном профиле угольных пластов // Матер. к 9-му совещанию работников лабораторий геологических организаций. Вып. 7. – Л.: Недра, 1965. – С. 134–142.
26. Юдович Я.Э., Кетрус М.П. Неорганическое вещество углей. – Екатеринбург: Наука, 2002. – 422 с.
27. Finkelman R.B. Modes of occurrence of trace elements in coal // *U.S. Geol. Surv. Open-File Rep.* – 1981. – № 81–99. – 322 p.
28. Brown H.R., Swaine D.J. Inorganic constituents of Australian coals // *J. Inst. Fuel.* – 1964. – V. 37. – P. 422–440.
29. Swaine D.J. Trace elements in coal. – London: Butterworth&Co, 1990. – 278 p.
30. Mineralogy and geochemistry of boehmite-rich coals: New insights from the Haerwusu Surface Mine, Jungar Coalfield, Inner Mongolia, China / S. Dai, D. Li, C. Chou, L. Zhao, Y. Zhang, D. Ren, Y. Ma, Y. Sun // *International Journal of Coal Geology*. – 2008. – V. 74. – P. 185–202.
31. Середин В.В., Магазина Л.О. Минералогия и геохимия ископаемой древесины Павловского бурогоугольного месторождения (Приморье) // *Литология и полезные ископаемые*. – 1999. – № 3 – С. 281–286.
32. Petrology and chemistry of Permian coals from the Paraná Basin: 1. Santa Terezinha, Leão-Butiá and Candiota Coalfields, Rio Grande do Sul, Brazil / W. Kalkreuth, M. Holz, M. Kern, G. Machado, A. Mexias, M.B. Silva, J. Willett, R. Finkelman, H. Burger // *International Journal of Coal Geology*. – 2006. – V. 68. – P. 79–116.
33. Hower J.C., Ruppert L.F., Cortland F.E. Lanthanide, yttrium, and zirconium anomalies in the Fire Clay coal bed, Eastern Kentucky // *International Journal of Coal Geology*. – 1999. – V. 39 (1–3). – P. 141–153.
34. Юдович Я.Э. Грамм дороже тонны. – М.: Наука, 1989. – 160 с.
35. *Минералогическая энциклопедия* / под ред. К. Фрей. – М.: Недра, 1985. – 512 с.
36. Birk D., White J.C. Rare earth elements in bituminous coals and underclays of the Sydney Basin, Nova Scotia: element sites, distribution, mineralogy // *International Journal of Coal Geology*. – 1991. – V. 19. – P. 219–251.
37. Qi H., Hu R., Zhang Q. REE Geochemistry of the Cretaceous lignite from Wulantuga Germanium Deposit, Inner Mongolia, Northeastern China // *International Journal of Coal Geology*. – 2007. – V. 71. – P. 329–344.
38. Главные рудообразующие минералы аномально богатых руд месторождения Томтор / Е.В. Лазарева, С.М. Жмодик, Н.Л. Добрецов, А.В. Толстов, Б.Л. Щербов, Н.С. Карманов, Е.Ю. Герасимов, А.В. Брянская // *Геология и геофизика*. – 2015. – Т. 56. – № 6. – С. 1080–1115.
39. 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.
40. Об условиях осаждения урана из водных растворов по экспериментальным данным / А.В. Коченов, К.Г. Королев, В.Т. Дубинчук, Ю.Л. Медведев // *Геохимия*. – 1977. – № 11. – С. 1711–1716.
41. Формы нахождения урана в углях и торфах Северной Азии / С.И. Арбузов, С.С. Ильенок, А.В. Волостнов, С.Г. Маслов, В.С. Архипов // *Известия Томского политехнического университета*. – 2011. – Т. 319. – № 1. – С. 109–115.
42. Mineralogy and geochemistry of the No. 6 Coal (Pennsylvanian) in the Junger Coalfield, Ordos Basin, China / S. Dai, D. Ren, C. Chou, S. Li, Y. Jiang // *International Journal of Coal Geology*. – 2006. – V. 66. – P. 253–270.

*Поступила 15.01.2016 г.*

UDC 552.57, 552.52

## MINERAL MODES OF RARE ELEMENTS IN COALS AND ASHES OF COALS OF AZEY DEPOSIT IN IRKUTSK COAL BASIN

Sergey S. Ilenok,

National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: ilenokss@rambler.ru

Sergey I. Arbuzov,

National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: siarbuzov@mail.ru

Relevance of the work is caused by the necessity to obtain new data on the rare metal potential of Azey coal deposit, to develop the techniques for studying the modes of elements occurrence in coals and wastes of coal combustion, and the possibility of further development of methods to extract rare elements from coals and wastes of coal combustion.

**The main aim of the research** is to study the mineral modes of occurrence of rare elements in coals, coal ashes and clay interlayers in coal seams of Azey deposit; to demonstrate the content of the variety of micro-minerals enriched with rare elements in the coals.

**The methods used in the study:** ashing samples at  $800 \pm 15$  °C determining ash content according to the GOST 11022-95; scanning electron microscopy using Hitachi S-3400N microscope with energy dispersive spectrometer Bruker XFlash 4010 for semi-quantitative X-ray analysis.

**The results** of the research indicate the wealth of rare-metal mineralogy of Azey coal deposit. The detailed study of coals of the seam II revealed both minerals which are widespread for coals (zircon, monazite, etc.) and those which are completely unique, such as Si-Al-Na-Ca-Zr-Sc-Ti-V-Fe-O (Panguite?). The authors have determined the specific feature of the rare-earth mineralization of Azey coal deposits. The fluoro-carbonates (bastnesite?) with authigenic origin are the predominant form of mineral light rare earth elements. In contact with tonstein the significant amount of rare earth phosphates and crystals of baddeleyite was found. Uranium oxides and silicates were revealed both in coal and in tonstein. In all uranium minerals the authors identified zirconium impurity (<5 %). Thorium mineralization is represented by phosphates of rare earths.

### Key words:

Coal, ash of coal, tonstein, rare elements, modes of occurrence, scanning electron microscopy.

The paper was financially supported by the grants of RFBR 16-35-00472 мол\_a, no. 16-55-53122 ГФЕН\_a and no. 16-05-00405 A.

The authors express thanks to Leonid P. Rikhvanov for constructive criticism and ideas for paper improvement.

### REFERENCES

- Seredin V.V. Metalonosnost ugley: usloviya formirovaniya i perspektivy osvoeniya [Metalliferous of coals: conditions of formation and development prospects]. *Ugolnaya baza Rossii. T. VI (Svodniy, zakluchitelniy). Osnovnye zakonomernosti ugleobrazovaniya i razmeshcheniya ugleunosnosti na territorii Rossii* [The base of uranium of Russia. Vol. VI. The main principles of coal formation and location of coal-bearing capacity in Russia]. Moscow, Geoinform-mark Publ., 2004. 779 p.
- Seredin V.V., Dai S. Coal deposits as potential alternative sources for lanthanides and yttrium. *Int. J. Coal Geol.*, 201, vol. 94, pp. 67-93.
- Arbuzov S.I., Ershov V.V. *Geokhimiya redkikh elementov v uglyakh Sibiri* [Geochemistry of rare elements in coals of Siberia]. Tomsk, D-Print Publ. house, 2007. 468 p.
- Yurovskiy A.Z. *Mineralnye komponenty tverdykh goryuchikh iskopaemykh* [The mineral components of solid fuels]. Moscow, Nedra Publ., 1968. 214 p.
- Leonov S.B., Fedotov K.V., Senchenko A.E. Promyshlennaya dobycha zolota iz zoloshlakovykh otvalov teplovykh elektrostantsiy [Industrial gold production of ash and slag dumps of power plants]. *Gorniy zhurnal*, 1998, no. 5, pp. 67-68.
- Yudovich Ya.E., Ketris M.P. *Tsennyye element-primesi v uglakh* [Valuable impurity elements in coal]. Ekaterinburg, UrORAN Press, 2006. 538 p.
- Solodov N.A., Semenov E.I., Burkov V.V. *Geologicheskiy spravochnik po tyazhelym litofilnyim redkim metallam* [Geological guide to lithophilic heavy rare metals]. Moscow, Nedra Publ., 1987. 438 p.
- Redkie metally na mirovom rynke* [Rare metals on the world market]. Ed. by T.Yu. Usova. Moscow, IMGRE Press, 2008. Vol. 1, 162 p.
- Ugolnaya baza Rossii. T. III. Ugolnye basseyn i mestorozhdeniya Vostochnoy Sibiri* [Russian coal base. Vol. III. The coal basins and deposits in Eastern Siberia]. Moscow, Geoinformatsentr Publ., 2002. 488 p.
- Ketris M.P., Yudovich Ya.E. Estimations of Clarkes for Carbonaceous biolithes: World averages for trace element contents in black shales and coals. *International Journal of Coal Geology*, 2009, vol. 78, pp. 135-148.
- Kryukova V.N., Vyazova N.G., Latyshev V.P. Raspreделение skandiya v veshchestve ugley Vostochnoy Sibiri [Scandium distribution in the substance of Eastern Siberia coal]. *Khimiya tverdogo topliva*, 2001, no. 3, pp. 73-76.
- Arbuzov S.I., Ershov V.V., Potseluev A.A., Rikhvanov L.P., Sovetov V.M. Redkozemelnye elementy i skandiy v uglyakh Kuzbassa [The rare-earth elements and scandium in Kuzbass coal]. *Litologiya i poleznye iskopaemye*, 1997, no. 3, pp. 315-326.
- Arbuzov S.I., Ershov V.V., Potseluev A.A., Rikhvanov L.P. *Redkie elementy v uglyakh Kuzbasskogo basseyna* [Trace elements in coal of the Kuznetsk Basin]. Kemerovo, KPK Press, 2000. 246 p.
- Arbuzov S.I., Ershov V.V., Rikhvanov L.P., Usova T.U., Kyargin V.V., Bulatov A.A., Dubovik N.E. *Redkometallny potentsial ugley Minusinskogo basseyna* [The rare-metal potential of the Minusinsk coal basin]. Novosibirsk, SO RAN Press, 2003. 347 p.

15. Seredin V.V., Arbuzov S.I., Alekseev V.P. Skandienosnye ugli Yakhliinskogo mestorozhdeniya, Zapadnaya Sibir [Scandium-bearing coals of Yakhliinskoe deposit in Western Siberia]. *Doklady RAN*, 2006, vol. 409, no. 5, pp. 677–682.
16. Arbuzov S.I., Volostnov A.V., Ershov V.V., Rikhvanov L.P., Mironov V.S., Mashenkin V.S. *Geokhimiya i metalonosnost ugley Krasnoyarskogo kraya* [Geochemistry and metal contents of the Krasnoyarsk Territory coal]. Tomsk, STT Press, 2008. 300 p.
17. Arbuzov S.I., Volostnov A.V., Mashenkin V.S., Mezhibor A.M. Skandiy v uglakh Severnoy Azii (Sibir, rossiyskiy Dalniy Vostok, Mongoliya, Kazakhstan) [Scandium in the coals of North Asia (Siberia, the Russian Far East, Mongolia, Kazakhstan)]. *Geologiya i geofizika*, 2014, vol. 55, no. 11, pp. 1649–1660.
18. Arbuzov S.I., Volostnov A.V., Mezhibor A.M., Rybalko V.I., Ilenok S.S. Scandium (Sc) geochemistry in coals (Siberia, Russian Far East, Mongolia, Kazakhstan, and Iran). *International Journal of Coal Geology*, 2014, vol. 125, pp. 22–35.
19. Arbuzov S.I., Maslov S.G., Ilenok S.S. Modes of occurrence of scandium in coals and peats (A review). *Solid Fuel Chemistry*, 2015, vol. 49, pp. 167–182.
20. Arbuzov S.I., Volostnov A.V., Ilenok S.S., Rybalko V.I. Priroda tonshteynov Azeyskogo mestorozhdeniya Irkutskogo ugolnogo basseyna [Nature of tonsteins of Azeyskoe deposit in Irkutsk coal basin]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 321, no. 3, pp. 89–97.
21. 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). *Int. J. of Coal Geology*, 2016, vol. 152, pp. 99–111.
22. Ma C., Tschauner O., Beckett J.R., Rossman G.R., Liu W. Panguite, (Ti<sup>4+</sup>, Sc, Al, Mg, Zr, Ca)<sub>3</sub>O<sub>3</sub>, a new ultra-refractory titania mineral from the Allende meteorite: Synchrotron micro-diffraction and EBSD. *American Mineralogist*, 2012, vol. 97, pp. 1219–1225.
23. Ma C., Tschauner O., Beckett J.R., Rossman G.R., Liu W. Kangite, (Sc, Ti, Al, Zr, Mg, Ca, O)<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, a new ultra-refractory scandia mineral from the Allende meteorite: Synchrotron micro-Laue diffraction and electron backscatter diffraction. *American Mineralogist*, 2013, vol. 98, pp. 870–878.
24. Yudovich Ya.E. *Geokhimiya iskopaemykh ugley* [Geochemistry of coals]. Leningrad, Nauka Publ., 1978. 262 p.
25. Yudovich Ya.E. Raspredelenie elementov v vertikalnom profile ugolnykh plastov [The distribution of elements in coal seams section]. *Materialy k devyatomu soveshchaniyu rabotnikov laboratoriy geologicheskikh organizatsiy* [Proc. 9th meeting of the geological laboratory workers organizations]. Leningrad, Nedra Publ., 1965. Iss. 7, pp. 134–142.
26. Yudovich Ya.E., Ketris M.P. *Neorganicheskoe veshchestvo ugley* [Coal inorganic substance]. Ekaterinburg, Nauka Publ., 2002. 422 p.
27. Finkelman R.B. *Modes of occurrence of trace elements in coal*. U.S. Geol. Surv. Open-File Rep. No. 81–99, 322 p.
28. Brown Kh.R., Swaine D.J. Inorganic constituents of Australian coals. *J. Inst. Fuel*, 1964, vol. 37, pp. 422–440.
29. Swaine D.J. *Trace elements in coal*. London, Butterworth&Co, 1990. 278 p.
30. Dai S., Li D., Chou C., 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.
31. Seredin V.V., Magazina L.O. Mineralogiya i geokhimiya iskopaemoy drevesiny Pavlovskogo burougnolnogo mestorojdeniya (Primorye) [Mineralogy and geochemistry of fossil wood of Pavlovsk lignite deposit (Primorye)]. *Litologiya i poleznye iskopaemye*, 1999, no. 3, pp. 281–286.
32. Kalkreuth W., Holz M., Kern M., Machado G., Mexias A., Silva M.B., Willett J., Finkelman R., Burger H. Petrology and chemistry of Permian coals from the Paraná Basin: 1. Santa Terezinha, Leão-Butiá and Candiota Coalfields, Rio Grande do Sul, Brazil. *International Journal of Coal Geology*, 2006, vol. 68, pp. 79–116.
33. Hower J.C., Ruppert L.F., Cortland F.E. Lanthanide, yttrium, and zirconium anomalies in the Fire Clay coal bed, Eastern Kentucky. *International Journal of Coal Geology*, 1999, vol. 39 (1–3), pp. 141–153.
34. Yudovich Ya.E. *Gramm dorozhe tonny* [Gram is more expensive than a ton]. Moscow, Nauka Publ., 1989. 160 p.
35. *Mineralogicheskaya entsiklopediya* [Mineralogical encyclopedia]. Ed. by K. Frey. Moscow, Nedra Publ., 1985. 512 p.
36. Birk D., White J.C. Rare earth elements in bituminous coals and underclays of the Sydney Basin, Nova Scotia: element sites, distribution, mineralogy. *International Journal of Coal Geology*, 1991, vol. 19, pp. 219–251.
37. Qi H., Hu R., Zhang Q. REE Geochemistry of the Cretaceous lignite from Wulantuga Germanium Deposit, Inner Mongolia, Northeastern China. *International Journal of Coal Geology*, 2007, vol. 71, pp. 329–344.
38. Lazareva E.V., Zhmodik S.M., Dobretsov N.L., Tolstov A.V., Scherbov B.L., Karmanov N.S., Gerasimov E.Yu., Bryanskaya A.V. Glavnye rudoobrazuyushchie mineraly anomalno bogatykh rud mestorozhdeniya Tomtor [The main ore-forming minerals of abnormally rich ore of Tomtor deposit]. *Geologiya i Geofizika*, 2015, vol. 56, no. 6, pp. 1080–1115.
39. 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.
40. Kochenov A.V., Korolev K.G., Dubinchuk V.T., Medvedev Yu.L. Ob usloviyakh osazhdeniya urana iz vodnykh rastvorov po eksperimentalnym dannym [Conditions for uranium deposition from aqueous solutions by the experimental data]. *Geokhimiya*, 1977, no. 11, pp. 1711–1716.
41. Arbuzov S.I., Ilenok S.S., Volostnov A.V., Maslov S.G., Arkhipov V.S. Formy nakhozhdeniya urana v ugl'yakh i torfakh Severnoy Azii [The forms of uranium in the coal and peat of Northern Asia]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2001, vol. 319, no. 1, pp. 109–115.
42. Dai S., Ren D., Chou C., Li S., Jiang Y. Mineralogy and geochemistry of the No. 6 Coal (Pennsylvanian) in the Jungar Coalfield, Ordos Basin, China. *International Journal of Coal Geology*, 2006, vol. 66, pp. 253–270.

Received: 15 January 2015.

УДК 622.73:519.718:581.51

## ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ИЗМЕНЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

**Баласянн Сейран Шамирович,**

доктор технических наук, доцент, заместитель директора по научной работе Капанского филиала Национального политехнического университета Армении, Армения, 3307, г. Капан, ул. Багаберд, 28.  
E-mail: seyran@sunicom.net

**Геворгян Эрмине Михайловна,**

преподаватель, соискатель кафедры информационных технологий, информатики и автоматизированных систем Капанского филиала Национального политехнического университета Армении, Армения, 3307, г. Капан, ул. Багаберд, 28. E-mail: hermine79@rambler.ru

**Актуальность работы** обусловлена необходимостью разработки имитационной модели процесса изменения работоспособности оборудования технологической системы измельчения руды, входящей в состав компьютерной модели, для оценки и анализа эффективности ее функционирования с учетом влияния показателей надежности оборудования.

**Цель работы.** Разработка имитационной модели процесса изменения работоспособности измельчительного оборудования, формализованного в виде случайного процесса возникновения отказов и восстановления оборудования, на основании статистических данных об отказах и восстановлениях измельчительного оборудования Зангезурского медно-молибденового комбината (ЗАО «ЗММК», Армения).

**Методы исследования:** теория надежности, методы прикладной статистики, метод имитационного моделирования.

**Результаты.** Предложена процедура формализации, позволяющая формально представить процесс изменения работоспособности измельчительного оборудования в виде случайного процесса возникновения отказов и восстановления отказавшего оборудования. Определен состав технологической системы измельчения руды ЗММК и на основании статистических данных об отказах и восстановлениях измельчительного оборудования идентифицированы законы распределения времени их работы между соседними отказами и времени восстановления. С использованием принципа особых состояний разработана имитационная модель процесса изменения работоспособности измельчительного оборудования, воспроизводящая на компьютере случайный процесс возникновения отказов и восстановления отказавшего оборудования технологической системы измельчения руды в соответствии с идентифицированными законами распределения времени работы между соседними отказами и времени восстановления отказавшего измельчительного оборудования. Благодаря применению модульного принципа и регистрового метода моделирования, разработанный моделирующий алгоритм обладает компактностью и определенной универсальностью. Это предоставляет возможность использовать разработанную имитационную модель в составе компьютерных моделей для оценки и исследования эффективности функционирования аналогичных систем измельчения руды. Оценена адекватность разработанной модели с применением методов валидации и верификации по отношению как к исходным статистическим данным, отдельным компонентам, так и к имитационной модели в целом. Разработанная имитационная модель была использована в составе компьютерной модели для оценки и анализа эффективности функционирования технологической системы измельчения руды ЗММК и модели для стохастического управления процессом флотации руды с учетом влияния надежности измельчительного оборудования.

### **Ключевые слова:**

Измельчение руды, измельчительное оборудование, случайный процесс, надежность, отказ, восстановление, имитационная модель, адекватность, валидация, верификация.

### **Введение**

Практический опыт эксплуатации горно-обогатительных предприятий показывает, что надежность измельчительного оборудования существенно влияет на качество функционирования технологической системы измельчения руды (ТСИР) [1–3], следовательно, и на эффективность конечного процесса обогащения руд [4–7]. В связи с этим возникает необходимость исследования эффективности функционирования ТСИР с учетом надежности ее оборудования методом компьютерного моделирования, включающего решение следующих прикладных задач:

- оценка степени снижения эффективности функционирования ТСИР вследствие ненадежности ее элементов;

- оценка влияния ненадежности отдельных элементов ТСИР на эффективность ее функционирования;
- выбор наилучшего варианта резервирования грунтовых насосов;
- выбор наилучшей конфигурации структуры резервных связей между измельчительными агрегатами ТСИР;
- определение оптимального количества ремонтных бригад и оптимальной дисциплины восстановления отказавшего оборудования.

Компьютерная модель, ориентированная на исследование эффективности функционирования ТСИР с учетом надежности ее оборудования, включает следующие модели [8]: имитационную модель процесса изменения работоспособности

измельчительного оборудования, компьютерную модель процесса функционирования ТСИР и компьютерную модель формирования условного показателя эффективности ТСИР. Очевидно, что для разработки компьютерной модели ТСИР прежде всего необходимо построить имитационную модель процесса изменения работоспособности ее оборудования, чему и посвящена данная работа.

### Постановка задачи

Целью настоящей работы является разработка имитационной модели процесса изменения работоспособности измельчительного оборудования на примере ТСИР Зангезурского медно-молибденового комбината (ЗАО «ЗММК», Армения), включающей решение следующих задач:

- определение состава ТСИР и формализация процесса изменения работоспособности ее элементов;

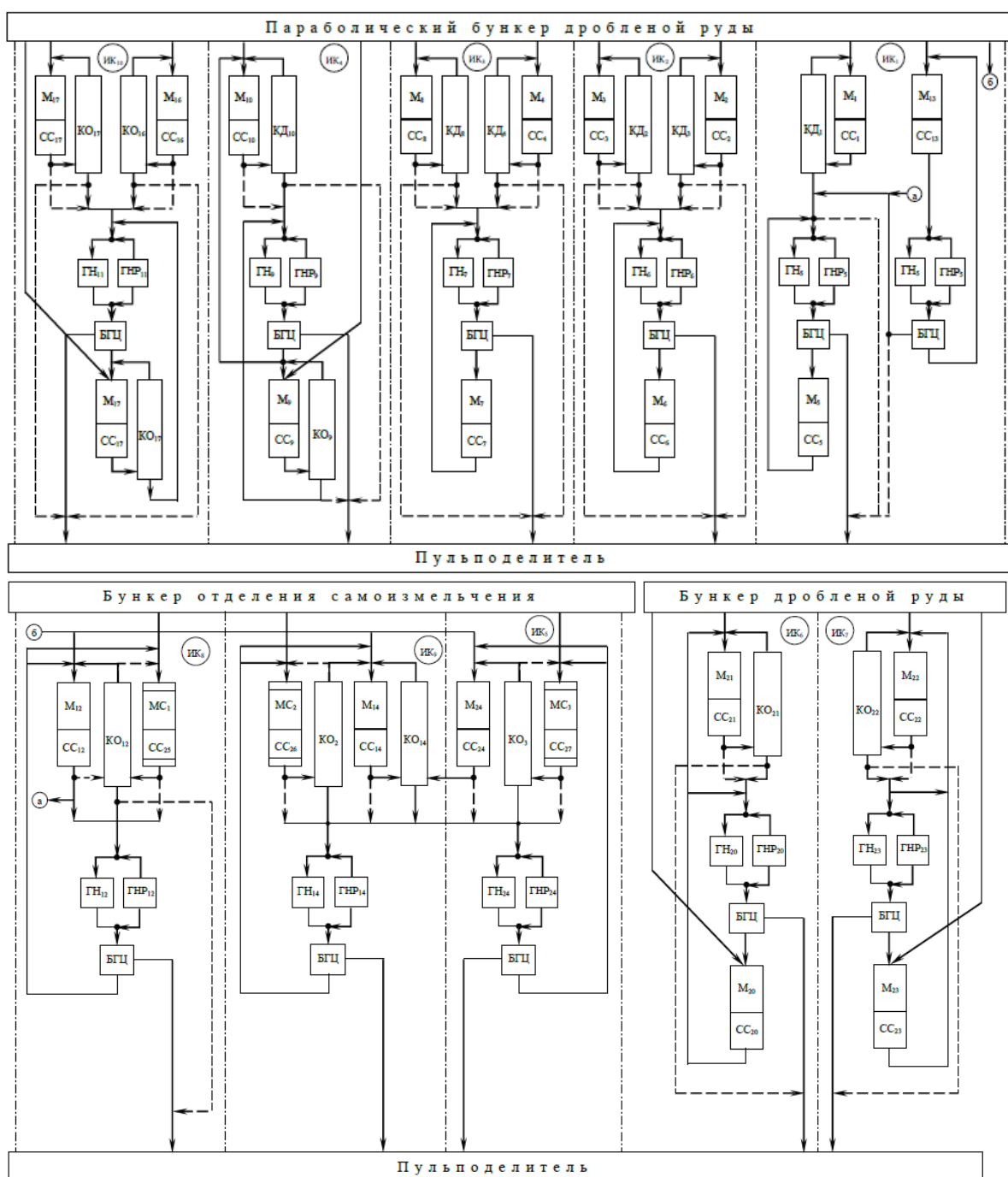


Рис. 1. Структурная схема ТСИР

Fig. 1. The structural diagram of OGTS

- идентификация законов распределения времени работы между отказами и времени восстановления элементов;
- разработка моделирующего алгоритма процесса изменения работоспособности элементов и его программная реализация;
- оценка адекватности разработанной имитационной модели.

#### Краткое содержательное описание ТСИР ЗММК

Технологическая система измельчения руды ЗММК (рис. 1) состоит из 21 мельницы шарового измельчения, 3 мельниц самоизмельчения, 6 двуспиральных классификаторов типа 2КСН-2,4, 10 односпиральных классификаторов типа КСН-2,0, 11 блоков гидроциклонов – 750 мм, 12 восьмидюймовых грунтовых насосов типа ГраК 350/40, 10 двенадцатидюймовых грунтовых насосов типа ГраК 1600/50, 24 систем смазки.

Цикл шарового измельчения включает одну шаровую мельницу 1-й стадии типа МШР 3200×3100, 2 шаровые мельницы 2-й стадии типа МШР 3200×3100 стандартного размера и 18 удлиненных шаровых мельниц типа МШР 3200×3800. Шаровые мельницы работают по схеме двухстадийного измельчения при сопряжении мельниц 1:1 и 2:1. Цикл самоизмельчения руды включает 3 мельницы самоизмельчения типа ММС 70–73, работающие по схеме сопряжения 1:1 с шаровыми мельницами.

Все мельницы 1-й стадии работают с замкнутой циклом со спиральными классификаторами, т. е. пески классификаторов возвращаются в мельницы 1-й стадии как циркулирующая нагрузка. Слив классификаторов и разгрузка мельниц 2-й стадии объединяются и поступают в зумпфы грунтовых насосов гидроциклонов 2-й стадии измельчения.

Шаровые мельницы 2-й стадии работают по замкнутой схеме с грунтовым насосом и батареей гидроциклонов, причем некоторые мельницы 2-й стадии измельчения одновременно подпитываются рудой из бункеров дробленой руды, что позволяет им при отказе или ремонте мельниц 1-й стадии работать в одностадийном режиме (1:0).

В измельчительных комплексах (ИК), работающих по схеме сопряжения 2:1, установлены грунтовые 12-дюймовые насосы, зарезервированные методом замещения 8-дюймовыми насосами, обеспечивающими работу ИК по схеме сопряжения 1:1 при отказе основного насоса. В ИК, работающих по схеме сопряжения 1:1, установлены грунтовые 8-дюймовые насосы, зарезервированные однотипными насосами методом замещения.

#### Формализация процесса изменения работоспособности элементов ТСИР

Для построения компьютерной модели процесса изменения работоспособности оборудования ТСИР прежде всего необходимо определить состав системы, т. е. выделить ее элементы.

При исследовании эффективности функционирования системы в качестве элементов, как правило, рекомендуется рассматривать конструктивно независимые ее части, обладающие функциональной целостностью. Выбор степени детализации при разбиении системы на элементы в основном обуславливается характером решаемых задач и возможностью получения статистических данных о надежности выделенных элементов.

Учитывая вышесказанное, а также исходя из целей моделирования и особенностей ТСИР, в качестве ее элементов выделены:

- шаровые мельницы;
- системы смазки мельниц;
- двуспиральные классификаторы;
- грунтовые насосы;
- мельницы самоизмельчения;
- односпиральные классификаторы;
- гидроциклоны;
- питатели;
- транспортеры.

Заметим, что выделение элементов системы измельчения на данном этапе носит предварительный характер. Окончательный состав элементов ТСИР был определен после обработки статистических данных об отказах и восстановлениях элементов.

С целью формализации процесса изменения работоспособности элементов ТСИР для них выделяются следующие состояния, отличающиеся между собой с точки зрения надежности:

- 1) для мельниц, классификаторов, систем смазки, гидроциклонов, питателей, транспортеров: состояние «1» – работоспособное; состояние «0» – неработоспособное (отказ), когда элемент восстанавливается; состояние «2» – неработоспособное, когда элемент находится в очереди на восстановление;
- 2) для 12-дюймовых грунтовых насосов типа ГраК 1600/50: состояние «1» – работоспособное; состояние «0» – неработоспособное;
- 3) для 8-дюймовых грунтовых насосов типа ГраК 350/40: состояние «1» – работоспособное, когда элемент функционирует; состояние «0» – неработоспособное, когда элемент восстанавливается; состояние «2» – работоспособное, когда элемент находится в резерве.

При выделении возможных состояний грунтовых насосов сделано допущение о независимости их восстановления, основанное на статистических данных (при 200 восстановлениях очередь наблюдалась лишь в трех случаях). Восстановление остального оборудования производится при помощи двух бригад. При этом соблюдается дисциплина «раньше пришел – раньше обслужен».

Итак, формально каждый элемент  $E_i^0$  ( $i = \overline{1, n}$ ) ТСИР в любой момент времени  $t \in T^0$  может находиться в одном из возможных состояний  $z_i(t) \in Z_i = \{0, 1, 2, \dots, k_i\}$ . С течением времени под влиянием внешних и внутренних случайных факторов элементы системы переходят из одного состояния

в другое. Последовательная смена состояний  $z_i(t)$  каждого элемента  $E_i^0$  системы рассматривается как формализованный исходный процесс изменения его работоспособности. Упорядоченная совокупность состояний элементов  $z_1(t), z_2(t), \dots, z_n(t)$  в любой момент времени  $t$  однозначно определяет состояние системы  $z_i(t) \in Z$  как «точку» пространства

$$Z = \prod_{i=1}^n Z_i \text{ с координатами } z_1, z_2, \dots, z_n. \text{ В результате}$$

переходов элементов системы из одного состояния в другое происходит изменение состояний  $z_i(t)$  системы в целом. Случайный  $n$ -мерный процесс  $z(t) = \{z_i(t)\}$  с дискретным пространством  $Z$  и с непрерывным временем рассматривается как формализованный исходный процесс изменения работоспособности элементов ТСИР. При предположении о независимости отказов элементов системы этот процесс можно считать заданным, если известны функции распределения  $G_i(\tau_p), F_i(\tau_B)$  ( $i = \overline{1, n}$ ) соответственно времени работы между отказами  $\tau_p$  и времени восстановления  $\tau_B$ , количество ремонтных бригад  $l$  и дисциплина обслуживания  $d$ . Тогда процесс  $Z(t)$  формально можно описать оператором

$$z(t) = Q(t, \{G_i(\tau_p), F_i(\tau_B) : i = \overline{1, n}\}, l, d). \quad (1)$$

При заданных  $G_i(\tau_p), F_i(\tau_B)$  ( $i = \overline{1, n}$ ),  $l$  и  $d$  оператор  $Q$  реализует отображение  $T^0 \rightarrow Z$  с областью определения  $T^0$  и областью значений в пространстве  $Z$ .

Следует отметить, что с точки зрения влияния работоспособности элементов на эффективность функционирования ТСИР некоторые из рассмотренных состояний элементов практически не отличаются друг от друга. Выделение этих состояний необходимо лишь для обеспечения имитации процесса  $z(t)$ . В связи с этим после имитации процесса  $z(t)$  целесообразно из исходных состояний элементов перейти к укрупненным состояниям  $y_i^0 \in \{0, 1\}$ .

Формально укрупнение состояний каждого элемента можно описать однозначным оператором

$$y_i^0(t) = W_i(z_i(t))$$

с областью определения  $Z_i$  и областью значений  $Y_i^0 = \{0, 1\}$ .

Операторы  $W_i$  для грунтовых насосов типа ГрАК 350/40 имеют вид

$$y_i^0(t) = \begin{cases} 1, & \text{если } z_i(t) \neq 0, \\ 0, & \text{если } z_i(t) = 0. \end{cases} \quad (2)$$

Для остальных элементов операторы  $W_i$  имеют следующий вид:

$$y_i^0(t) = \begin{cases} 1, & \text{если } Z_i(t) = 1, \\ 0, & \text{если } Z_i(t) \neq 1. \end{cases} \quad (3)$$

В результате укрупнения состояний исходного процесса  $Z(t)$  получается формализованный укрупненный процесс  $Y^0(t)$  изменения работоспособности элементов ТСИР, который формально можно описать однозначным оператором

$$y^0(t) = W(z(t)), \quad (4)$$

где  $W$  представляет собой совокупность операторов  $W_i$  ( $i = \overline{1, n}$ ) с областью определения  $Z$  и областью

значений в пространстве  $Y^0 = \prod_{i=1}^n Y_i^0 = \{0, 1\}^n$ .

Учитывая (1), соотношение (4) можно записать в следующем виде:

$$y^0(t) = H^0(t, \{G_i(\tau_p), F_i(\tau_B) : i = \overline{1, n}\}, l, d), \quad (5)$$

где  $H^0 = W \circ Q$  – последовательная композиция операторов  $W$  и  $Q$ .

При заданных функциях  $G_i(\tau_p), F_i(\tau_B)$  ( $i = \overline{1, n}$ ), количестве ремонтных бригад  $l$  и дисциплине обслуживания  $d$  случайный оператор  $H^0$  реализует отображение  $T^0 \rightarrow Y^0$ .

Соотношение (5) представляет собой математическую модель процесса изменения работоспособности элементов системы измельчения.

Таким образом, имитация процесса  $Y^0(t)$  сводится к имитации процессов  $Z_i(t)$  ( $i = \overline{1, n}$ ) с учетом взаимодействия между ними и их последующему укрупнению в соответствии с соотношениями (2) и (3).

#### Идентификация законов распределения времени работы между отказами и времени восстановления измельчительного оборудования

В настоящее время отсутствуют работы, посвященные идентификации функций распределения вероятностей  $G_i(\tau_p)$  и  $F_i(\tau_B)$  измельчительного оборудования [1–3, 7]. Поэтому для их выявления использовались статистические данные об отказах и восстановлениях измельчительного оборудования ЗММК, собранные за трехлетний период эксплуатации ТСИР. Заметим, что суммарное число отказов гидроциклонов, питателей и транспортеров оказалось недостаточным не только для выявления функций распределения, но даже для проверки гипотезы об однородности выборок. Поэтому эти элементы были исключены из состава модели ТСИР как высоконадежные.

Согласие эмпирических и теоретических распределений проверялось с использованием критерия  $\chi^2$  Пирсона [9, 10]. При этом в качестве гипотетических распределений были рассмотрены экспоненциальное, логарифмически-нормальное распределения, распределения Вейбулла и Релея [9, 11, 12].

В результате идентификации выявлены аналитические выражения для функций плотности распределения времени работы между отказами  $g(\tau_p)$  и времени восстановления  $f(\tau_B)$  нижеприведенного измельчительного оборудования:

1) мельница 1-й стадии типа МШР 3200×3800:

$$g_i(\tau_p) = \hat{\lambda} \cdot e^{-\hat{\lambda} \cdot \tau_p} = 1,925 \cdot 10^{-2} \cdot e^{-1,925 \cdot 10^{-2} \cdot \tau_p},$$

$$f_i(\tau_B) = \frac{k \cdot \tau_B^{k-1}}{\hat{\alpha}} \cdot e^{-\frac{\tau_B^k}{\hat{\alpha}}} = 0,469 \cdot \tau_B^{-0,3} \cdot e^{-0,67 \cdot \tau_B^{0,7}},$$

2) мельница 2-й стадии типа МШР 3200×3800:



$$g_i(\tau_p) = \hat{\lambda} \cdot e^{-\hat{\lambda} \cdot \tau_p} = 2,45 \cdot 10^{-2} \cdot e^{-2,45 \cdot 10^{-2} \cdot \tau_p},$$

$$f_i(\tau_\sigma) = \frac{k \cdot \tau_\sigma^{k-1}}{\alpha} \cdot e^{-\frac{\tau_\sigma}{\alpha}} = 0,4956 \cdot \tau_\sigma^{-0,4} \cdot e^{-0,826 \cdot \tau_\sigma^{0,6}},$$

3) мельница 1-й стадии типа МШР 3200×3100:

$$g_i(\tau_p) = \hat{\lambda} \cdot e^{-\hat{\lambda} \cdot \tau_p} = 1,785 \cdot 10^{-2} \cdot e^{-1,785 \cdot 10^{-2} \cdot \tau_p},$$

$$f_i(\tau_\sigma) = \frac{k \cdot \tau_\sigma^{k-1}}{\alpha} \cdot e^{-\frac{\tau_\sigma}{\alpha}} = 0,492 \cdot \tau_\sigma^{-0,4} \cdot e^{-0,82 \cdot \tau_\sigma^{0,6}},$$

4) мельница 2-й стадии типа МШР 3200×3100:

$$g_i(\tau_p) = \hat{\lambda} \cdot e^{-\hat{\lambda} \cdot \tau_p} = 2,05 \cdot 10^{-2} \cdot e^{-2,05 \cdot 10^{-2} \cdot \tau_p},$$

$$f_i(\tau_\sigma) = \frac{k \cdot \tau_\sigma^{k-1}}{\alpha} \cdot e^{-\frac{\tau_\sigma}{\alpha}} = 0,48 \cdot \tau_\sigma^{-0,4} \cdot e^{-0,798 \cdot \tau_\sigma^{0,6}},$$

5) классификатор типа 2КСН-2,4:

$$g_i(\tau_p) = \hat{\lambda} \cdot e^{-\hat{\lambda} \cdot \tau_p} = 4,4 \cdot 10^{-3} \cdot e^{-4,4 \cdot 10^{-3} \cdot \tau_p},$$

$$f_i(\tau_\sigma) = \frac{e^{-(\lg \tau_\sigma - \hat{\mu})^2 / 2\hat{\sigma}^2}}{\hat{\sigma}\sqrt{2\pi} \cdot \tau_\sigma} = \frac{e^{-(\lg \tau_\sigma - 0,14)^2 / 0,46}}{0,48\sqrt{2\pi} \cdot \tau_\sigma},$$

6) система смазки мельниц:

$$g_i(\tau_p) = \hat{\lambda} \cdot e^{-\hat{\lambda} \cdot \tau_p} = 2,6 \cdot 10^{-3} \cdot e^{-2,6 \cdot 10^{-3} \cdot \tau_p},$$

$$f_i(\tau_\sigma) = \frac{e^{-(\lg \tau_\sigma - \hat{\mu})^2 / 2\hat{\sigma}^2}}{\hat{\sigma}\sqrt{2\pi} \cdot \tau_\sigma} = \frac{e^{-(\lg \tau_\sigma - 0,12)^2 / 0,52}}{0,52\sqrt{2\pi} \cdot \tau_\sigma},$$

7) грунтовой насос типа ГрАК 350/40:

$$g_i(\tau_p) = \frac{\tau_p}{\hat{\sigma}^2} \cdot e^{-\frac{\tau_p}{2\hat{\sigma}^2}} = \frac{\tau_p}{4225} \cdot e^{-\frac{\tau_p}{8450}},$$

$$f_i(\tau_\sigma) = \frac{e^{-(\lg \tau_\sigma - \hat{\mu})^2 / 2\hat{\sigma}^2}}{\hat{\sigma}\sqrt{2\pi} \cdot \tau_\sigma} = \frac{e^{-(\lg \tau_\sigma - 0,292)^2 / 0,174}}{0,295\sqrt{2\pi} \cdot \tau_\sigma},$$

8) грунтовой насос типа ГрАК 1600/50:

$$g_i(\tau_p) = \frac{\tau_p}{\hat{\sigma}^2} \cdot e^{-\frac{\tau_p}{2\hat{\sigma}^2}} = \frac{\tau_p}{3150} \cdot e^{-\frac{\tau_p}{6300}},$$

$$f_i(\tau_\sigma) = \frac{e^{-(\lg \tau_\sigma - \hat{\mu})^2 / 2\hat{\sigma}^2}}{\hat{\sigma}\sqrt{2\pi} \cdot \tau_\sigma} = \frac{e^{-(\lg \tau_\sigma - 0,4555)^2 / 0,196}}{0,313\sqrt{2\pi} \cdot \tau_\sigma},$$

9) мельница самоизмельчения типа ММС-70–23:

$$g_i(\tau_p) = 1,81 \cdot 10^{-2} \cdot e^{-1,81 \cdot 10^{-2} \cdot \tau_p},$$

$$f_i(\tau_\sigma) = 0,44 \cdot \tau_\sigma^{-0,3} \cdot e^{-0,63 \cdot \tau_\sigma^{0,7}},$$

10) односпиральный классификатор типа КСН- 2,0:

$$g_i(\tau_p) = 5,2 \cdot 10^{-3} \cdot e^{-5,2 \cdot 10^{-3} \cdot \tau_p},$$

$$f_i(\tau_\sigma) = \frac{e^{-(\lg \tau_\sigma - 0,18)^2 / 0,5}}{0,52\sqrt{2\pi} \cdot \tau_\sigma}.$$

### Разработка моделирующего алгоритма процесса изменения работоспособности элементов ТСИР

Согласно проведенной формализации, имитация процесса изменения работоспособности элементов ТСИР  $Y^0(t)$  сводится к имитации случайных процессов возникновения отказов и восстановления отдельных элементов в соответствии с заданными функциями распределения  $G_i(\tau_p)$  и  $F_i(\tau_B)$  с сохранением их логической структуры и последовательности протекания во времени [7]. При этом особую роль играет механизм задания времени (или механизм регламентации событий), который координирует действия элементов системы путем установления строгой очередности системных событий и обеспечивает продвижение во времени. Учитывая дискретный характер моделируемого процесса, при построении его моделирующего алгоритма в качестве метода обеспечения регламентации событий в процессе имитации выбран метод задания времени до следующего шага (принцип особых состояний  $\delta z$ ) [13–17].

Разработка моделирующего алгоритма осуществлена с использованием принципа особых состояний, модульного принципа и регистрового метода [13–20].

Исходя из сходства логической структуры и последовательности протекания во времени процессов отказов и восстановлений элементов, в системе выделены следующие группы элементов:

- 1) мельницы, классификаторы и системы смазки;
- 2) грунтовые насосы, зарезервированные однотипными насосами, входящие в состав ИК<sub>4</sub>...ИК<sub>9</sub>, А<sub>13</sub> (ГН<sub>9</sub>, ГНР<sub>9</sub>, ГН<sub>24</sub>, ГНР<sub>24</sub>, ГН<sub>20</sub>, ГНР<sub>20</sub>, ГН<sub>23</sub>, ГНР<sub>23</sub>, ГН<sub>12</sub>, ГНР<sub>12</sub>, ГН<sub>14</sub>, ГНР<sub>14</sub>);
- 3) грунтовые насосы, зарезервированные насосами меньшей производительности, входящие в состав ИК<sub>2</sub>, ИК<sub>3</sub>, ИК<sub>10</sub>, А<sub>1</sub> (ГН<sub>6</sub>, ГНР<sub>6</sub>, ГН<sub>7</sub>, ГНР<sub>7</sub>, ГН<sub>11</sub>, ГНР<sub>11</sub>, ГН<sub>5</sub>, ГНР<sub>5</sub>).

Выделение указанных групп элементов позволяет построить моделирующий алгоритм и его программную реализацию по модульному принципу, благодаря чему обеспечиваются гибкость и компактность имитационной модели.

Укрупненная блок-схема моделирующего алгоритма процесса изменения работоспособности элементов ТСИР приведена на рис. 2. Прежде чем рассматривать ее работу, остановимся на тех массивах информации, которые необходимы для обеспечения имитации.

*Регистр Тсостояний  $z_i(t)$  ( $i=\overline{1,n}$ ) и моментов их изменения.* В этом регистре для каждого  $k$ -го элемента системы в зависимости от ее состояния хранятся:

- момент ближайшего отказа  $t_0^k$  (со знаком «+»), если элемент работоспособен и функционирует;
- момент окончания восстановления  $t_B^k$  (со знаком «-»), если элемент восстанавливается;

- бесконечность, если элемент находится в очереди на восстановление или в резерве.

Указанный способ имитации состояний элементов позволяет сэкономить компьютерную память и сократить количество операторов имитационной программы.

Регистр  $T_{от}$ . Предназначен для хранения моментов отказов элементов, находящихся в очереди на восстановление.

Регистр  $S$  укрупненных состояний элементов  $y_i^0(t)(i=\overline{1,n})$ . Здесь для каждого элемента системы в зависимости от его состояния хранится «0», если элемент не функционирует (находится в резерве, в очереди на восстановление или восстанавливается), и «1», если элемент функционирует.

Кроме указанных выше регистров, для обеспечения имитации процесса восстановления элементов 1-й группы необходимо предусмотреть две ячейки памяти, где соответственно будут храниться число отказавших элементов ( $n_1$ ) и число свободных бригад ( $n_2$ ).

В процессе имитации в результате перехода системы из одного состояния в другое содержимые регистров  $T$ ,  $T_{от}$ ,  $S$  и ячеек  $n_1$ ,  $n_2$  обновляются – вместо старых значений записываются новые.

Всем элементам системы и соответствующим им ячейкам указанных регистров присваиваются порядковые номера следующим образом (табл. 1): 1...64 – элементам 1-й группы, 65...78 – элементам 2-й группы, 79...86 – элементам 3-й группы. Причём чётные номера  $k > 65$  присваиваются резервным грунтовыми насосам и соответствующим им ячейкам.

Работа моделирующего алгоритма сводится к следующему. Блок 1 (рис. 3) производит запись начальных значений в регистрах  $T_{от}$ ,  $S$ , в ячейках  $n_1$ ,

**Таблица.** Обозначения и порядковые номера элементов ТСИР  
**Table.** Designations and serial numbers of OGTS elements

№ элем. в ИМ Element in simulation model	Обозн. элем. на схеме Element symbol on the diagram	№ элем. в ИМ Element in simulation model	Обозн. элем. на схеме Element symbol on the diagram	№ элем. в ИМ Element in simulation model	Обозн. элем. на схеме Element symbol on the diagram	№ элем. в ИМ Element in simulation model	Обозн. элем. на схеме Element symbol on the diagram	№ элем. в ИМ Element in simulation model	Обозн. элем. на схеме Element symbol on the diagram
1	M <sub>1</sub>	7	M <sub>8</sub>	13	M <sub>22</sub>	19	M <sub>20</sub>	25	КД <sub>1</sub>
2	M <sub>5</sub>	8	M <sub>10</sub>	14	M <sub>7</sub>	20	M <sub>23</sub>	26	КД <sub>2</sub>
3	M <sub>6</sub>	9	M <sub>13</sub>	15	M <sub>9</sub>	21	M <sub>24</sub>	27	КД <sub>3</sub>
4	M <sub>2</sub>	10	M <sub>16</sub>	16	M <sub>11</sub>	22	MC <sub>1</sub>	28	КД <sub>4</sub>
5	M <sub>3</sub>	11	M <sub>17</sub>	17	M <sub>12</sub>	23	MC <sub>2</sub>	29	КД <sub>8</sub>
6	M <sub>4</sub>	12	M <sub>21</sub>	18	M <sub>14</sub>	24	MC <sub>3</sub>	30	КД <sub>10</sub>
31	КО <sub>2</sub>	37	КО <sub>16</sub>	43	СС <sub>3</sub>	49	СС <sub>9</sub>	55	СС <sub>16</sub>
32	КО <sub>3</sub>	38	КО <sub>17</sub>	44	СС <sub>4</sub>	50	СС <sub>10</sub>	56	СС <sub>17</sub>
33	КО <sub>9</sub>	39	КО <sub>21</sub>	45	СС <sub>5</sub>	51	СС <sub>11</sub>	57	СС <sub>20</sub>
34	КО <sub>1</sub>	40	КО <sub>22</sub>	46	СС <sub>6</sub>	52	СС <sub>12</sub>	58	СС <sub>21</sub>
35	КО <sub>12</sub>	41	СС <sub>1</sub>	47	СС <sub>7</sub>	53	СС <sub>13</sub>	59	СС <sub>22</sub>
36	КО <sub>14</sub>	42	СС <sub>2</sub>	48	СС <sub>8</sub>	54	СС <sub>14</sub>	60	СС <sub>23</sub>
61	СС <sub>24</sub>	67	ГН <sub>20</sub>	73	ГН <sub>12</sub>	79	ГН <sub>5</sub>	85	ГН <sub>11</sub>
62	СС <sub>25</sub>	68	ГНР <sub>20</sub>	74	ГНР <sub>12</sub>	80	ГНР <sub>5</sub>	86	ГНР <sub>11</sub>
63	СС <sub>26</sub>	69	ГН <sub>23</sub>	75	ГН <sub>14</sub>	81	ГН <sub>6</sub>	–	–
64	СС <sub>27</sub>	70	ГНР <sub>23</sub>	76	ГНР <sub>14</sub>	82	ГНР <sub>6</sub>	–	–
65	ГН <sub>13</sub>	71	ГН <sub>9</sub>	77	ГН <sub>24</sub>	83	ГН <sub>7</sub>	–	–
66	ГНР <sub>13</sub>	72	ГНР <sub>9</sub>	78	ГНР <sub>24</sub>	84	ГНР <sub>7</sub>	–	–



**Рис. 2.** Укрупненная блок-схема имитационной модели процесса изменения работоспособности элементов ТСИР

**Fig. 2.** The integrated block diagram of the simulation model of the change in working capacity of OGTS elements

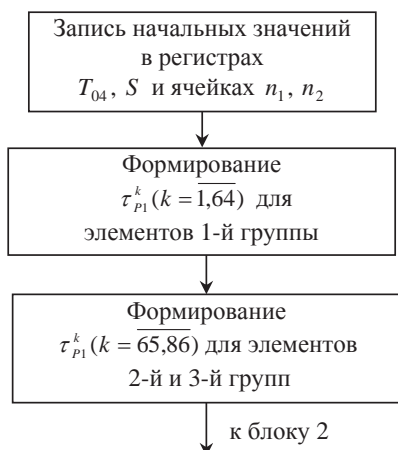


Рис. 3. Структура блока 1

Fig. 3. The structure of unit 1

$n_2$  и в соответствии с заданными функциями распределения  $G_i(\tau_p)$  ( $i=1,86$ ) формирует моменты первых отказов основных элементов. Значения первых моментов отказов записываются в регистре  $T$ , который является составной частью блока управления. Блок управления (рис. 4) определяет ближайший момент  $t_j$  изменения состояния системы, запоминает номер элемента  $k_{\min}$  с наименьшим значением  $t_j$ , устанавливает характер совершенного события ( $t_j > 0$  – отказ,  $t_j < 0$  – восстановление) и пе-

редает управление соответствующему блоку моделирующего алгоритма.

Процесс отказов и восстановления элементов каждой группы имитируется соответствующим единственным блоком, включающим два модуля. При отказе какого-либо элемента системы вступает в действие один из модулей  $3^6, 4^6, 5^6$ , который имитирует процесс восстановления отказавшего элемента, т. е. формирует момент окончания его восстановления  $t_B^k$  и определяет новое состояние  $z_i(y_i^0)$ . В случае окончания восстановления отказавшего элемента управление передается одному из модулей  $3^a, 4^a, 5^a$ , который для него формирует момент ближайшего отказа  $t_0^k$  и определяет новое состояние  $z_i(y_i^0)$ . После функционирования любого из указанных модулей управление снова передается блоку управления.

Определение последовательности системных событий (регламентация), происходящих в процессе имитации, состоит в выборе из регистра  $T$  наименьшего момента времени  $t^{\min}$ , распознавании свершенного события и передаче управления соответствующему модулю.

Адрес модуля и его настройка на очередной элемент в процессе имитации определяются номером элемента с наименьшим моментом  $t^{\min}$  и характером перехода в новое состояние.

Рассмотрим работу модулей блоков 3, 4, 5, блок-схемы которых представлены на рис. 5–10.

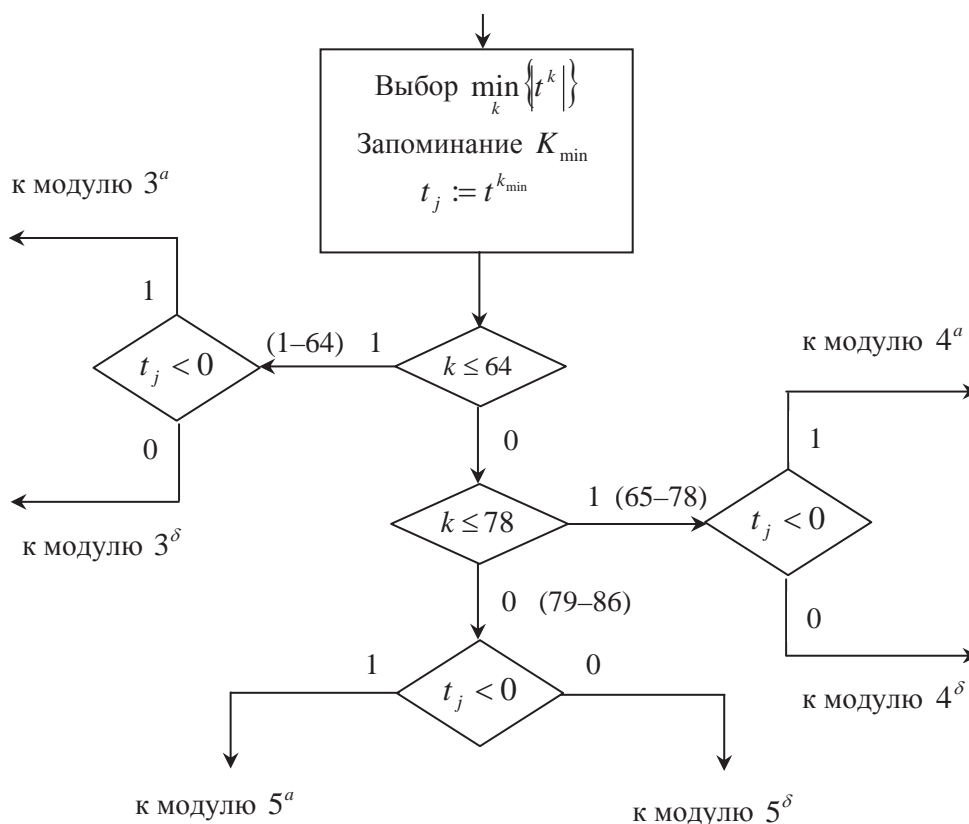


Рис. 4. Структура блока управления

Fig. 4. The structure of the control unit

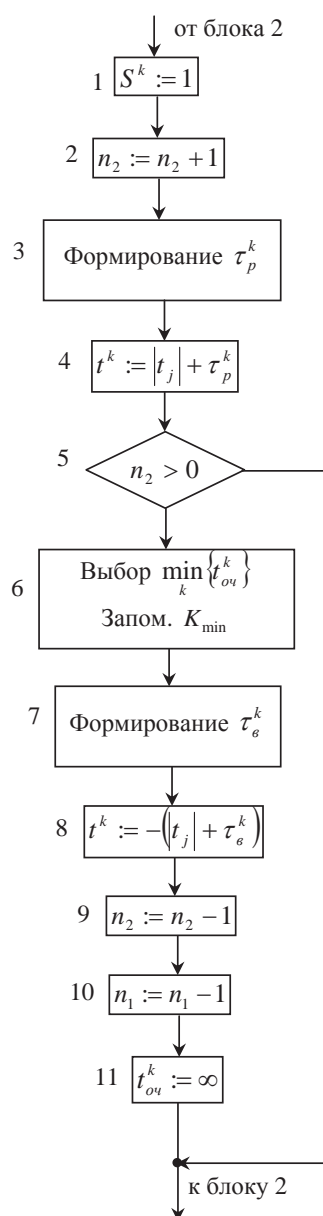


Рис. 5. Блок-схема модуля  $3^5$

Fig. 5. The block diagram of module  $3^5$

Модуль  $3^6$ , который вступает в действие при отказе элементов 1-й группы ( $k \leq 64$ ), функционирует следующим образом. Оператор 1 фиксирует состояние отказавшего элемента, засылая «0» в соответствующую ячейку регистра  $S$ . Затем оператор 2 проверяет выполнение условия  $n_2 > 0$  (наличие свободных ремонтных бригад). При отсутствии свободных бригад отказавший элемент ставится в очередь (операторы 3, 4), вследствие чего содержимое ячейки  $n_1$  (число отказавших элементов) увеличивается на единицу. При наличии свободных бригад ( $n_2 > 0$ ) оператор 6 для отказавшего элемента формирует случайный интервал времени восстановления  $\tau_B^k$  согласно  $F_k(\tau_B)$ , а оператор 7 определяет момент окончания восстановления  $t_B^k$  и с отрицатель-

ным знаком засылает его в регистр  $T$ . Поскольку одна ремонтная бригада выделялась для ремонта отказавшего элемента, оператор 8 на единицу уменьшает содержимое ячейки  $n_2$ , где хранится число свободных бригад. Затем опять вступает в действие блок управления.

По окончании восстановления какого-либо элемента 1-й группы вступает в действие модуль  $3^a$ , который функционирует следующим образом. Оператор 1 фиксирует состояние восстановленного элемента, а оператор 2 прибавляет число свободных бригад на единицу, имитируя освобождение бригады. Затем оператор 3 для восстановленного элемента формирует очередной случайный интервал времени работы  $\tau_p^k$ , на основании чего оператор 4 определяет момент следующего отказа  $t_0^k = t_j + \tau_p^k$  и записывает в регистре  $T$ . При наличии отказавших элементов, ожидавших восстановления (этот факт устанавливается оператором 5), оператор 6 определяет номер элемента, который отказал раньше всех, затем операторы 7 и 8 для него формируют момент окончания восстановления  $t_B^k = |t_j| + \tau_B^k$ , который с отрицательным знаком засылается в регистр  $T$ . После этого операторы 9 и 10 изменяют число отказавших элементов и свободных бригад, а оператор 11 фиксирует выход из очереди восстановленного элемента. При отсутствии очереди управление от оператора 5 непосредственно передается блоку 2.

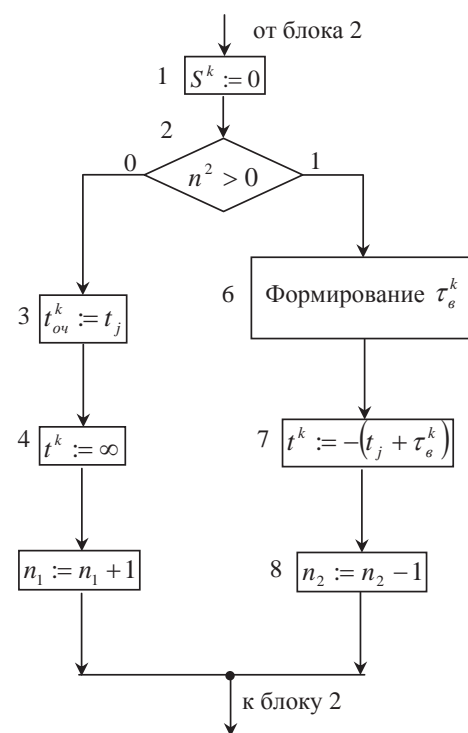


Рис. 6. Блок-схема модуля  $3^6$

Fig. 6. The block diagram of module  $3^6$

Теперь перейдем к описанию работы блока 4. Модуль  $4^6$ , предназначенный для имитации процесса восстановления элементов 2-й группы, функ-

ционирует следующим образом. При отказе  $k$ -го элемента ( $65 \leq k \leq 78$ ) оператор 1 фиксирует его состояние, засылая «0» в регистр  $S$ . Затем оператор 2 для отказавшего элемента в соответствии с  $F_k(\tau_p)$  формирует случайный интервал времени восстановления  $\tau_p^k$ . Далее оператор 3 определяет момент окончания восстановления для  $k$ -го элемента  $t_B^k = t_j + \tau_p^k$  и с отрицательным знаком засылает в  $k$ -ю ячейку регистра  $T$ . Если отказавший элемент является основным (это условие проверяется оператором 4), то оператор 8 проверяет, впервые ли отказал  $k$ -й элемент. При первом отказе  $k$ -го элемента операторы 9 и 10 формируют момент возникновения первого отказа для  $(k+1)$ -го резервного элемента, а оператор 11 изменяет его состояние (имитируется первое включение резервного насоса). Если основной насос отказывает не впервые, то оператор 7 проверяет состояние резервного насоса и в случае работоспособности передает управление оператору 11, который имитирует его включение. В случае неработоспособности резервного насоса управление непосредственно передается блоку 2. Заметим, что если основной насос отказывает не впервые, то момент отказа резервного насоса формируется модулем 4<sup>а</sup>. Если при отказе  $k$ -го резервного насоса основной  $(k-1)$ -й находится в работоспособном состоянии (это условие проверяет оператор 5), то оператор 6 имитирует его включение вместо резервного. В противном случае управление передается блоку 2.

Работа модуля 4<sup>а</sup> заключается в следующем. По окончании восстановления  $k$ -го основного насоса в случае работоспособности резервного насоса для него определяется момент отказа  $t_0^k = |t_j| + \tau_p^k$  и засылается в  $k$ -ю ячейку регистра (операторы 1, 2, 7, 8). В случае неработоспособности резервного насоса оператор 5 для основного определяет момент отказа и засылает в регистр  $T$ , а оператор 6 фиксирует его состояние. В случае окончания восстановления резервного насоса оператор 3 проверяет состояние основного насоса. Если он работоспособен, то оператор 4 определяет момент отказа для резервного насоса  $t_0^k = t^{k+1} + \tau_p^k$  и засылает в регистр  $T$ . В противном случае вступают в действие операторы 5, 6, которые имитируют включение резервного насоса вместо основного.

Модуль 5<sup>б</sup> работает следующим образом. При отказе  $k$ -го элемента ( $79 \leq k \leq 86$ ) оператор фиксирует его состояние. Затем операторы 2, 3 для него формируют момент окончания восстановления  $t_B^k = t_j + \tau_p^k$  и с отрицательным знаком засылают в регистр  $T$ . Если отказавший насос является основным (оператор 4), то оператор 5 проверяет состояние  $(k+1)$ -го резервного. В случае работоспособности резервного насоса имитируется его включение вместо отказавшего. При этом операторы 6, 7 для резервного насоса формируют момент отказа и засылают в  $(k+1)$ -ю ячейку регистра  $T$ , а оператор 8 изменяет его состояние. Если в момент отказа основного элемента резервный находится в неработоспособном состоянии, то оператор 5 управление

передает блоку 2. По окончании восстановления любого элемента 3-й группы ( $79 \leq k \leq 86$ ) вступает в действие модуль 5<sup>а</sup>. После формирования оператором 1 очередного случайного интервала времени работы  $\tau_p^k$  для восстановленного элемента оператор проверяет, является ли он основным. Если восстанавливается основной насос, то операторы 7–11 имитируют его включение вместо резервного. Если же восстановленный насос является резервным, то оператор 3 проверяет состояние  $(k-1)$ -го основного насоса. В случае неисправности основного насоса операторы 4 и 5 имитируют включение вместо него резервного. В противном случае восстановленный насос ставится в резерв (оператор 6).

Таким образом, в процессе имитации последовательно формируются случайные моменты времени  $t_j$  и бинарный вектор укрупненных состояний ТСИР  $y^0(t_j)$ .

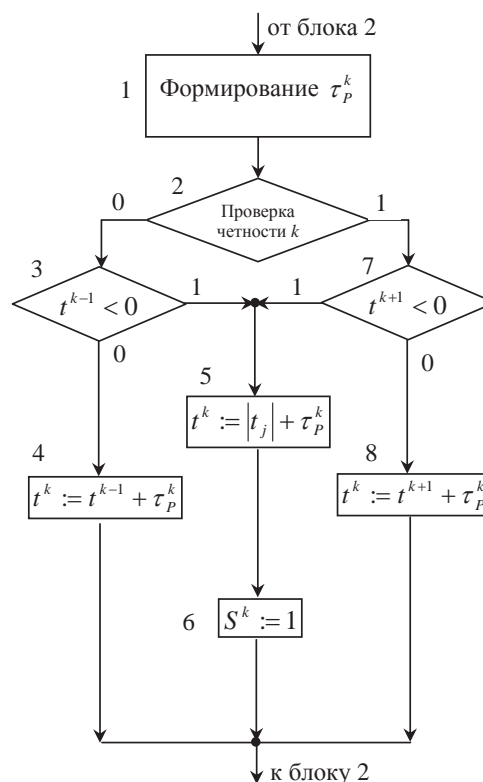


Рис. 7. Блок-схема модуля 4<sup>а</sup>

Fig. 7. The block diagram of module 4<sup>a</sup>

Формирование в процессе имитации случайных интервалов времени работы и времени восстановления элементов основывается на генерации и преобразовании случайных чисел  $r_i$ , равномерно распределенных в интервале  $(0,1)$ . С использованием этого способа разработаны алгоритмы формирования случайных интервалов времени работы  $\tau_p^k$  и времени восстановления  $\tau_B^k$  для элементов каждой группы. При этом для формирования возможных значений случайного интервала времени  $\tau$  с заданным законом распределения использовались следующие формулы, предложенные в [13–19]:

- при экспоненциальном распределении –  

$$\tau = -\frac{1}{\lambda} \ln r;$$
- при распределении Вейбулла –  $\tau = \frac{1}{\alpha} \sqrt{-\ln r};$
- при распределении Релея –  $\tau = \sigma \sqrt{-2 \ln r};$
- при логарифмически-нормальном распределении –  

$$\tau = \exp((\mu + \sigma V) / \lg e);$$

где  $V = \sum_{i=1}^{12} r_i - 6$  – нормально распределенная случайная величина с параметрами (0,1).

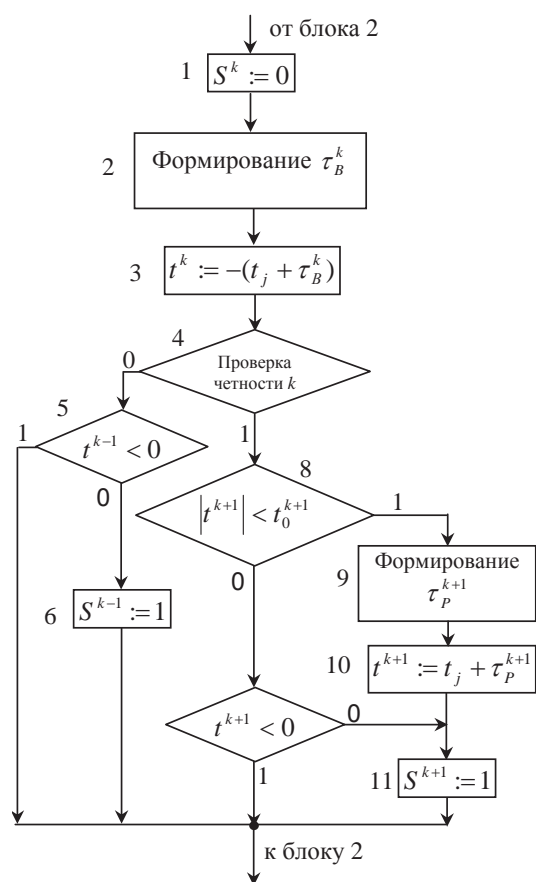


Рис. 8. Блок-схема модуля 4<sup>б</sup>

Fig. 8. The block diagram of module 4<sup>b</sup>

Разработанная имитационная модель процесса изменения работоспособности оборудования ТСИР реализована на языке C++ и в среде LabVIEW на компьютере Pentium i7. С целью проверки адекватности модели использовались известные методы валидации и верификации [15–20] по отношению как к исходным статистическим данным, компонентам модели, так и к имитационной модели в целом, включая проверку статистических гипотез с применением критериев Стьюдента, Крускала–Уоллиса, Пирсона [9–12].

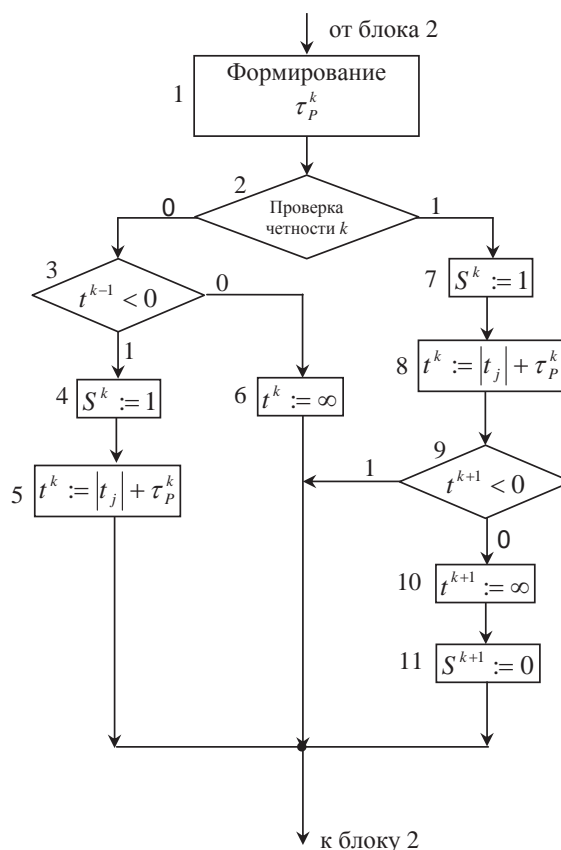


Рис. 9. Блок-схема модуля 5<sup>б</sup>

Fig. 9. The block diagram of module 5<sup>b</sup>

Дискретно-событийный характер и модульная структура имитационной модели позволили легко применить один из наиболее мощных методов верификации – трассировку. При использовании этого метода, после возникновения каждого системного события, характеристики состояния моделируемой системы выводились на экран и сравнивались с результатами теоретических вычислений.

Разработанная имитационная модель была использована в составе компьютерной модели для оценки и анализа эффективности функционирования ТСИР ЗММК [8] и компьютерной модели для стохастического управления процессом флотации руды с учетом влияния надежности измельчительного оборудования [6].

### Заключение

Предложенная процедура формализации процесса изменения работоспособности оборудования ТСИР позволяет осуществить его имитацию путем имитации элементарных случайных процессов возникновения отказов и восстановления отдельных элементов с сохранением их логической структуры и последовательности протекания во времени.

На основании статистических данных об эксплуатационной надежности измельчительного

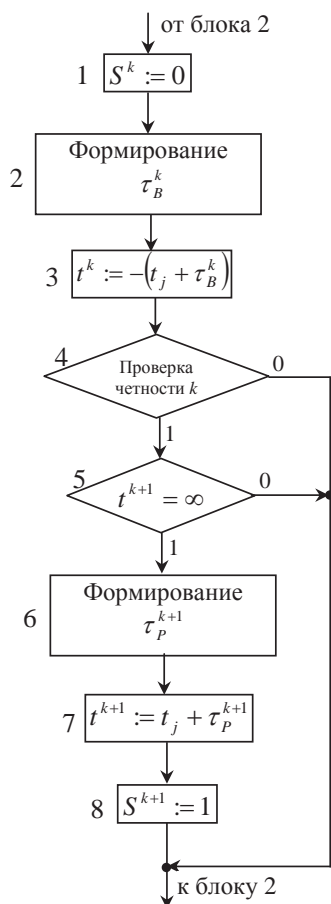


Рис. 10. Блок-схема модуля 5<sup>6</sup>

Fig. 10. The block diagram of module 5<sup>6</sup>

оборудования, полученных за трехлетний период эксплуатации ТСИР ЗММК, методом идентификации построены адекватные математические моде-

ли процессов возникновения отказов и восстановления ее оборудования.

Применение модульного принципа и регистравого метода моделирования позволило обеспечить универсальность разработанной имитационной модели, что предоставляет возможность использовать ее в составе компьютерных моделей для исследования эффективности функционирования аналогичных систем измельчения руды.

С использованием статистических критериев, а также методов валидации и верификации установлены адекватность и пригодность разработанной имитационной модели для практического пользования.

Использование разработанной имитационной модели в составе компьютерной модели для исследования эффективности функционирования ТСИР ЗММК показало, что модель адекватна и практически пригодна для решения следующих прикладных задач:

- оценка степени снижения эффективности функционирования ТСИР вследствие отказов ее оборудования;
- оценка коэффициентов важности измельчительного оборудования;
- выбор наилучшего варианта резервирования грунтовых насосов;
- определение наилучшей структуры резервных связей между измельчительными агрегатами;
- определение оптимального количества ремонтных бригад и рациональной дисциплины восстановления отказавшего оборудования.

Применение разработанной имитационной модели в составе компьютерной модели управления технологическим процессом флотации медно-молибденовых руд ЗММК позволило учитывать влияние отказов измельчительного оборудования и тем самым повысить точность управления.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Курбатова О.А., Ксендзенко Л.С., Николайчук Д.Н. Надежность горных машин: учебное пособие. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2005. – 119 с.
2. Карепов В.А., Безверхая Е.В., Чесноков В.Т. Надежность горных машин и оборудования: учебное пособие. – Красноярск: Изд-во СФУ, 2012. – 134 с.
3. Боярских Г.А. Надежность горных машин и оборудования. – Екатеринбург: УГТУ, 2009. – 116 с.
4. Разработка и применение АСУ процессами обогащения полезных ископаемых / В.В. Морозов, В.П. Топчаев, К.Я. Улитенко, З. Ганбаатар, Л. Дэлгэрбат. – М.: Изд. дом «Руда и металлы», 2013. – 512 с.
5. Авдохин В.М. Основы обогащения полезных ископаемых. Том 1. Обогащительные процессы. – М.: Изд-во «Горная книга», 2014. – 417 с.
6. Баласанян С.Ш., Симонян С.О., Геворгян Э.М. Компьютерная модель для стохастического управления технологическим процессом флотации руды с учетом надежности измельчительного оборудования // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323. – № 5. – С. 50–57.
7. Баласанян С.Ш. Компьютерная модель процесса возникновения отказов и восстановления оборудования системы измельчения руды // Цветные металлы. – 2012. – № 7. – С. 82–86.
8. Баласанян С.Ш. Стратифицированная модель для оценки и анализа эффективности функционирования сложных технологических систем со многими состояниями // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 318. – № 5. – С. 25–30.
9. Statistical Reliability Engineering / B. Gnedenko, I. Ushakov, I.V. Pavlov, S. Chakravanty. – Hoboken (New Jersey): Wiley, 1999. – 528 p.
10. Вентцель Е. Теория вероятностей. – М.: Высшая школа, 2002. – 575 с.
11. Ushakov I. Handbook of Reliability Engineering. – Hoboken (New Jersey): Wiley, 1994. – 704 p.
12. Ushakov I. Probabilistic Reliability Models. – Hoboken (New Jersey): Wiley, 2012. – 248 p.
13. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем – искусство и наука. – М.: Мир, 1978. – 418 с.
14. Fishman G. Discrete-Event Simulation Modeling, Programming, and Analysis. – London: Springer, 2001. – 537 p.

15. Averill M. Law, W. David Kelton Simulation Modeling and Analysis. – Boston: McGraw–Hill, 2007. – 768 p.
16. Zio E. The Monte Carlo Simulation Method for System Reliability and Risk Analysis. – London: Springer, 2013. – 198 p.
17. Simulation Methods for Reliability and Availability of Complex Systems / J. Faulin, A.A. Juan, S. Martorella, J.-E. Ramires-Markes. – London: Springer, 2010. – 315 p.
18. Myers A. Complex System Reliability. Multichannel Systems with Imperfect Fault Coverage. – London: Springer, 2010. – 240 p.
19. Cantot P., Luzeaux D. Simulation and Modeling of Systems of Systems. – Bagneux, France: DGA/UMTER, 2011. – 400 p.
20. Rubinstein R., Kroese D. Simulation and the Monte Carlo Method. – Hoboken (New Jersey): Wiley, 2008. – 372 p.

*Поступила 09.12.2015 г.*



UDC 622.73:519.718:581.51

## SIMULATION MODEL OF CHANGING WORKING CAPACITY OF GRINDING EQUIPMENT

Seyran Sh. Balasanyan,

National polytechnic university of Armenia,  
28, Baghaberd Streee, Kapan, 3307, Armenia.

E-mail: seyran@sunicom.net

Hermine M. Gevorgyan,

National polytechnic university of Armenia,  
28, Baghaberd Streee, Kapan, 3307, Armenia.

E-mail: hermine79@rambler.ru

The relevance of the discussed issue is caused by the necessity to develop the simulation model of equipment working capacity change in ore grinding technological systems (OGTS), which is the part of a computer model, for evaluation and analysis of its functioning efficiency considering the influence of equipment reliability indicators.

**The main aim** of the study is to develop a simulation model of the ore grinding equipment working capacity change, formalized in the form of a random process of failures and recoveries, based on statistical data on failures and recoveries of grinding equipment of Zangezour copper molybdenum center («ZCMC» JSC, Armenia).

**The methods used in the study:** theory of reliability, applied statistics, method of simulation modeling.

**The results.** The authors have proposed the procedure of formalization, which allows formally introducing the change in working capacity of ore grinding equipment in the form of a random process of failures and recoveries. The composition of OGTS ZCMC was determined and the laws of working time distribution between neighboring failures and recovery time of grinding equipment were identified on the basis of statistical data on failures and recoveries of grinding equipment. Using the principle of special states the author developed the simulation model of the change in working capacity of ore grinding equipment. This model reproduces on the computer a random process of failures and recoveries of the failed equipment of OGTS in accordance with the identified distribution laws of the working time between neighboring failures and recovery time of the failed grinding equipment. Owing to the application of the modular principle and the register-based modeling method the developed modeling algorithm has compactness and certain versatility. This provides the ability to use the developed simulation model as part of computer models for evaluation and study the functioning efficiency of similar ore grinding systems. The authors estimated the adequacy of the model using the validation and verification methods with respect to the source statistical data, individual components, and simulation model in the whole. The developed simulation model was used in the computer model for evaluation and analysis of functioning efficiency of OGTS ZCMC and in the model for stochastic control of ore flotation considering the influence of indicators of equipment reliability.

**Key words:**

Ore grinding, grinding equipment, random process, reliability, failure, recovery, simulation model, adequacy, validation, verification.

## REFERENCES

1. Kurbatova O.A., Ksendzenko L.S., Nikolaychuk D.N. *Nadezhnost gornykh mashin* [Reliability of mining machines]. Vladivostok, DVSTU Publ., 2005. 119 p.
2. Karepov V.A., Bezverkhaya E.V., Chesnokov V.T. *Nadezhnost gornykh mashin i oborudovaniya* [Reliability of mining machines and equipment]. Krasnoyarsk, SFU Publ., 2012. 134 p.
3. Boyarskikh G.A. *Nadezhnost gornykh mashin i oborudovaniya* [Reliability of mining machines and equipment]. Ekaterinburg, UGTU Publ., 2009. 116 p.
4. Morozov V.V., Topchaev V.P., Ulitenko K.Ya., Ganbaatar Z., Delgerbat L. *Razrabotka i primenenie avtomatizirovannykh sistem upravleniya protsessami obogashcheniya poleznykh iskopaemykh* [The development and application of automated control process of mineral processing]. Moscow, Ruda i Metally Publ., 2013. 512 p.
5. Avdokhin V.M. *Osnovy obogashcheniya poleznykh iskopaemykh. T. 1. Obogatitelnye protsessy* [The fundamentals of mineral processing. Vol. 1. Mineral processing]. Moscow, Gornaya kniga Publ., 2014. 417 p.
6. Balasanyan S.Sh., Simonyan S.O., Gevorgyan H.M. *Kompyuternaya model dlya stokhasticheskogo upravleniya tekhnologicheskimi protsessom flotatsii rudy s uchedom nadezhnosti izmelchitel'nogo oborudovaniya* [Computer model for stochastic control of ore flotation considering grinding equipment reliability]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 323, no. 5, pp. 50–57.
7. Balasanyan S.Sh. *Kompyuternaya model protsessa vozniknoveniya otkazov i vosstanovleniya oborudovaniya sistemy izmelcheniya rudy* [A computer model of the failure and recovery processes of ore grinding system equipment]. *Tsvetnye metally*, 2012, no. 7, pp. 82–86.
8. Balasanyan S.Sh. *Stratifikirovannaya model dlya otsenki i analiza effektivnosti funktsionirovaniya slozhnykh tekhnologicheskikh sistem so mnogimi sostoyaniyami* [A stratified model for evaluation and analysis of the functioning effectiveness of multi-state complex technological systems]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2011, vol. 318, no. 5, pp. 25–30.
9. Gnedenko B., Ushakov I., Pavlov I., Chakravanty S. *Statistical Reliability Engineering*. Hoboken (New Jersey), Wiley, 1999. 528 p.
10. Ventsel E.S. *Teoriya veroyatnostey* [The probability theory]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2002. 575 p.
11. Ushakov I. *Handbook of Reliability Engineering*. Hoboken (New Jersey), Wiley, 1994. 704 p.
12. Ushakov I. *Probabilistic Reliability Models*. Hoboken (New Jersey), Wiley, 2012. 248 p.
13. Shannon R. *Imitatsionnoe modelirovanie sistem – iskusstvo i nauka* [Simulation systems – the art and science]. Moscow, Mir Publ., 1978. 418 p.
14. Fishman G. *Discrete-Event Simulation Modeling, Programming, and Analysis*. London, Springer, 2001. 537 p.
15. Averill M. Law, W. David Kelton *Simulation Modeling and Analysis*. Boston, McGraw-Hill, 2007. 768 p.
16. Zio E. *The Monte Carlo Simulation Method for System Reliability and Risk Analysis*. London, Springer, 2013. 198 p.

17. Faulin J., Juan A.A., Martorella S., Ramires-Markes J.-E. *Simulation Methods for Reliability and Availability of Complex Systems*. London, Springer 2010. 315 p.
18. Myers A. *Complex System Reliability. Multichannel Systems with Imperfect Fault Coverage*. London, Springer, 2010. 240 p.
19. Cantot P., Luzeaux D. *Simulation and Modeling of Systems of Systems*. Bagnaux, France, DGA/UMTER, 2011. 400 p.
20. Rubinstein R., Kroese D. *Simulation and the Monte Carlo Method*. Hoboken (New Jersey), Wiley, 2008. 372 p.

*Received: 9 December 2015.*

УДК 004.896

## ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ АЛГОРИТМОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДВУМЕРНЫХ ГЕОПОЛЕЙ

**Каковкин Павел Александрович,**

студент кафедры вычислительной техники Института кибернетики,  
Национального исследовательского Томского политехнического университета,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: nitrokot@mail.ru

**Друки Алексей Алексеевич,**

ассистент кафедры вычислительной техники Института кибернетики,  
Национального исследовательского Томского политехнического университета,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: druki2008@yandex.ru

**Актуальность исследования** обусловлена необходимостью разработки алгоритмов и программных средств, позволяющих повысить эффективность пространственного анализа и восстановления двумерных геополей.

**Цель работы:** разработка алгоритмов и программных средств, позволяющих повысить эффективность восстановления двумерных геополей по не регулярной сети точечных данных; проведение экспериментальных исследований эффективности разработанных алгоритмов и сравнение с существующими аналогами.

**Методы исследования.** Для решения поставленной задачи применяются методы искусственного интеллекта, методы реализации искусственных нейронных сетей и генетических алгоритмов, комитетные методы – для решения задач классификации, математическое моделирование, теория вероятностей и математическая статистика с использованием программного обеспечения VisualStudio и Surfer.

**Результаты.** Для восстановления геополей по нерегулярной сети точечных данных было решено использовать методы искусственного интеллекта, так как данная область исследований на сегодняшний день является одной из наиболее интенсивно развивающихся. Таким образом, для решения поставленной задачи был разработан алгоритм, основанный на искусственных нейронных сетях. Алгоритм представляет собой последовательность действий, состоящую из семи шагов. Для восстановления геополей применяются несколько нейронных сетей прямого распределения типа персептрон, работающих по методу бэджинга (backing). На основе предложенного алгоритма разработано программное приложение, позволяющее выполнять восстановление геополей по нерегулярной сети точечных данных. Выполнено экспериментальное исследование эффективности разработанного алгоритма и проведено сравнение с результатами работы метода обратно-взвешенных расстояний. Проведенные исследования показали, что результаты работы предложенного алгоритма превышают эффективность работы метода обратно-взвешенных расстояний.

**Ключевые слова:**

Геоинформатика, восстановление геополей, методы геостатистики, кросс-валидация, искусственные нейронные сети.

### Восстановление геополя

На сегодняшний день одной из наиболее интенсивно развивающихся и актуальных областей в геоинформатике является анализ пространственных данных, описывающих непрерывные поверхности. Данные поверхности могут описывать распределение в пространстве высот рельефа местности, температуры, давления и т. д. Поверхности, которые описываются функцией от двух пространственных координат, в геоинформатике называются двумерными геополями [1–2].

Цифровая модель геополя представляет собой набор пространственных данных, описывающих непрерывные поверхности. Пространственный анализ геополей предполагает анализ и сопоставление разнородных пространственных данных и выявление взаимосвязи между ними [3]. Для этого применяются различные методы и алгоритмы, позволяющие формировать карты признаков геополей, определять различные пространственные закономерности исследуемых поверхностей.

Важным классом задач в данной области исследований являются задачи восстановления поверхности геополей, которые сводятся к поиску значе-

ний поверхности в точках, где измерения не проводились по каким-либо причинам [3]. Их решением занимались многие российские и зарубежные ученые, среди которых можно отметить М.Ф. Каневского [4], В.И. Аронова, О.Р. Мусина, В.В. Демьянова [4], D. Watson, V. Franklin [5], D. Douglas и др. Однако многие предложенные ими методы и алгоритмы восстановления оказываются недостаточно эффективными в реальных условиях. Поэтому задача разработки методов и алгоритмов, позволяющих повысить эффективность восстановления геополей, остается актуальной на сегодняшний день.

### Методы восстановления поверхности геополей

Задача восстановления поверхности геополя по нерегулярной сети точечных данных предполагает наличие исходных данных в виде сети точек с координатами  $s(x_i, y_i)$ ,  $i=1, \dots, n$  в двумерном пространстве и значение геополя  $f$  для каждой точки, которое необходимо восстановить [6].

Основная сложность решения данной задачи заключается в том, что обычно такая поверхность представляет собой набор точечных данных в виде нерегулярной сети, т. е. необходимая информация

об исследуемых объектах известна не во всех областях данной поверхности (рис. 1).

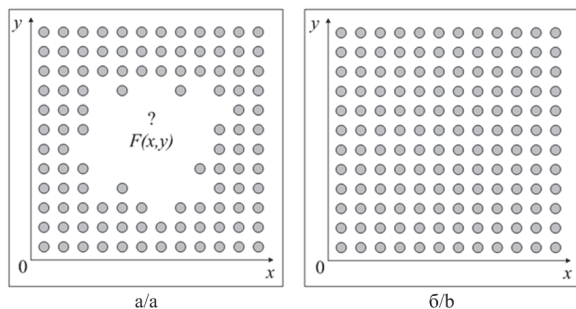


Рис. 1. Точечные данные, описывающие поверхность геополья: а) регулярная сеть точек; б) нерегулярная сеть точек

Fig. 1. Data points describing the surface of a geofield: а) regular network of points; б) irregular network of points

Данную задачу невозможно решить, если не иметь дополнительную информацию о природе и параметрах исследуемого геополья. На сегодняшний день существуют различные методы, применяемые в задачах анализа и восстановления геополья, основные из них: детерминистические и геостатистические.

Среди детерминистических методов, которые также называются интерполяторами, особенно популярна сплайн-интерполяция. Данный вид относится к классу глобальной интерполяции и применяется там, где исследуемая поверхность может быть описана детерминистической функцией на всей исследуемой области.

Однако эффективность данных методов снижается при наличии большого количества исходных данных (десятки и сотни тысяч точек) и если время вычисления детерминистической функции квадратично зависит от количества исходных данных. Поверхность, восстановленная с помощью глобальных интерполяторов, как правило, является заметно сглаженной, что также является недостатком. Также в данном случае возникает необходимость обоснования выбора интерполятора, что требует дополнительной информации о природе восстанавливаемой поверхности, а очень часто такие сведения слабо формализованы. Кроме того, в данных методах используется ряд параметров, которые требуют тщательной и осмысленной настройки.

Как показывает анализ предметной области, наиболее востребованными и эффективными являются геостатистические методы [7].

Геостатистические методы основаны на статистическом анализе пространственных данных и предназначены для построения вариограммы и восстановления неизвестного значения точки в исследуемой области.

Вариограмма описывает степень различия точечных данных в пространстве, основываясь на расстоянии между ними. С учетом пространственной непрерывности геополья два более удаленных друг от друга значения геополья будут менее коррелированы, чем два значения, находящиеся на малом расстоянии, т. е. чем ближе значения геополья (чем меньше разность между ними), тем больше значение вариограммы. Конечная цель применения метода вариографии заключается в построении теоретической модели вариограммы, т. е. в аналитической функции, которая описывает пространственные данные [7–8].

Далее следует этап восстановления геополья методом кригинга (от фамилии южноафриканского геолога Д. Криге). В этом геостатистическом методе интерполяции используются статистические параметры, которые были получены при построении вариограммы.

Для тестирования результатов восстановления геополья используется процедура кросс-валидации, которая заключается в следующем. Из исходного набора пространственных данных удаляется точка. С использованием оставшихся точек восстанавливается значение геополья в исключенной точке [9] (рис. 2).

Для тестирования результатов восстановления геополья используется процедура кросс-валидации, которая заключается в следующем. Из исходного набора пространственных данных удаляется точка. С использованием оставшихся точек восстанавливается значение геополья в исключенной точке [9] (рис. 2).

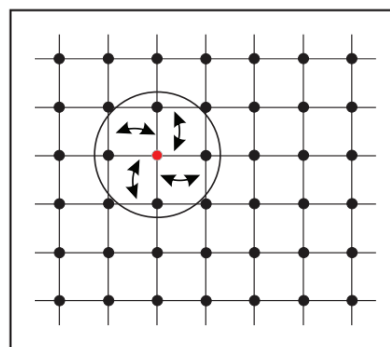


Рис. 2. Восстановление геополья посредством выполнения кросс-валидации

Fig. 2. Geofield restoring by cross-validation

После этого вычисляется величина среднеквадратичного отклонения между полученным значением геополья и исходным. Затем данная процедура повторяется для другой точки и т. д. Итоговая оценка кросс-валидации вычисляется как среднее значение ошибки по всем точкам исследуемого пространства [10]. Кросс-валидация является процессом, требующим больших временных затрат.

На основании экспериментальных исследований был сделан вывод, что при увеличении количества исходных точек более 700 время обработки данных при кросс-валидации стремительно увеличивается и становится недопустимо большим. Данные результаты получены на основе проведения 30 вычислительных экспериментов.

Процесс восстановления геополья методом кригинга реализуется следующим образом:

- 1) методом вариографии определяются входные параметры для метода кригинга: ранг, порог, эффект самородка и теоретическая модель вариограммы;
- 2) вычисляется значение геополья;
- 3) выполняется проверка результатов восстановления с использованием кросс-валидации;

4) если полученные результаты не удовлетворяют требованиям и ошибка восстановления слишком велика, то выполняется переход к шагу 1 [11].

Недостаток данного подхода заключается в длительности, рутинности и трудоемкости всего процесса. Значительная часть временных затрат приходится на проведение кросс-валидации [12].

На рис. 3 представлены результаты 20 численных экспериментов времени выполнения кросс-валидации в зависимости от количества исходных точек. При проведении вычислительных экспериментов не использовались методы параллельных вычислений. По рисунку видно, что при увеличении количества исходных точек до 1000 время выполнения одной итерации кросс-валидации резко увеличивается до не приемлемого уровня.

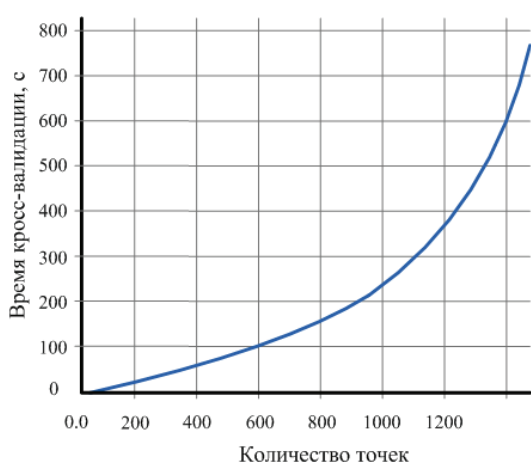


Рис. 3. График зависимости времени выполнения кросс-валидации от количества точечных данных

Fig. 3. Graph of the cross-validation time on the point data number

В результате проведенного анализа и выполнения вычислительных экспериментов можно сделать вывод, что одними из главных недостатков восстановления геополей методами геостатистики являются невысокая точность и большая трудоемкость процесса восстановления.

Исходя из недостатков вышеописанных методов, для решения задачи восстановления поверхности геополей было решено использовать методы искусственного интеллекта, а именно искусственные нейронные сети (ИНС). Данный выбор был сделан исходя из возможности настройки оптимальных параметров ИНС (процесс обучения), что может сделать процесс восстановления геополей более автоматизированным, снизить трудоемкость и повысить его точность.

#### Разработка алгоритма восстановления геополей на основе искусственных нейронных сетей

На рис. 4 представлена обобщенная схема предложенного алгоритма восстановления геополей.

Рассмотрим каждый этап предложенного алгоритма.

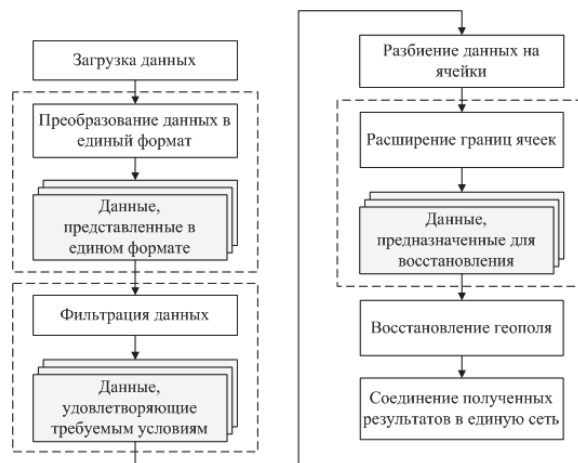


Рис. 4. Обобщенная схема предложенного алгоритма

Fig. 4. The generalized scheme of the proposed algorithm

1. **Загрузка исходных данных.**
2. **Преобразование данных.** Данные, представленные в различных форматах, преобразовываются в единый формат. Такой формат предполагает представление каждого элемента исходного набора данных в виде параметров  $s$  и  $f$ , которые обозначают координаты точки  $(x, y)$  в двумерном пространстве и значение геополя для данной точки [13].
3. **Фильтрация данных.** Из набора полученных данных удаляются точки, которые расположены вне исследуемой области и параметры которых не соответствуют заданным условиям. Далее находятся группы точек, расстояние между которыми меньше заданной величины и заменяются одной точкой. Значение геополя в данной области вычисляется в соответствии с заданным правилом.
4. **Разбиение пространственных данных на ячейки с равномерным заданным шагом** (рис. 5). Данное действие осуществляется для более тщательного последующего анализа исходных данных в каждой отдельной ячейке и сокращения вычислительных затрат [14]. Такие параметры, как количество и величина ячеек, в значительной степени могут влиять на качество восстановления геополя. Данные параметры задаются в интерфейсе пользователя.

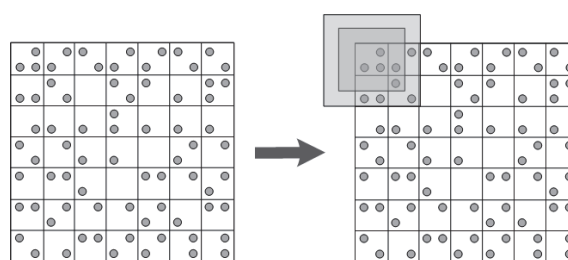


Рис. 5. Разбиение сети точечных данных на ячейки и последующее расширение границ ячеек

Fig. 5. Splitting a point data network on cells and subsequent expansion of the cells boundaries

5. *Расширение границ ячеек.* Данный этап предназначен для учета точек, лежащих в соседних ячейках. Это осуществляется для расширения анализа исследуемой области и получения более сглаженных результатов. Если в ячейке находится менее трех точек, то выполняется расширение границ ячейки до тех пор, пока исследуемая область не будет охватывать необходимое количество точек. Данные параметры также задаются в интерфейсе пользователя.
6. *Восстановление геополя.* С помощью ИНС вычисляется значение регулярной сети точечных данных в каждой ячейке.
7. После вычисления точечных данных во всех ячейках, выполняется соединение полученных результатов в единую сеть.

**Разработка нейронной сети для восстановления точечных данных**

Искусственная нейронная сеть (ИНС) представляет собой математическую, программную или аппаратную модель, функционирующую по принципу биологических нервных клеток человеческого организма. ИНС имеют иерархическую структуру и состоят из простых взаимодействующих между собой процессоров, называемых нейронами, которые сгруппированы в слои. Каждый нейрон имеет входные и выходные связи, ведущие к нейронам соседних слоев. Данные связи называются синаптическими и характеризуются определенными весовыми коэффициентами [15–16].

Значение нейрона при прямом проходе по ИНС определяется как взвешенная сумма его входных значений:

$$S = \sum_{i=1}^N x_i w_{ij},$$

где  $x_i$  – текущий выход  $i$ -го нейрона;  $w_{ij}$  – весовой коэффициент между  $i$ -м и  $j$ -м нейронами [16].

Каждый нейрон определяется функцией активации, которая предназначена для определения зависимости сигнала на выходе нейрона от взвешенной суммы сигналов на его входах [16]. Пример стандартной логистической функции активации:

$$f(x) = \frac{1}{(1 + e^{-x})},$$

где  $s$  – взвешенная сумма входных значений нейрона.

Для всех данных из обучающей выборки, поступающих на вход нейронной сети, определяются их требуемые значения, которые затем сравниваются с текущими значениями, и вычисляется ошибка. Основным принципом обучения ИНС заключается в сведении к минимуму эмпирической ошибки классификации [16]:

$$E = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^N (t_i - x_i)^2,$$

где  $x_i$  – действительный выход  $i$ -го нейрона;  $t_i$  – желаемый выход  $i$ -го нейрона.

После этого на основе метода градиентного спуска вычисляется величина коррекции синаптических коэффициентов между нейронами [16]:

$$\Delta w_{ij} = -\eta \delta_i x_j,$$

где  $\delta_i$  – значение ошибки нейрона  $i$ ;  $x_j$  – текущий выход  $j$ -го нейрона;  $\eta$  – коэффициент скорости обучения,  $0 < \eta < 1$ .

Весовые коэффициенты изменяются до тех пор, пока ошибка не сведется к минимуму и станет меньше заданного порога.

При разработке оптимальной структуры нейронной сети и проведении вычислительных экспериментов было решено реализовать ансамбль нейронных сетей, работающих по методу бэггинга (bagging) [17]. Данный метод представляет собой совокупность отдельных базовых классификаторов, когда комитетное решение принимается на основе голосования или взвешенным усреднением решений отдельных классификаторов.

Метод бэггинга предполагает обучение классификаторов по принципу бутстреп (bootstrap), когда обучающая выборка разделяется на  $M$  равных непересекающихся частей, по количеству используемых классификаторов. Таким образом, каждый классификатор обучается на различных множествах данных. Также в данном подходе целесообразно применять классификаторы, имеющие различную архитектуру и конфигурацию.

Для решения поставленной задачи были разработаны пять нейронных сетей прямого распространения класса перцептрон (рис. 6).

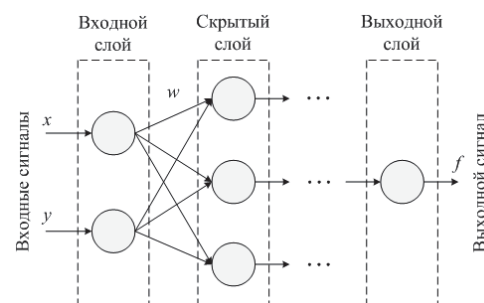


Рис. 6. Нейронная сеть прямого распространения

Fig. 6. Neural network of direct propagation

Разработанные нейронные сети имеют различную конфигурацию (таблица).

Таблица. Конфигурация нейронных сетей

Table. Configuration of neural networks

ИНС ANN	Количество нейронов в слоях Amount of neurons in the network					Функция активации Activation function
	1	2	3	4	5	
1	2	3	1	–	–	Лог-сигмоидная Log-sigmoid
2	2	3	3	3	1	
3	2	5	10	1	–	
4	2	5	5	10	1	Гиперболический тангенс Hyperbolic tangent
5	2	10	20	20	1	

ИНС – ANN (artificial neural network).

Входной слой нейронных сетей содержит два входа, на которые поступают значения  $(x, y)$  в двумерном пространстве. Выходной слой содержит один выход, на котором высчитывается значение геополя  $f$  в каждой точке пространства. Исходные значения синаптических весовых коэффициентов инициализированы случайным образом из диапазона от  $-0,1$  до  $+0,1$ . Начальная скорость обучения выбиралась в диапазоне от 0 до 1. В качестве функции ошибки ИНС использовалось среднеквадратичное отклонение.

Для обучения нейронных сетей использовался алгоритм обратного распространения ошибки (Back Propagation) [18], его модификации (Resilient propagation и Quick propagation) [19], а также несколько вариантов генетических алгоритмов (Genetic algorithm) [20] с различными параметрами.

Вычисление итогового значения осуществляется на основе сравнения результатов, полученных каждым классификатором. Если результаты классификаторов отличаются друг от друга на величину меньше заданного порога, то выполняется их взвешенное усреднение. Иначе осуществляется комитетный принцип голосования, когда решение принимается на основе большинства классификаторов, показавших схожий результат (т. е. результаты, отличающиеся друг от друга на величину меньше заданного порога).

#### Исследование результатов работы алгоритма

В процессе исследований выполнялось сравнение показателей точности восстановления геополей предложенным алгоритмом с классическим методом обратного-взвешенных расстояний. При проведении вычислительных экспериментов были сформированы различные наборы нерегулярных точечных данных. Некоторые наборы являются реальными данными, которые были получены из различных источников, другие были сформированы случайным образом. Для каждого сформированного набора выполнялось восстановление геополя. Регулярная сеть имеет размер  $50 \times 50$  ячеек. Для каждой восстановленной точки регулярной сети выполнялся расчет ошибки для двух сравниваемых методов.

На рис. 7 представлена динамика изменения ошибки восстановления геополя в зависимости от количества исходных точечных данных для сравниваемых методов.

Результаты получены на основе 30 численных экспериментов. Точность правильного восстановления геополя составляет около 93 %. Из рис. 7 следует, что ошибка восстановления геополя предложенным методом меньше ошибки, показанной методом обратного-взвешенных расстояний. Однако при использовании предложенного метода, если количество исходных точечных данных уменьша-

ется, ошибка стремительно возрастает, но при этом её значение остается ниже ошибки сравниваемого алгоритма.

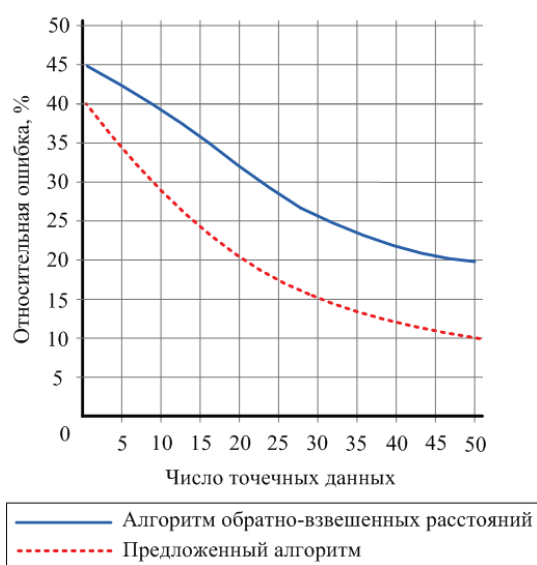


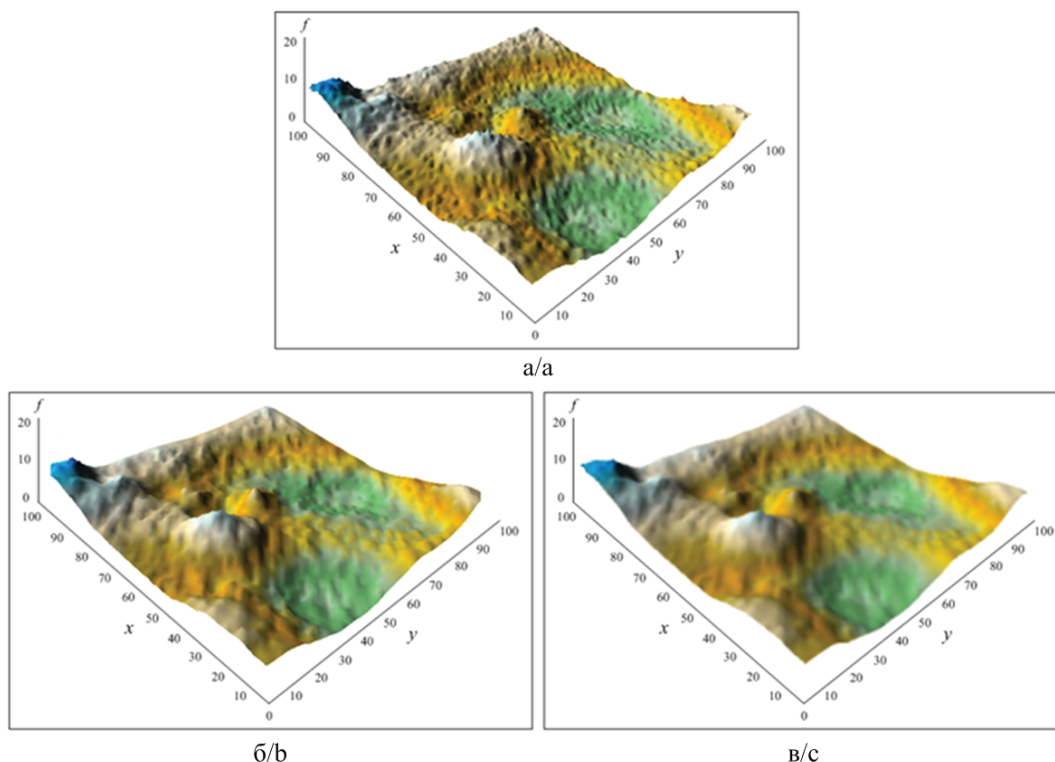
Рис. 7. Зависимость относительной ошибки восстановления геополя от количества точечных данных

Fig. 7. Dependence of the recovery geofield error on the number of data points

На рис. 8 представлен эталонный пример геополя и примеры восстановления данного геополя с помощью предложенного алгоритма и метода обратного-взвешенных расстояний.

По представленным выше рисункам можно сделать вывод, что оба алгоритма по качеству восстановления геополей примерно равны. Однако при более тщательном анализе можно заметить, что предложенный алгоритм показал более близкий к оригиналу вариант с достаточно подробным восстановлением мелких областей пространственных данных. Метод обратного-взвешенных расстояний показал более сглаженный результат с большей степенью усреднения некоторых областей пространственных данных. Однако скорость работы предложенного алгоритма в несколько раз ниже, чем у метода обратного-взвешенных расстояний. Средняя скорость работы предложенного алгоритма составила 5,2 с, скорость работы метода обратного-взвешенных расстояний – 0,47 с. При проведении вычислительных экспериментов не использовались методы параллельных вычислений.

Технические характеристики персонального компьютера, использованного для вычислительных экспериментов: процессор – Intel Pentium Quad Core 2.16 ГГц; ОЗУ – 2048 МБ; видеосистема – Intel GMA HD 512 Мб; операционная система – Microsoft Windows 8, 64-разрядная.



**Рис. 8.** Сравнение эффективности алгоритмов: а) эталонный пример геополя; б) предложенный алгоритм; в) метод обратно-взвешенных расстояний

**Fig. 8.** Comparison of algorithms efficiency: a) geofield benchmark; b) proposed algorithm; c) method of inverse-distance weighted

### Заключение

На сегодняшний день существуют различные методы и алгоритмы восстановления геополей по точечным данным. Наибольшее распространение и популярность получили детерминистические и геостатистические методы пространственной интерполяции. Данные методы показывают высокие результаты при восстановлении геополей, требуют значительную трудоемкость процесса восстановления. Для решения этих проблем был предложен алгоритм восстановления геополей, основанный на искусственных нейронных сетях.

Результаты вычислительных экспериментов показали, что предложенный алгоритм обеспечи-

вает более высокую точность восстановления геополей, в отличие от метода обратно-взвешенных расстояний. К недостаткам предложенного алгоритма можно отнести низкую скорость работы, сложность выбора оптимальной конфигурации ИНС и необходимость обеспечения эффективного процесса их обучения. Несмотря на имеющиеся недостатки реализованного алгоритма, можно сделать вывод, что применение ИНС и методов искусственного интеллекта в данной области исследований является актуальным и перспективным направлением, а также требует проведения дальнейших исследований.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Капралов Е.Г., Кошкарёв А.В., Тикунов В.С. Геоинформатика. – М.: Академия, 2010. – 480 с.
2. Журкин И.Г., Шайтура С.В. Геоинформационные системы. – М.: КУДИЦ-Пресс, 2009. – 272 с.
3. Ковин Р.В., Марков Н.Г. Геоинформационные системы и технологии. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. – 267 с.
4. Основные понятия и элементы геостатистики / М.Ф. Каневский, В.В. Демьянов, Е.А. Савельева, С.Ю. Чернов // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. – 1999. – № 11. – С. 15–21.
5. Gousie M.V., Franklin W.R. Augmenting Grid-Based Contours to Improve Thin Plate DEM Generation // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. – 2005. – V. 71 (1). – P. 69–79.
6. Копнов М.В., Марков Н.Г. Восстановление двумерных геополей методами геостатистики // Проблемы информатики. – 2011. – № 2 (10). – С. 36–43.
7. Ковин Р.В., Копнов М.В., Марков Н.Г. Особенности поиска значений параметров при автоматизированном построении прогнозных карт // Современные техника и технологии: сборник трудов XVI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск, 2010. – Т. 2 – С. 342–343.
8. Ермолаев В.А. Интерполяционные восстанавливающие фильтры: метод динамической интерполяции // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2002. – № 2. – С. 39–42.
9. Новаковский Б.А., Прасолов С.В., Прасолова А.И. Цифровые модели рельефа реальных и абстрактных геополей. – М.: Научный мир. – 2003. – 64 с.



10. Almeida J.A., Lopes M. Stochastic Simulation of Rainfall Using a Space-time Geostatistical Algorithm // Geostatistics for Environmental Applications. – 2005. – P. 455–466.
11. Wim C.M. Kriging Metamodeling in Discrete-Event Simulation // Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference. – Orlando, USA, 2005. – P. 345–348.
12. Hendrick W., Dhaene T. Sequential Design and Rational Metamodeling // Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference. – Orlando, USA, 2005. – P. 368–373.
13. Russo A., Soares A., Pereira M.J. Joint Space-Time Geostatistical Model for Air // Proceedings of the VII Geostatistics for Environmental Applications Conference. – Netherlands, 2007. – P. 173–185.
14. Березовский В.Е., Друки А.А. Разработка и анализ приложений, позволяющих решать задачу восстановления геополя по нерегулярной сети точек // Технологии Microsoft в теории и практике программирования: сборник трудов IX Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск: Изд-во ТПУ, 2012. – С. 135–137.
15. Друки А.А., Спицын В.Г. Распознавание структурированных символов на изображениях с использованием гистограмм средней интенсивности и сверточной нейронной сети // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 322. – № 5. – С. 120–125.
16. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс. – М.: Вильямс, 2006. – 1103 с.
17. Aslam J.A., Popa R.A., Rivest R.L. On Estimating the Size and Confidence of a Statistical Audit // Proceedings of the Electronic Voting Technology Workshop (EVT '07). – Boston, 2007. – P. 254–259.
18. Rumelhart D., Hinton G.E., Williams R.J. Learning Representations of Back-Propagation Errors // Nature. – 1986. – № 323. – P. 533–536.
19. Riedmiller M., Braun H. A Direct Adaptive Method for Faster Backpropagation Learning: the RPROP Algorithm // International Conference of Neural Networks. – San Francisco, USA, 1993. – V. 1. – P. 586–591.
20. Holland J.H. Genetic Algorithms and Adaptation // Adaptive Control of Ill-Defined Systems. – New York, USA, 1984. – P. 317–333.

*Поступила 20.12.2015 г.*

UDC 004.896

## APPLICATION OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS FOR SOLVING THE PROBLEM OF TWO-DIMENSIONAL GEOFIELDS RECONSTRUCTION

**Pavel A. Kakovkin,**

National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: nitrokot@mail.ru

**Aleksey A. Druki,**

National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: druki2008@yandex.ru

The relevance of the research is caused by the necessity to develop algorithms and software to increase the efficiency of the spatial analysis and two-dimensional geofields recovery.

**The main aim** of the study is to develop the algorithms and software to increase the efficiency of two-dimensional geofields recovery on irregular grid point data; to carry out the experimental studies to determine the effectiveness of the developed algorithms and to compare them with the existing analogues.

**The methods used in the study.** To solve the task the authors have applied the methods of artificial intelligence, methods of implementation of artificial neural networks and genetic algorithms; the committee methods are applied to solve the classification problems, mathematical modeling, probability theory and mathematical statistics with the help of software Visual Studio and MatLab.

**The results.** The artificial intelligence methods were used for restoring geofields on irregular grid point data, as this area of research is one of the most intensively developing now. The algorithm based on artificial neural networks was developed to solve the problem. The algorithm is a sequence of actions. It consists of seven steps. The multiple neural networks of direct distribution, such as perceptron, which operate according to the bagging method, are used to restore geofield. The software application that allows solving the assigned task is developed on the basis of the proposed algorithm. The authors carried out the experimental study of the algorithm effectiveness and compared the results obtained with the results of the inverse distance-weighted method. The carried out studies shown that the results of the proposed algorithm operation are higher than the operating efficiency of the inverse-distance weighted method.

### Key words:

Geoinformatics, geofields reconstruction, geostatistical methods, cross-validation, artificial neural networks.

### REFERENCES

1. Kapralov E.G., Koshkarev A.V., Tikunov V.S. *Geoinformatika* [Geoinformatics]. Moscow, Akademia Publ. house, 2010. 480 p.
2. Zhurkin I.G., Shaytura S.V. *Geoinformatsionnye sistemy* [Geoinformation systems]. Moscow, KUDITS-Press, 2009. 272 p.
3. Kovin R.V., Markov N.G. *Geoinformatsionnye sistemy i tekhnologii* [Geoinformation Systems and Technologies]. Tomsk, TPU Publ. house, 2009. 267 p.
4. Kanevskiy M.F., Demyanov V.V., Saveleva E.A., Chernov S.Yu. Osnovnye ponyatiya i elementy geostatistiki [The basic concepts and elements of geostatistics]. *Environment and Natural Resources*, 1999, no. 11, pp. 15–21.
5. Gousie M.B., Franklin W.R. Augmenting Grid-Based Contours to Improve Thin Plate DEM Generation. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2005, vol. 71 (1), pp. 69–79.
6. Kopnov M.V., Markov N.G. Vosstanovlenie dvumernykh geopoly metodami geostatistiki [Restoration of two-dimensional geofields by geostatistical methods]. *The Problems of Informatics*, 2011, no. 2 (10), pp. 36–43.
7. Kovin R.V., Kopnov M.V., Markov N.G. Osobennosti poiska znacheniy parametrov pri avtomatizirovannom postroenii prognoznykh kart [Features of searching for parameters values at automated constructing of forecast maps]. *Sovremennye tekhnika i tekhnologii. Sbornik trudov XVI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh* [Proc. XVI Modern equipment and technology Conference]. Tomsk, April 12–16, 2010. Vol. 2, pp. 342–343.
8. Ermolaev V.A. Interpolyatsionnye vosstanavlivayushchie filtry: metod dinamicheskoy interpolatsii [Interpolation reducing filters: method of dynamic interpolation]. *Devices and systems. Management, monitoring, diagnostics*, 2002, no. 2. pp. 39–42.
9. Novakovskiy B.A., Prasolov S.V., Prasolova A.I. *Tsifrovye modeli reliefa realnykh i abstraknykh geopoly* [Digital elevation models of real and abstract geofields]. Moscow, Nauchny mir Publ., 2003. 64 p.
10. Almeida J.A., Lopes M. Stochastic Simulation of Rainfall Using a Space-time Geostatistical Algorithm. *Geostatistics for Environmental Applications*, 2005, pp. 455–466.
11. Wim C.M. Kriging Metamodeling in Discrete-Event Simulation. *Proc. of the 2005 Winter Simulation Conference*. Orlando, USA, 2005. pp. 345–348.
12. Hendrick W., Dhaene T. Sequential Design and Rational Metamodeling. *Proc. of the 2005 Winter Simulation Conference*. Orlando, USA, 2005. pp. 368–373.
13. Russo A., Soares A., Pereira M.J. Trigo Joint Space-Time Geostatistical Model for Air. *Proc. of the VII Geostatistics for Environmental Applications Conference*. Netherlands, 2007. pp. 173–185.
14. Berezovskiy V.E., Druki A.A. Razrabotka i analiz prilozheniy, pozvolyayushchikh reshat zadachu vosstanovleniya geopolya po neregulyarnoy seti toчек [Development and analysis of applications to solve the problem of geofield recovery by irregular point network]. *Tekhnologii Microsoft v teorii i praktike programmirovaniya. Sbornik trudov IX Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh* [Proc. IX Microsoft technologies in theory and practice of programming Conference]. Tomsk, 2012, March 21–22. pp. 135–137.
15. Druki A.A. Raspoznavanie strukturirovannykh simvolov na izobrazheniyakh s ispolzovaniem gistogramm sredney intensivnosti i svertochnoy neyronnoy seti [Recognition of structured characters in the images using the histograms of average intensity and a convolutional neural network]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 322, no. 5, pp. 120–125.

16. Haykin, S. *Neyronnye seti* [Neural networks]. Moscow, Viliams Publ., 2016. 1103 p.
17. Aslam J.A., Popa R.A., Rivest R.L. On Estimating the Size and Confidence of a Statistical Audit. *Proc. of the Electronic Voting Technology Workshop (EVT '07)*. Boston, 2007. pp. 254–259.
18. Rumelhart D., Hinton G.E., Williams R.J Learning Representations of Back-Propagation Errors. *Nature*, 1986, no. 323, pp. 533–536.
19. Riedmiller M., Braun H. A Direct Adaptive Method for Faster Backpropagation Learning: the RPROP Algorithm. *International Conference of Neural Networks*. San Francisco, USA, 1993. Vol. 1, pp. 586–591.
20. Holland J.H. *Genetic Algorithms and Adaptation*. Adaptive Control of Ill-Defined Systems, New York, USA, 1984. pp. 317–333.

*Received: 20 December 2015.*

УДК 552.321.6:553.08

## НОВЫЕ ДАННЫЕ О БЛАГОРОДНОМЕТАЛЛЬНОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ КИНГАШСКОГО УЛЬТРАМАФИТОВОГО МАССИВА (СЕВЕРО-ЗАПАД ВОСТОЧНОГО САЯНА)

**Юричев Алексей Николаевич,**

кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры петрографии геолого-географического факультета Национального исследовательского Томского государственного университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36. E-mail: juratur@sibmail.com

**Чернышов Алексей Иванович,**

доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий кафедрой петрографии геолого-географического факультета Национального исследовательского Томского государственного университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36. E-mail: aich@ggf.tsu.ru

**Кульков Алексей Сергеевич,**

кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник лаборатории структурной петрологии и минерации Национального исследовательского Томского государственного университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36; младший научный сотрудник лаборатории механики структурно-неоднородных сред Института физики прочности и материаловедения СО РАН, Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 2/4. E-mail: 727@sibmail.com

**Актуальность работы** обусловлена необходимостью детального петрологического исследования многочисленных потенциально рудоносных ультрамафитовых и мафит-ультрамафитовых массивов Канской глыбы Восточного Саяна с целью совершенствования региональных схем корреляции, а также выявления в них Pt-Cu-Ni-оруденения. Один из таких массивов – Кингашский, включающий в себя одноименное крупное Pt-Cu-Ni-месторождение, открытое еще в советское время, является объектом настоящего исследования. Однако, несмотря на повышенный интерес исследователей к данному массиву, остаются до конца нерешенными вопросы глубины его формирования, комагматичности ультраосновных и основных пород, а также условий формирования и локализации в нем руд.

**Цель работы:** изучение благороднометалльной минерализации в кумулятивных дунитах Кингашского ультрамафитового массива с целью расширения ее минералогической специализации.

**Методы исследования:** изучение рудной минерализации в аншлифах с использованием поляризационного микроскопа Axio-Scope Carl Zeiss; диагностика химического состава рудной минерализации методом рентгеноспектрального микроанализа с применением электронного сканирующего микроскопа «Tescan Vega II LMU» с энергодисперсионной и волнодисперсионной приставками и микроанализатора «Camebax-micro».

**Результаты.** В рудах Кингашского ультрамафитового массива, наряду с уже известными для этого месторождения минералами золото-серебряной и платиноидной минерализаций, авторами впервые установлены и охарактеризованы аргентит, железистый сперрилит и висмутистая разновидность меренскиита. В целом состав благороднометалльной минерализации обладает особенностями, обусловленными геохимической специализацией рудно-магматической системы, отличающейся высокой железистостью, что сближает Кингашское месторождение с другими медно-никелевыми месторождениями раннего протерозоя: Джинчуан (Китай), Печенга (Россия), Унгава (Канада), Маунт-Шолл (Западная Австралия) и др.

### **Ключевые слова:**

Кингашский массив, благороднометалльная минерализация, химический состав, аргентит, железистый сперрилит, висмутистый меренскиит.

### **Введение**

Ультрамафитовые и мафит-ультрамафитовые интрузии являются производными мантийных расплавов, несут в себе ценную информацию о глубинных зонах Земли, а также позволяют проследить эволюцию ультраосновного и основного магматизма. С ними связаны месторождения хромитов, медно-никелевых сульфидных руд, платиноидов и др.

Ультрамафиты и мафиты различной формационной принадлежности характеризуются широким распространением в пределах Канской глыбы Восточного Саяна. Они картируются в виде многочисленных массивов, чаще небольших размеров, и привлекают внимание многих исследователей в связи с их потенциальной рудоносностью [1–6]. Однако формационная принадлежность и металлогеническая специализация данных объектов часто

оказываются дискуссионными и требуют дальнейшего изучения.

Объектом настоящего исследования является благороднометалльная минерализация Кингашского ультрамафитового массива, являющегося эталонным объектом для одноименного дунит-верлит-пикритового комплекса [7] и включающего в себя крупное Cu-Ni-месторождение с элементами платиновой группы (ЭПГ) [8–11]. Несмотря на повышенный интерес к массиву, остаются до конца нерешёнными вопросы глубины его формирования, комагматичности ультраосновных и основных пород, а также условий формирования и локализации руд.

Полученные результаты позволяют расширить минералогическую благороднометалльную специализацию Кингашского массива и уточнить состав исходного рудоконтролирующего магматического расплава.

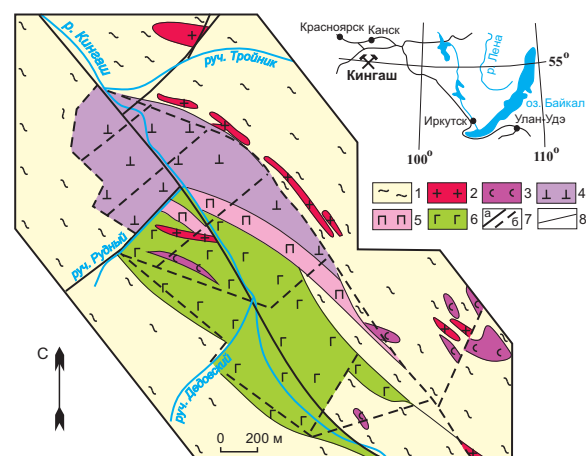
#### Краткая геологическая характеристика исследуемого объекта

Кингашский ультрамафитовый массив (AR<sub>2</sub>-PR<sub>1</sub>) расположен в пределах зеленокаменного пояса Канской глыбы Восточного Саяна. Многие аспекты его внутреннего строения и происхождения остаются до настоящего времени дискуссионными. Одни исследователи относят его к расслоенным интрузиям [8], другие считают его субвулканическим телом базальт-коматиитовой формации [7, 12–13], третьи рассматривают его в качестве фрагмента кингашского базальт-коматиитового вулканического комплекса [1, 14], четвертые считают, что по формационным признакам массив больше соответствует полигенным комплексам, а не расслоенным интрузиям [15].

Кингашский массив в плане картируется в виде крупной линзы (3×0,7 км), вытянутой в северо-западном направлении, и имеет согласное залегание со структурой пород обрамления. Контакты его с вмещающей толщей тектонические [16]. Массив сложен ультрамафитами и габброидами, со значительным преобладанием первых. Ультрамафиты обнажаются в его северной части, а в южной они перекрываются габброидами (рис. 1).

Согласно нашим исследованиям, ультрамафитовая часть разреза массива сложена преимущественно кумулятивными дунитами и их серпентинизированными разностями, при этом верлиты и пикриты пользуются ограниченным распространением. Выделяемые породы не обнаруживают какой-либо стратификации в массиве, а распределяются хаотично. Можно предположить, что образование ультрамафитового тела осуществлялось в магматической камере в условиях активной тектонической обстановки, когда режим сжатия периодически сменялся растяжением [7]. В моменты растяжения, очевидно, происходило пульсационное внедрение в камеру по образовавшимся в ней ослабленным зонам неоднородных по составу ультраосновных расплавов, которые возникли в результате

магматической дифференциации в глубинных промежуточных магматических очагах.



**Рис. 1.** Схематическая геологическая карта Кингашского мафит-ультрамафитового массива (составлена Н.А. Третьяковым, В.А. Прохоровой, в редакции авторов): 1 – вмещающие породы: гнейсы, амфиболиты, мраморы; 2 – гранитоиды; 3 – серпентиниты; 4 – ультрамафиты; 5 – клинопироксениты; 6 – габброиды; 7 – тектонические нарушения: а) достоверные, б) предполагаемые; 8 – геологические границы

**Fig. 1.** Schematic geological map of Kingashsky mafic-ultramafic massif (composed by N.A. Tret'yakov, V.A. Prokhorova, in the wording of the authors): 1 – host rocks: gneisses, amphibolites, marbles; 2 – granitoids; 3 – serpentinites; 4 – ultramafites; 5 – clinopyroxenites; 6 – gabbroes; 7 – tectonic violations: a) reliable, b) anticipated; 8 – geological boundaries

Габброиды, перекрывающие ультрамафиты, очевидно, представляют собой последующую, отерванную по времени фазу внедрения, при этом наблюдаемые на контакте ультрамафитов и габброидов клинопироксениты, вероятно, являются реакционными образованиями [3].

Установлено, что промышленные пирротин-пентландитовые руды с минералами ЭПГ в Кингашском массиве обособляются в интерстициях, главным образом, кумулятивных дунитов и их серпентинизированных разностях [11]. Руды преимущественно вкрапленные (интерстиционно-вкрапленные, гнездово-вкрапленные, сидеронитовые и шпирово-вкрапленные) и охватывают в разной степени все ультрамафиты месторождения. Жильные сульфидные руды (брекчиевидные, массивные и флюидально-полосчатые, прожилковые) распространены в ограниченном объеме (около 0,3 %), их мощность – до 1,5 м.

Главные минералы вкрапленных руд – пирротин, пентландит и халькопирит – находятся в различных соотношениях: от преобладания пирротина до преобладания пентландита. Халькопирит всегда занимает подчиненное положение. Второстепенные рудные минералы представлены пиритом, сфалеритом, галенитом, виоларитом, кубанитом, макинавитом, герсдорфитом и др. Минералы благородных металлов представлены самородным

серебром и золотом, электрумом, кюстелитом, мончеитом, майченеритом, фрудитом, меренскиитом, соболевскиитом, котульскиитом, эрлихманитом, ирарситом, иридарсенитом, паоловитом, сперрилитом, гесситом и др. [8–10, 17–18]. Они образуют зерна и их сростки размером до 0,3 мм (преобладают 5–30 мкм). Выявлены сульфиды и сульфоарсениды, в составе которых присутствуют твердые растворы ЭПГ [17].

В приповерхностных условиях месторождения развиты зона окисления и кора выветривания. Окисленные руды сложены гидроокислами железа (гетит, гидрогетит), марказитом, гематитом, виоларитом, реже встречаются борнит, ковеллин, халькозин, самородная медь. Силикатный тип руд приурочен к коре выветривания линейного типа. В ней установлены повышенные содержания силикатов никеля, отмечены вольфрамит, касситерит и минералы благородных металлов: сплавы золота с серебром, аурикуприд, тетрааурикуприд, медистое золото, палладистое золото, амальгама золота и серебра, стибнопалладинит, мертиит II и др. [10].

#### Методика исследования

В полированных аншлифах из вкрапленных, сливных и брекчиевидных Cu-Ni-руд Кингашского массива редко встречаются минералы золото-серебряной и платиновой группы. Анализ вещественного состава рудных минералов, а также их качественные изображения в отраженных электронах (режим BSE) проводился методом рентгеноспектрального микроанализа [19] 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. Для этого из отобранных образцов пород (дуниты) и руд были изготовлены плоскопараллельные аншлифы толщиной 3–4 мм по рекомендуемым методикам [19–20]. Перед проведением анализов на исследуемые поверхности предварительно напыляли слой углерода толщиной 25–30 нм. Последующие расчеты химических составов проводились по программе INCA-Issue 18b.

Для достоверного количественного состава выявленных рудных минералов проведено их исследование на рентгеновском микроанализаторе Samebaх-micro. Условия анализа: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток зонда 20–30 нА, время счета 10 с на каждой аналитической линии. В качестве эталонов для определения Pd, Pt, Ag, Fe, Ni, Co использовались чистые металлы, для As – NiAs, Bi – Bi<sub>2</sub>S<sub>3</sub>, Te – PbTe.

#### Золото-серебряная минерализация

Минералы Au-Ag-минерализации в ультрамафитах Кингашского массива представлены гесситом, аргентитом, самородным золотом, медистым и палладистым золотом, электрумом, кюстелитом, аурикупридом, тетрааурикупридом, амальгамой

золота и серебра (табл. 1). Они образуют отдельные единичные зерна и их сростки с преимущественным размером 5–30 мкм, редко отмечаются выделения до 0,35 мм. Данная минерализация выявляется во всех типах Cu-Ni-руд. Однако наиболее часто минералы золота и серебра ассоциируют с халькопирит-кубанитовыми агрегатами, реже находятся в пентландите, пирротине, хромшпинелиде и основной силикатной матрице породы (рис. 2).

**Таблица 1.** Средние составы минералов золота и серебра в ультрамафитах Кингашского месторождения, вес. %

**Table 1.** Average compositions of minerals of gold and silver in ultramafites of Kingashsky deposit, wt. %

Минерал Mineral	Число анализов Number of analyses	Cu	Au	Ag	Hg	Te	Pd	S	Сумма Sum
Золото Gold	7	–	87,17	12,04	0,96	–	–	–	100,17
Cu-золото Cu-gold	3	7,88	89,31	4,01	0,09	–	–	–	101,29
Pd-золото Pd-gold	3	–	80,96	16,80	–	–	1,66	–	99,41
Тетрааурикуприд Tetraauricupride	6	29,50	64,83	5,60	–	–	–	–	99,93
Аурикуприд Auricupride	4	45,77	50,16	2,96	–	–	–	–	98,89
Электрум Electrum	6	0,70	51,05	46,04	0,57	0,04	–	–	98,39
Кюстелит Kustelite	2	0,79	28,37	67,93	0,11	0,06	–	–	97,24
Гессит Hessite	3	–	–	58,62	–	38,60	0,03	–	97,26
Аргентит Argentite	2	–	–	87,28	–	–	–	12,72	100,00

Примечание. Здесь и далее диагностика химического состава выполнена методом рентгеноспектрального микроанализа с применением электронного сканирующего микроскопа Tescan Vega II LMU с энергодисперсионным и волнодисперсионным спектрометрами в ЦКП «Аналитический центр геохимии природных систем» ТГУ (г. Томск) и микроанализатора Samebaх-micro в ИГМ СО РАН (г. Новосибирск). Для данной выборки также частично использованы анализы Г.И. Шведова, В.Н. Князева [17–18, 21].

Note. Here and hereinafter the determination of the chemical composition was carried out by the method of X-ray spectrum microanalysis using scanning electron microscope Tescan Vega II LMU with energy-dispersive and wave-dispersive spectrometers in CCU «Analytical Center of geochemistry of natural systems» TSU (Tomsk) and microprobe Samebaх-micro in IGM SB RAS (Novosibirsk). For a given set of data the assays of G.I. Shvedov, V.N. Knyazev [17–18, 21] were partly used.

Во вкрапленных и жильных сульфидных рудах широко распространенным минералом является гессит, который ассоциирует с алтаитом, халькопиритом, пентландитом и минералами платиновой группы (меренскиитом и майченеритом). Ассоциация с последними, очевидно, объясняет нередкое «загрязнение» химического состава данного минерала микропримесями Pt и Pd (табл. 1).

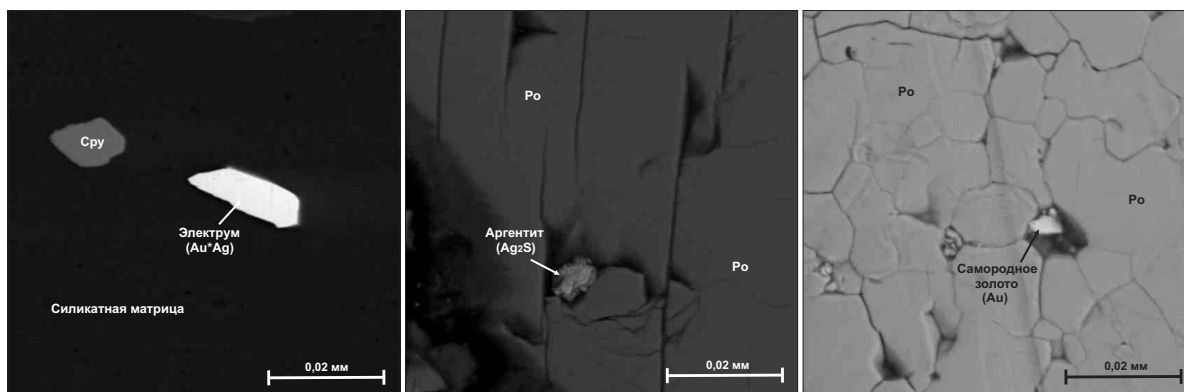


Рис. 2. Минералы Au и Ag в ультрамафитах Кингашского массива: Po – пирротин; Cpy – халькопирит

Fig. 2. Minerals of Au and Ag in ultramafites of Kingashsky massif. Po – pyrrhotite; Cpy – chalcopyrite

Наиболее распространенными минералами золота являются Au-Ag-сплавы, отвечающие по составу электриту, реже отмечается самородное золото и кюстелит. Эти минералы выявлены во всех типах руд и представлены субизометричными и проволочковидными зёрнами размером до 0,2 мм.

Аурикуприд, тетрааурикуприд, медистое и палладистое золото, амальгама золота преимущественно выявляются в коре выветривания, что отмечалось ранее [10, 17].

#### Платинометаллическая минерализация

Среди минералов платиновой группы (МПГ) в изученных образцах ультрамафитов авторами выявлены железистый сперрилит и висмутистый меренскиит.

В более ранних исследованиях был сделан вывод, что сперрилит является самым распространенным МПГ в ультрамафитах Кингашского массива [9, 17–18]. Он отмечается во всех типах Cu-Ni-руд: вкрапленных, брекчиевидных и массивных. Предполагается наличие двух генераций этого минерала – раннего первично-магматического происхождения и позднего – переотложенного. Выявленный нами железистый сперрилит отмечается в виде обособленных от других МПГ крупных зёрен размером до 0,05 мм, которые характеризуются прямолинейными контурами субизометричной формы (рис. 3). В его составе постоянно обнаруживается примесь железа до 1,84 % (табл. 2). По ти-

поморфным и химическим особенностям такая разновидность сперрилита, очевидно, относится к первой генерации, так как переотложенный сперрилит в кингашских ультрамафитах обычно находится в постоянной ассоциации с другими платиноидами (майченеритом и меренскиитом) или в тесном срастании с сульфидами – халькопиритом и пентландитом [10].

Меренскиит, после майченерита, относится к следующему по распространенности минералу палладия на Кингашском месторождении и встречается как среди богатых брекчиевидных Cu-Ni-руд, так и среди эпигенетических вкрапленных и прожилково-вкрапленных руд в виде мелких (до 0,01 мм) овальных зёрен. Минерал часто находится в тесной ассоциации с майченеритом в пирротин-пентландитовых или пентландитовых агрегатах (рис. 3). Выявленный авторами висмутистый меренскиит (содержание Bi до 28,1 %, табл. 2) ранее не отмечался на месторождении («классические» кингашские меренскииты содержат Bi ~ 16,0–17,0 %, по [10]) и, очевидно, является промежуточной разновидностью в ряду твердых растворов майченерит-меренскиит, о чем свидетельствует тесная ассоциация между этими минералами. Замещение теллура висмутом, а также постоянное присутствие в диагностированных меренскиитах примеси Pt (до 9,7 %) и Ni (до 0,11 %) характерно для этого минерала из других платиновых месторождений [22–23].

Таблица 2. Химический состав выявленных платиноидов в ультрамафитах Кингашского месторождения, вес. %

Table 2. Chemical composition of the identified minerals of PGE in ultramafites of Kingashsky massif, wt. %

Минерал Mineral	Fe	Ni	As	Pt	Te	Pd	Bi	Сумма Sum	Формула Formula
Железистый сперрилит Glandular sperrylite	1,84	0,74	42,66	52,76	–	–	–	98,00	$(Pt_{0,95}Fe_{0,11}Ni_{0,04})_{1,10}As_{1,90}$
	1,26	–	42,40	55,06	–	–	–	98,72	$(Pt_{0,99}Fe_{0,08})_{1,07}As_{1,90}$
	1,43	0,50	42,74	54,96	–	–	–	99,63	$(Pt_{0,98}Fe_{0,09}Ni_{0,03})_{1,10}As_{1,90}$
Висмутистый меренскиит Bi-bearing merenskyite	–	–	–	9,70	46,49	16,01	27,80	100,00	$(Pd_{0,66}Pt_{0,21})_{0,87}(Te_{1,57}Bi_{0,57})_{2,13}$
	–	0,11	–	9,52	45,43	16,78	28,12	99,96	$(Pd_{0,68}Pt_{0,21}Ni_{0,01})_{0,90}(Te_{1,53}Bi_{0,57})_{2,10}$

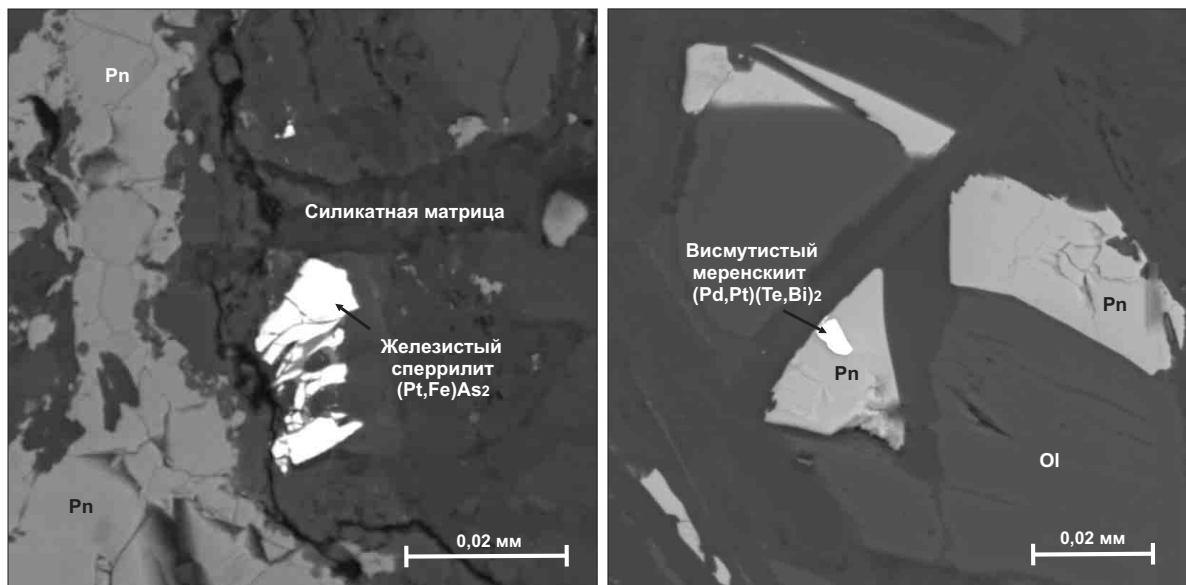


Рис. 3. Минералы ЭПГ в ультрамафитах Кингашского массива: Pn – пентландит; Ol – оливин

Fig. 3. Minerals of PGE in ultramafites of Kingashsky massif: Pn – pentlandite; Ol – olivine

#### Выводы

1. В рудах Кингашского ультрамафитового массива наряду с уже известными для этого месторождения минералами золото-серебряной и платиноидной минерализации авторами впервые установлены и охарактеризованы аргентит, железистый сперрилит и висмутистая разновидность меренскиита.
2. Исследованные составы благороднометалльной минерализации из Кингашского месторождения обладают особенностями, обусловленными геохимической специализацией рудно-магматической системы. Так, содержание примеси железа в первично-магматическом железистом сперрилите, наряду с особенностями состава сульфидной ассоциации (с участием троилита, макинавита и постоянно железистым составом пентландита), указывает на высокую железистость в целом кингашской рудно-магматической системы и сближает ее с другими медно-никелевыми месторождениями раннего протерозоя:

Джинчуан (Китай), Печенга (Россия), Унгава (Канада), Маунт-Шолл (Австралия).

3. Присутствие железистого сперрилита делает обоснованным ранее сформулированное предположение [10] о наличии двух генераций этого минерала в ультрамафитах Кингашского массива. При этом авторы относят выделенный сперрилит к ранней первично-магматической генерации. Наличие повышенной примеси железа в его химическом составе наряду со склонностью зерен к обособлению от других МПГ предлагается считать специфическими признаками сперрилита этой генерации.
4. Присутствие в составе сульфидных руд Кингашского массива, наряду с Ni, Cu, Co и платиноидами, Au-Ag-минерализации существенно повышает экономическую и минералогическую привлекательность Кингашского месторождения и открывает перспективы использования комплексного подхода при разработке руд месторождений кингашского типа.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зеленокаменные пояса юго-западного обрамления Сибирской платформы и их металлогения / Т.Я. Корнев, А.Г. Еханин, В.Н. Князев, С.К. Шарифулин. – Красноярск: КНИИГиМС, 2004. – 176 с.
2. Платиноносность ультрабазит-базитовых комплексов Юга Сибири / под ред. В.И. Богнибова, А.П. Кривенко, А.Э. Изоха. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «ГЕО», 1995. – 151 с.
3. Чернышов А.И., Ножкин А.Д., Мишенина М.А. Петрохимическая типизация ультрамафитов Канского блока (Восточный Саян) // Геохимия. – 2010. – № 2. – С. 1–25.
4. Юричев А.Н. Мафит-ультрамафитовый магматизм Канской глыбы и его рудный потенциал, Северо-Запад Восточного Саяна // Руды и металлы. – 2013. – № 3. – С. 11–20.
5. Юричев А.Н., Чернышов А.И. Рудная минерализация перидотитов и габброидов кулибинского комплекса (северо-запад Восточного Саяна) // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 319. – № 1. – С. 64–70.
6. Юричев А.Н., Чернышов А.И., Конников Э.Г. Талажинский плагиодунит-троктолит-анортосит-габбровый массив Восточного Саяна: петрогеохимические особенности и проблемы рудоносности // Геология и геофизика. – 2013. – Т. 54. – № 2. – С. 219–236.
7. Кингашский мафит-ультрамафитовый массив: геологическое положение, внутреннее строение, вещественный состав и петроструктурный анализ ультрамафитов (Восточный Саян) / А.И. Чернышов, А.Д. Ножкин, С.И. Ступаков, П.А. Балыкин, Н.И. Кузоватов, И.Г. Резников, Н.А. Третьяков, В.А. Прохорова.



- рова // Платина России. Проблемы развития, оценки, воспроизводства и комплексного использования минерально-сырьевой базы платиновых металлов: Сб. научн. трудов. Т. V. – М.: ООО «Геоинформмарк», 2004. – С. 152–175.
8. Глазунов О.М., Богнибов В.И., Еханин А.Г. Кингашское платиноидно-медно-никелевое месторождение. – Иркутск: Изд-во ИГТУ, 2003. – 192 с.
  9. Радомская Т.А. Минералогия и геохимия Кингашского платиноидно-медно-никелевого месторождения (В. Саян): автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Иркутск, 2012. – 23 с.
  10. Путеводитель по Кингашскому месторождению медно-никелевых и благороднометаллических руд (Восточный Саян) / Т.Я. Корнев, А.П. Романов, В.Н. Князев, С.К. Шарифуллин, Г.И. Шведов, Н.А. Третьяков, И.Г. Резников, В.В. Некос. – Красноярск: КНИИГиМС, 2001. – 72 с.
  11. Юричев А.Н. Эволюция сульфидного расплава в процессе образования Кингашского ультрамафитового массива (северо-запад Восточного Саяна) // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 324. – № 1. – С. 56–63.
  12. Коматит-базальтовая ассоциация Канского зеленокаменного пояса (Восточный Саян) / М.Ю. Цыпуков, А.Д. Ножкин, В.А. Бобров, Ю.Г. Шипицын // Геология и геофизика. – 1993. – № 8. – С. 98–108.
  13. Сульфидно-никелевое и благороднометаллическое оруденение в гранит-зеленокаменной области Восточного Саяна / А.Д. Ножкин, М.Ю. Цыпуков, В.А. Попереков, А.Н. Смагин, А.В. Ренжин // Отечественная геология. – 1995. – № 6. – С. 11–17.
  14. Корнев Т.Я., Еханин А.Г. Эталон Кингашского базальт-коматитового комплекса (Восточный Саян). – Новосибирск: СНИИГиМС, 1997. – 88 с.
  15. Возраст и природа вещества Кингашского ультрамафит-мафитового массива, Восточный Саян / И.Ф. Гертнер, В.В. Врублевский, О.М. Глазунов, П.А. Тишин, Т.С. Краснова, Д.Н. Войтенко // Доклады Академии наук. – 2009. – Т. 429. – № 5. – С. 645–651.
  16. Амфиболит-гнейсовые комплексы зеленокаменных поясов Канской глыбы: геохимия, реконструкция протолитов и условий их образования (Восточный Саян) / А.Д. Ножкин, О.М. Туркина, В.А. Бобров, А.Д. Киреев // Геология и геофизика. – 1996. – № 12. – С. 30–41.
  17. Князев В.Н. Геология и условия образования благороднометаллического и медно-никелевого оруденения Канского зеленокаменного пояса (Восточный Саян): дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Красноярск, 2004. – 145 с.
  18. Минералы элементов платиновой группы в сульфидных медно-никелевых рудах Кингашского массива (Восточный Саян) / Г.И. Шведов, Н.Д. Толстых, В.В. Некос, Л.Н. Поспелова // Геология и геофизика. – 1997. – Т. 38. – № 11. – С. 1842–1848.
  19. Reed S.J.V. Electron microprobe analysis and scanning electron microscopy in geology. – N.Y.: Cambridge University Press, 2005. – 189 p.
  20. Taylor C.M., Radtke A.S. Preparation and polishing of ores and mill products for microscopic examination and electron microprobe analysis // Econ. Geol. – 1965. – № 65. – P. 1306–1319.
  21. Шведов Г.И., Некос В.В., Третьяков Н.А. Новые данные о минералогии базит-ультрабазитовых массивов Кингашского рудного района (Восточный Саян) // Платина в геологических формациях Сибири: общероссийский семинар. – Красноярск: КНИИГиМС, 2001. – С. 134–135.
  22. Барков А.Ю., Леднев А.И., Бакушкин Е.М. Минералы элементов группы платины из массива горы Генеральской, Кольский полуостров // Доклады Академии наук. – 1994. – Т. 338. – № 6. – С. 785–788.
  23. Изох А.Э., Майорова О.Н., Лаврентьев Ю.Т. Минералы платиновых металлов в Номгонском троктолит-анортозит-габбровом интрузиве // Геология и геофизика. – 1992. – № 1. – С. 104–110.

Поступила 19.01.2016 г.

UDC 552.321.6:553.08

## NEW DATA ABOUT NOBLE-METAL MINERALIZATION OF KINGASHSKY ULTRAMAFIC MASSIF (NORTHWEST OF EASTERN SAYAN)

**Alexey N. Yurichev,**

National Research Tomsk State University,  
36, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: juratur@sibmail.com

**Alexey I. Chernyshov,**

National Research Tomsk State University,  
36, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: aich@ggf.tsu.ru

**Alexey S. Kulkov,**

National Research Tomsk State University,  
36, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia;  
Institute of Strength Physics and Materials Science  
of Siberian Branch Russian Academy of Sciences,  
2/4, Academicheskoy Avenue, Tomsk, 634021, Russia. E-mail: 727@sibmail.com

**The relevance of the work** is caused by the need of detailed petrological studies of numerous potentially mineralized ultramafic and mafic-ultramafic massifs of the Kan block of the Eastern Sayan to improve the correlation of regional schemes, and to identify Pt-Cu-Ni mineralization in them. One of these massifs – Kingashsky massif, including an eponymous large Pt-Cu-Ni deposit, discovered in Soviet times – is the subject of this study. However, despite the increased interest of researchers to this massif, the following issues – the depth of its formation, the comagmatic ultramafic and mafic rocks and the conditions of formation and localization of ore in it – remain unresolved.

**The main aim** of the paper is to study the noble-metal mineralization in cumulative dunite of Kingashsky ultramafic massif in order to increase its mineralogical specialization.

**The methods used in the work:** study of ore mineralization in polished sections using a polarizing microscope AxioScope Carl Zeiss. Determination of the chemical composition of ore mineralization was carried out by the method of X-ray spectrum microanalysis using scanning electron microscope Tescan Vega II LMU with energy-dispersive and wave-dispersive spectrometers and microprobe Samebax-micro.

**The results.** For the first time the authors identified and described new for this massif species of ore minerals of gold, silver and PGE: argentite, glandular sperrylite, Bi-bearing merenskyite. In general, the composition of noble-metal mineralization has an array of features due to the geochemical specialization of ore-magmatic system, which is characterized by a high iron content, which brings Kingashsky ore field together with other copper-nickel deposits of the Early Proterozoic: Dzhinchuan (China), Pechenga (Russia), Ungava (Canada), Mount Scholl (Western Australia) and others.

### Key words:

Kingashsky massif, noble-metal mineralization, chemical composition, argentite, glandular sperrylite, Bi-bearing merenskyite.

### REFERENCES

1. Kornev T.Ya., Ekhanin A.G., Knyazev V.N., Sharifulin S.K. *Zelenokamennye poyasa yugo-zapadnogo obramleniya Sibirskoy platformy i ikh metallogeniya* [Greenstone belts of southwestern framing of the Siberian platform and their metallogeny]. Krasnoyarsk, KNIIGiMS Press, 2004. 176 p.
2. *Platinonosnost ultrabazit-bazitovykh kompleksov Yuga Sibiri* [PGE mafic-ultramafic complexes of South Siberia]. Ed. by V.I. Bognibova, A.P. Krivenko, A.E. Izokha. Novosibirsk, Publishing House of SB RAS, Branch «Geo», 1995. 151 p.
3. Chernyshov A.I., Nozhkin A.D., Mishenina M.A. Petrokhimicheskaya tipizatsiya ultramafitov Kanskogo bloka (Vostochnyy Sayan) [Petrogeochemical typification of the ultramafic rocks from the Idar greenstone belt, Kan block, East Sayan]. *Geochimistry International*, 2010, no. 2, pp. 1–25.
4. Yurichev A.N. Mafit-ultramafitovyy magmatizm Kanskoy glyby i ego rudnyy potentsial, Severo-Zapad Vostochnogo Sayana [Mafic-ultramafic magmatism of the Kan block and its ore potential, NW Eastern Sayan]. *Rudy i metally*, 2013, no. 3, pp. 11–20.
5. Yurichev A.N., Chernyshov A.I. Rudnaya mineralizatsiya peridotitov i gabbroidov kulibinskogo kompleksa (severo-zapad Vostochnogo Sayana) [Ore mineralization of peridotites and gabbroes of the Kulibinsky complex (north-west of the Eastern Sayan)]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2011, vol. 319, no. 1, pp. 64–70.
6. Yurichev A.N., Chernyshov A.I., Konnikov E.G. Talazhinsky plagiodunit-troktolit-anortozit-gabbrovyy massiv Vostochnogo Sayana: petrogeokhimicheskie osobennosti i problemy rudonosnosti [The Talazhin plagioclone-troctolite-anorthosite-gabbro massif (East Sayan): petrogeochemistry and ore potential]. *Russian Geology and Geophysics*, 2013, vol. 54, no. 2, pp. 219–236.
7. Chernyshov A.I., Nozhkin A.D., Stupakov S.I., Balykin P.A., Kuzovatov N.I., Reznikov I.G., Tretyakov N.A., Prokhorova V.A. Kingashsky mafit-ultramafitovyy massiv: geologicheskoe polozhenie, vnutrennee stroenie, veshchestvennyy sostav i petrostrukturnyy analiz ultramafitov (Vostochnyy Sayan) [Kingashsky mafic-ultramafic massif: geological position, internal structure, material composition analysis and petrostructural analysis of ultramafic (Eastern Sayan)]. *Platina Rossii. Problemy razvitiya, otsenki, vosпроизводства i kompleksnogo ispolzovaniya mineralno-syrevoy bazy platinovykh metallov: Sb. nauchnykh trudov* [Proc. Platinum of Russia. Problems of development, evaluation, reproduction and complex use of mineral resources base of the platinum metals.]. Moscow, 2004. pp. 152–175.

8. Glazunov O.M., Bognibov V.I., Ekhanin A.G. *Kingashskoe platinoidno-medno-nikelevoe mestorozhdenie* [Kingashsky PGE-copper-nickel deposit]. Irkutsk, IGTU Press, 2003. 192 p.
9. Radomskaaya T.A. *Mineralogiya i geokhimiya Kingashskogo platinoidno-medno-nikelevogo mestorozhdeniya (V. Sayan)*. Avtoref. Dis. Kand. nauk [Mineralogy and geochemistry of the Kingashsky PGE-copper-nickel deposit (E. Sayan). Cand. Diss. Abstract]. Irkutsk, 2012. 23 p.
10. Kornev T.Ya., Romanov A.P., Knyazev V.N., Sharifulin S.K., Shvedov G.I., Tretyakov N.A., Reznikov I.G., Nekos V.V. *Putevoditel po Kingashskomu mestorozhdeniyu medno-nikelevykh i blagorodnometallnykh rud (Vostochnyy Sayan)* [Guide to Kingashsky deposit of copper-nickel and noble metal ores (Eastern Sayan)]. Krasnoyarsk, KNIIGiMS Publ., 2001. 72 p.
11. Yurichev A.N. *Evolutsiya sulfidnogo rasplava v protsesse obrazovaniya Kingashskogo ultramafitovogo massiva (severo-zapad Vostochnogo Sayana)* [Evolution of sulfide liquid during formation of the Kingashsky ultramafic massif (north-west of Eastern Sayan)]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 324, no. 1, pp. 56–63.
12. Tsypukov M.Yu., Nozhkin A.D., Bobrov V.A., Shipitsyn Yu.G. *Komatiit-bazaltovaya assotsiatsiya Kanskogo zelenokamennogo poyasa (Vostochnyy Sayan)* [Komatiite-basalt association of the Kan greenstone belt (Eastern Sayan)]. *Russian Geology and Geophysics*, 1993, no. 8, pp. 98–108.
13. Nozhkin A.D., Tsypukov M.Yu., Poperekov V.A., Smagin A.N., Renzhin A.V. *Sulfidno-nikelevoe i blagorodnometalnoe orudenie v granit-zelenokamennoy oblasti Vostochnogo Sajyana* [Sulfide-nickel and noble-metal mineralization in the granite-greenstone field of the Eastern Sayan]. *Otechestvennaya geologiya*, 1995, no. 6, pp. 11–17.
14. Kornev T.Ya., Ekhanin A.G. *Etalon Kingashskogo bazalt-komatiitovogo kompleksa (Vostochnyy Sayan)* [Etalon of the Kingashsky basalt-komatiitic complex (East Sayan)]. Novosibirsk, SNIIGiMS Publ., 1997. 88 p.
15. Gertner I.F., Vrublevskiy V.V., Glazunov O.M., Tishin P.A., Krasnova T.S., Voytenko D.N. *Vozrast i priroda veshchestva Kingashskogo ultramafit-mafitovogo massiva, Vostochnyy Sayan* [Age and nature of matter of the Kingashsky ultramafic-mafic massif, East Sayan]. *Doklady Akademii Nauk*, 2009, vol. 429, no. 5, pp. 645–651.
16. Nozhkin A.D., Turkina O.M., Bobrov V.A., Kireev A.D. *Amfibolit-gneysovye komplekсы zelenokamennykh poyasov Kanskoy glyby: geokhimiya, rekonstruktsiya protolitov i usloviy ikh obrazovaniya (Vostochnyy Sayan)* [Amphibolite-gneiss complexes of greenstone belts of the Kan block: geochemistry, reconstruction of protolith and conditions of their formation (Eastern Sayan)]. *Russian Geology and Geophysics*, 1996, no. 12, pp. 30–41.
17. Knyazev V.N. *Geologiya i usloviya obrazovaniya blagorodnometalnogo i medno-nikelevogo orudneniya Kanskogo zelenokamennogo poyasa (Vostochnyy Sayan)*. Dis. Kand. nauk [Geology and formation conditions of noble metal and copper-nickel mineralization of the Kan greenstone belt (Eastern Sayan). Cand. Diss.]. Krasnoyarsk, 2004. 145 p.
18. Shvedov G.I., Tolstykh N.D., Nekos V.V., Pospelova L.N. *Mineraly elementov platinovoy gruppy v sulfidnykh medno-nikelevykh rudakh Kingashskogo massiva (Vostochnyy Sayan)* [Minerals of platinum group elements in copper-nickel sulfide ores of the Kingashsky massif (Eastern Sayan)]. *Russian Geology and Geophysics*, 1997, vol. 38, no. 11, pp. 1842–1848.
19. Reed S.J.B. *Electron microprobe analysis and scanning electron microscopy in geology*. N.Y., Cambridge University Press, 2005. 189 p.
20. Taylor C.M., Radtke A.S. *Preparation and polishing of ores and mill products for microscopic examination and electron microprobe analysis*. *Econ. Geol.*, 1965, no. 65, pp. 1306–1319.
21. Shvedov G.I., Nekos V.V., Tretyakov N.A. *Novye dannye o mineralogii bazit-ultrabazitovykh massivov Kingashskogo rudnogo rayona (Vostochnyy Sayan)* [New data on the mineralogy of basic-ultrabasic massifs of Kingashsky ore district (Eastern Sayan)]. *Platina v geologicheskikh formatsiyakh Sibiri: obshcherossiyskiy seminar* [Seminar. Platinum in geological formations of Siberia]. Krasnoyarsk, KNIIGiMS Publ., 2001. pp. 134–135.
22. Barkov A.Yu., Lednev A.I., Bakushkin E.M. *Mineraly elementov gruppy platiny iz massiva gory General'skoy, Kolskiy poluostrov* [Minerals of platinum group elements from massif of General'sk mountain, Kola Peninsula]. *Doklady Akademii Nauk*, 1994, vol. 338, no. 6, pp. 785–788.
23. Izokh A.E., Mayorova O.N., Lavrentev Yu.T. *Mineraly platinovykh metallov v Nomgonskom troktolit-anortozit-gabbrovom intruzive* [Minerals of platinum group metals in Nomgonsky troctolite-anorthosite-gabbro intrusion]. *Russian Geology and Geophysics*, 1992, no. 1, pp. 104–110.

Received: 19 January 2016.

УДК 504.054:547.62; 504.054:547.68; 665.1:664.3.014

## ПОЛИЦИКЛИЧЕСКИЕ АРОМАТИЧЕСКИЕ УГЛЕВОДОРОДЫ В ТВЕРДОМ ОСАДКЕ И ЛЕГКОЛЕТУЧИЕ ОРГАНИЧЕСКИЕ СОЕДИНЕНИЯ В ФИЛЬТРАТЕ СНЕЖНОГО ПОКРОВА БРАТСКА

**Янченко Наталья Ивановна,**

доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник  
научно-исследовательской части Иркутского национального  
исследовательского технического университета,  
Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83. E-mail: fduescn@bk.ru

**Белых Лариса Ивановна,**

кандидат химических наук, доцент кафедры промышленной экологии  
и безопасности жизнедеятельности Института недропользования  
Иркутского национального исследовательского технического университета,  
Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83. E-mail: bgd@istu.irk.ru

**Слущкий Сергей Леонидович,**

заместитель руководителя Иркутского управления по гидрометеорологии  
и мониторингу окружающей среды,  
Россия, 664047, г. Иркутск, ул. Партизанская, 76. E-mail: sergey-sl74@mail.ru

**Ланько Анна Викторовна,**

старший преподаватель кафедры технологии геологической разведки  
Института недропользования Иркутского национального исследовательского  
технического университета, Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.  
E-mail: lav-and-lav@ya.ru

**Актуальность** исследования определяется необходимостью получения информации о составе газообразных и аэрозольных атмосферных примесей в зоне выбросов основной промышленной площадки Братска, на которой расположены крупные промышленные предприятия, такие как производство первичного алюминия и целлюлозно-бумажный комбинат, предприятия теплоэнергетики, завод ферросплавов. Так, содержание бенз(а)пирена в аэрозолях в 2013 г. в среднем по городу составило 3,3 ПДК. Также снижают качество жизни населения Братска дурнопахнущие вещества в приземном слое атмосферного воздуха, и последние два–три года в воздухе Центрального района ощущался новый неприятный запах, в дополнение к привычному, но неприятным запахам серосодержащих соединений, источником которых является целлюлозно-бумажное производство.

**Объектом** исследования является снежный покров.

**Методика** исследования – снегохимическая съемка.

**Результаты.** В декабре 2014 г. проведен отбор фильтрата снеговой воды, в конце февраля 2015 г. – отбор проб твердого осадка снега. Определены полициклические ароматические углеводороды в твердом осадке снежного покрова Братска, установлена высокая корреляционная связь между составами полициклических ароматических углеводородов в разных точках зоны выбросов, а также с ПАУ снежного покрова города с алюминиевым производством – Новокузнецка. Рассчитаны соотношения для ПАУ снежного покрова Братска, Новокузнецка и Шелехова. Индикаторные соотношения (флуоранте/флуорантен+пирен) и (пирен+флуорантен)/(хризен+фенантрен) указывают на пирогенный характер происхождения ПАУ. Впервые определены тридцать девять легколетучих органических соединений в фильтрате снежного покрова г. Братска, в их числе природные терпеноиды. Источником последних могут быть хвойные леса, или процессы переработки хвои на лесопромышленном комплексе.

### **Ключевые слова:**

Полициклические ароматические углеводороды, легколетучие органические соединения, снежный покров, производство алюминия, целлюлозно-бумажное производство.

Известно, что качество атмосферного воздуха отражает снежный покров [1], в котором могут накапливаться и сохраняться загрязняющие неорганические и органические соединения. К загрязняющим веществам относятся и полициклические ароматические углеводороды (ПАУ), так как некоторые представители этого класса включены в группу наиболее опасных соединений для человека. Содержание их индикаторного представителя – бенз(а)пирена в аэрозолях атмосферы промыш-

ленного Братска в 2013 г. в среднем по городу составило  $3,3 \cdot 10^{-6}$  мг/м<sup>3</sup> (3,3 ПДК) [2].

Дурнопахнущие вещества атмосферного воздуха также снижают его качество и качество жизни населения. Так, в последние два-три года в воздухе Центрального района Братска ощущался новый неприятный запах. ГОСТ 32673–2014 устанавливает правила контроля выбросов дурнопахнущих веществ в атмосферу (введен в действие с 01.07.2015 г.) [3]. Стандарт распространяется на

методы исследования запаха в атмосферном воздухе, требования к измерению концентрации запаха ольфактометрическим способом с привлечением группы волонтеров [3], но без идентификации соединения(ий). В связи с этим одно из направлений исследования – определение легколетучих органических соединений (ЛОС) как источника запаха по анализу такого объекта, как снежный покров.

Цель работы – определить состав полициклических ароматических углеводородов в твердых осадках и легколетучих органических соединений в фильтрате снежного покрова г. Братска.

**Районом исследования** является зона выбросов промышленных предприятий г. Братска. Координаты Братска: широта 56°7' с. ш., долгота 101°35' в. д. В районе Братска рельеф крупнохолмистый, с перепадами высот в пределах от 402 до 670 м. Городские поселки Братска расположены в основном на берегу Братского водохранилища, которое образовалось при перекрытии реки Ангары. В зимние месяцы преобладают ветры западного направления (повторяемость данного направления ветра 26,7%), повторяемость скорости ветра по градации 1–5 м/с составляет 69,9%, штиль – 25,8%. Устойчивый снежный покров сохраняется с октября-ноября по март-апрель [4].

В Братске расположен один из крупнейших в мире алюминиевый завод (ОАО «РУСАЛ Братск») с современной производительностью 1 млн т/год. Данный завод наряду с алюминиевыми заводами гг. Новокузнецка и Шелехова, введенными в эксплуатацию с середины прошлого века, оснащены электролизерами с самообжигающимися анодами на основе каменноугольных пеков. Они являются источниками выделения канцерогенных ПАУ и различных малоизученных органических веществ. Другим источником загрязнения атмосферы ПАУ и ЛОС в г. Братске может быть целлюлозно-бумажный комбинат и другие производства в составе лесопромышленного комплекса (филиал

ОАО «Группа «Илим»), в частности открытая в 2013 г. линия производства хвойной беленой целлюлозы производительностью 720 тыс. тонн [5–6]. Кроме того, на территории города источником ПАУ могут быть завод ферросплавов, ТЭЦ, котельные, речной порт, частный сектор с печным отоплением, автомобильный транспорт.

Расположение основных промышленных предприятий г. Братска неблагоприятно, потому что их выбросы в атмосферу направлены в основном на жилые районы.

#### Объекты и методика исследования

В декабре 2014 г. в Братске проведен отбор проб фильтрата снеговой воды, в конце февраля 2015 г. – отбор проб твердого осадка снежного покрова (ТОС) в соответствии с рекомендациями «Руководство по контролю загрязнения атмосферы» [7].

Первая проба ТОС (проба № 1) отобрана на территории санитарно-защитной зоны алюминиевого завода, а вторая (проба № 2) – в Центральном округе, на берегу Братского водохранилища около речного порта (рисунок).

Подготовка проб к химическим анализам проводилась в аккредитованной лаборатории и включала таяние снега при комнатной температуре, фильтрацию снеговой воды, высушивание твердого остатка снега (ТОС). Проба № 3 (фильтрат) отобрана на посту наблюдений за атмосферным воздухом Братского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (БЦГМС), который находится примерно на расстоянии 2–3 км от промышленной площадки лесопромышленного комплекса, включающей целлюлозно-бумажный комбинат, производство по переработке хвой и др. участки. Проба № 4 (фильтрат) отобрана в районе Телецентра, также на посту БЦГМС. Отмечаем, что при таянии снега проб № 3 и № 4 в комнате пробоподготовки ощущался неприятный запах, тот же, что и в районе отбора пробы снежного по-



**Рисунок.** Карта-схема отбора проб твердого осадка и фильтрата снежного покрова в г. Братске

**Figure.** Map-scheme of sampling sediment and snow cover filtrate in Bratsk

крова. Определение ПАУ и ЛЮС, соответственно, в твердых остатках и фильтрате воды снежного покрова проведено методом хромато-масс-спектрометрии в аккредитованной лаборатории Института проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН (г. Москва). Измерения выполнены на хроматографе Focus с масс-спектрометрическим детектором DSQ.

### Результаты и обсуждение

Основными источниками ПАУ в снежном покрове Братска могут быть выбросы от технологических процессов сжигания топлива, переработки органического сырья различных производств. В зависимости от механизма образования различают ПАУ пирогенного (сжигание) и петрогенного (не связанного с горением) происхождения [8].

**Определение ПАУ в твердом осадке снежного покрова Братска.** Из сотен ПАУ, обнаруженных в объектах окружающей среды, в список приоритетных включены 16 соединений: нафталин, аценафтен, флуорен, аценафтилен, фенантрен, антрацен, флуорантен, пирен, хризен, бенз(а)антрацен, бенз(б)флуорантен, бенз(к)флуорантен, бенз(а)пирен, дибенз(а, h)антрацен, индено(1,2,3-сd)пирен, бенз(г, h, i)перилен [9–11]. В пробе № 1 идентифицированы следующие 13 ПАУ: нафталин, аценафтен, флуорен, фенантрен, флуорантенпирен, бенз(а)антрацен, хризен, бенз(б)флуорантен, бенз(к)флуорантен, бенз(а)пирен, индено(1,2,3-сd)пирен, бенз(г, h, i)перилен, с общей концентрацией 92,52 мкг/кг. В пробе № 2 определено 14 ПАУ, те же соединения, что в пробе № 1, но с дибенз(а, h)антраценом, с общей концентрацией 91,91 мкг/кг.

Для ориентировочного установления техногенного источника ПАУ были рассчитаны коэффициент парной корреляции (табл. 1) и индикаторные отношения ПАУ между пробами Братска и Новокузнецка, Шелехова (табл. 2) отобранными в зимний период, для исключения (уменьшения) сезонных колебаний на состав ПАУ [12, 13]. Проба ТОС отобрана в Новокузнецке на ПНЗ-10 – в зоне влияния ОАО «РУСАЛ "Новокузнецкий алюминиевый завод"». В качестве сравнения использованы данные наблюдений на постах ПНЗ-9, ПНЗ-16, ПНЗ-23, которые не находятся в зоне влияния Новокузнецкого алюминиевого завода. В работе [14] содержание твердых ПАУ (ТОС снежного покрова) указано в мг/дм<sup>3</sup>, в работе [15] – мкг/м<sup>2</sup>, в наших пробах – в мкг/г. Для сравнения результатов был выполнен пересчет исходных единиц измерения в относительное процентное содержание. Так, суммарная концентрация 11 ПАУ (общих ПАУ в пробах Братска, Новокузнецка) была принята за 100 % и рассчитано относительное содержание в процентах для отдельных ПАУ. Установлена высокая степень корреляционной зависимости ( $r=0,85; 0,96; 0,96$ ), свидетельствующая о близкой природе образования ПАУ в пробах № 1, 2 Братска и ПНЗ-10 – производство алюминия.

**Таблица 1.** Коэффициенты парной корреляции ( $r_{xy}; f, \alpha$ ) между одинаковыми ПАУ в пробах твердого осадка снега Братска и Новокузнецка [14]

**Table 1.** Pair correlation coefficients ( $r_{xy}; f, \alpha$ ) between the similar polycyclic aromatic hydrocarbons in samples of solid snow residue of Bratsk and Novokuznetsk [14]

Пункты опробования Sampling areas	Проба № 1 Sample no. 1	Проба № 2 Sample no. 2	ПНЗ-9	ПНЗ-10	ПНЗ-16	ПНЗ-23
Проба № 1 Sample no. 1	1					
Проба № 2 Sample no. 2	<b>0,96</b> (9; 0,001)	1				
ПНЗ-9	0,71 (9; 0,02)	0,82 (7; 0,01)	1			
ПНЗ-10	<b>0,85</b> (9; 0,001)	<b>0,96</b> (7; 0,001)	0,88 (7; 0,01)	1		
ПНЗ-16	0,75 (9; 0,01)	0,80 (7; 0,01)	0,75 (7; 0,02)	0,89 (7; 0,01)	1	
ПНЗ-23	0,23 (н/з)	0,22 (н/з)	0,14 (н/з)	0,50 (н/з)	0,75 (7; 0,05)	1

Примечание:  $f$  – число степеней свободы, равное  $m-2$  ( $m$  – количество ПАУ);  $\alpha$  – уровень значимости; н/з – связь статистически незначима.

Note:  $f$  is the number of degrees of freedom, which is equal to  $m-2$  ( $m$  is the amount of polycyclic aromatic hydrocarbons);  $\alpha$  is the significance level; н/з (NS) the compound is nonsignificant.

**Таблица 2.** Соотношения ПАУ в твердом осадке снежного покрова Братска, Новокузнецка, Шелехова

**Table 2.** Ratios of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in solid snow sediment in Bratsk, Novokuznetsk, Shelekhov

Пирогенные ПАУ [8] Pyrogenic PAH [8]	г. Братск Bratsk		г. Новокузнецк [14] Novokuznetsk [14]				г. Шелехов [15, 16] Shelekhov [15, 16]	
	Проба № 1 Sample no. 1	Проба № 2 Sample no. 2	ПНЗ-9	ПНЗ-10	ПНЗ-16	ПНЗ-23	[15]	[16]
Отношение Ratio								
Fl/(Fl+Py)	0,6	0,6	0,5	0,5	0,5	0,1	0,5	0,7
(Py+Fl)/(Chr+Ph)	2,8	1,8	1,3	1,5	1,1	0,2	1,7	0,7

В работе [8] отмечено, что «...картину происхождения загрязнений можно сформулировать, применяя индикаторные соотношения ПАУ» [8]. Известно, что для петрогенных ПАУ (нефтяного происхождения, не связанного с горением [8]) индикатором могут быть соотношения  $Fl/(Fl+Py) < 0,5$  и  $(Fl+Py)/(Chr+Ph) < 0,5$ , а для пирогенных ПАУ (образовавшихся в результате различных процессов горения лигнина, древесины, большинства углей [8]) –  $Fl/(Fl+Py) > 0,5$  и  $(Py+Fl)/(Chr+Ph) > 0,5$ . На основании данных о ПАУ в ТОС снежного покрова Братска, Новокузнецка [14] и Шелехова [15, 16] рассчитаны соотношения (табл. 2), указывающие на пирогенную природу источника. Источником ПАУ в выбросах алюминиевого завода

являются самообжигающиеся аноды, имеющие в своем составе нефтяной и пековый кокс, а в качестве связующего – каменноугольный пек [17, 18]. Аноды находятся в электролизной ванне при температуре примерно 950–960 °С [17, 18].

**Определение легколетучих органических соединений в фильтрате снежного покрова.** Известно, что дурнопахнущие вещества атмосферы можно определить, исследуя растения [19]. Некоторые легколетучие органические соединения (ЛОС), содержащиеся в атмосфере, оказывают влияние на концентрацию приземного озона [20, 21]. Как указано выше, мы пытались применить фильтрат снежного покрова для определения легколетучих органических соединений и идентифицировать вещество(а) с неприятным запахом в атмосфере города Братска. В пробах № 3 и № 4 пока определены 39 легколетучих органических соединения природного или техногенного происхождения. В фильтратах снеговой воды в концентрациях более 1 мкг/л (в одной из проб) определены: толуол, п-ментан (1R,2R,3S,5)-пинандиол; 1,2,2,3-тетраметил-3-циклопентен-1-ол. Вещества с концентрацией менее 1 мкг/л: ксилолы, полиметилбензолы, нафталин, 2-метилнафталин, 1-метилнафталин, 1,1,3,4-тетраметилциклопентан, п-ментан, этилгексанол, П-цинеол, ангидрид каприловой кислоты, линалоол-оксид, линалил-оксид, L-камфор, 3,7-диметил-6-ноненаль, П-цимен-8-ол, а-терпинеол, вербенон, пентил-виниловый эфир, кислородсодержащее соединение, 3,4,5-триметил-4-гептанол, 2,3-пинандиол; 4-амино-1,5-гептандикарбоновая кислота, трихлорэтилфосфат, 4,5-диметил-1,3-диоксан-метанол, карбазол, 7,9-дитретбутил-1-оксапиро[4,5]дека-6,9-диен-2,8-дион, 4-гидрокси-9-флуоренон, соединение типа диэтил-4-оксогептадиота, ди(2-этилгексил)фталат и др. соединения. Впервые установлено, что в фильтрате снежного покрова в данных точках отбора одну группу веществ составили терпеноиды. Сумма терпеноидов в пробе № 3 – 80,44 мкг/л, в пробе № 4 – 63,56 мкг/л. Известно, «что терпеноиды углеродного состава C<sub>10</sub> в количественном отношении (по весу, валу) занимают лидирующее положение среди всех изопреноидов – они являются основными компонентами большинства эфирных

масел растений, живицы хвойных. Обычно свободные монотерпены – достаточно летучие вещества с сильным и оригинальным ароматом» [22]. К кислородсодержащим терпеноидам пинанового ряда относится вербенон (проба № 3 – 0,18 мкг/л, проба № 4 – 0,08 мкг/л), который является секс-феромоном жука короеда (*Dendroctonus ponderosae*) [22]. В настоящее время изучают влияние кристаллов снега на взаимодействие с ЛОС с целью влияния на уровень радиации и изменение климата [23]. Для этого изучили взаимодействие ряда ЛОС с искусственными кристаллами льда (снежинки) и установили, что возможно влажное удаление терпеноидов (terpenoids) льдом из атмосферы. Вопрос об идентификации дурнопахнущего вещества в атмосферном воздухе и его источнике требует дальнейшего исследования. Необходимо учесть много факторов. Так, Х. Аалтонен [24] совместно с коллегами подчеркивает, что и почва в бореальных лесах является важным источником летучих органических соединений (ЛОС) в атмосферу.

#### Выводы

1. Определено четырнадцать полициклических ароматических углеводородов в твердом осадке снежного покрова Братска, входящих в перечень приоритетных ПАУ. Установлена высокая корреляционная связь между составами ПАУ снежного покрова городов с алюминиевым производством (Братск, Шелехов, Новокузнецк). Индикаторные соотношения флуорантен/флуорантен+пирен и пирен+флуорантен/хризен+фенантрен указывают на пирогенный характер происхождения ПАУ.
2. Впервые определено тридцать девять легколетучих органических соединений в фильтрате снежного покрова г. Братска, в их числе природные терпеноиды, источником которых могут быть хвойные леса, находящиеся вокруг города, или процессы переработки хвои на лесопромышленном комплексе.

*Результаты получены при частичной финансовой поддержке федеральной целевой программы Министерства образования и науки. Уникальный идентификатор ПНИЭР RFMEFI57715X0190*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Василенко В.Н., Назаров И.М., Фридман Ш.Д. Мониторинг загрязнения снежного покрова. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 182 с.
2. Состояние загрязнения атмосферного воздуха на территории деятельности ФГБУ «Иркутское УГМС» в 2013 году: доклад / Мин-во природных ресурсов РФ, Иркутское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (ФГБУ «Иркутское УГМС, Иркутский центр по мониторингу загрязнения окружающей среды (Иркутский ЦМС)). – Иркутск, 2013. – 328 с.
3. ГОСТ 32673–2014. Правила установления нормативов и контроля выбросов дурнопахнущих веществ в атмосферу. – М.: Стандартинформ, 2014. – 22 с.
4. Климат Братска / под ред. Ц.А. Швер, В.Н. Бабиченко. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 168 с.
5. Группа «Илим» начала выпуск товарной белой хвойной целлюлозы на новой линии в Братске // Сайт «Сделано у нас». URL: <http://sdelanounas.ru/blogs/32533> (дата обращения: 29.10.2014).
6. Группа «Илим» снова обещает, что братчане не будут чувствовать неприятный запах // Интернет-портал «Город». URL: <http://tkgorod.ru/news/2905> (дата обращения: 29.10.2014).
7. Руководство по контролю загрязнения атмосферы: РД 52.04.186–89: утверж. гл. гос. сан. врачом СССР 16.05.89: введ. в действ. 01.07.91. – М.: Госкомгидромет; Министерство здравоохранения СССР, 1991. – 693 с.
8. Хаустов А.П., Редина М.М. Полициклические ароматические углеводороды как геохимические маркеры нефтяного загряз-

- нения окружающей среды // Экспозиция Нефть – Газ. – 2014. – № 4. – С. 92–96.
9. Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду: Р 2.1.10.1920–04: утв. и первым заместителем министра здравоохранения Российской Федерации, гл. гос. сан. врачом РФ Г.Г. Онищенко: введ. в действие 05.03.2004. – М.: Роспотребнадзор; Минздрав России, 2004. – 340 с.
  10. Harvey R.G. Polycyclic aromatic hydrocarbons. – Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH, 1997. – 300 p.
  11. ISPAC 2003 International Society for Polycyclic Aromatic Compounds 2003. PAH structure/properties URL: <http://www.ispac.org/links.html> (дата обращения: 29.10.2014).
  12. Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in snow of Mount Nanshan, Xinjiang / X. Lei, W. Li, J. Lu, Y. Tong, S. Li // Water and Environment Journal. – 2015. – V. 29. – Iss. 2. – P. 252–258.
  13. Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Street Dust from the Chang–Zhu–Tan Region, Hunan, China / Y. Long, G. Chi, H. Qing, T. Dai, Q. Wu // Journal of Environmental Protection. – 2011. – V. 2. – № 10. – P. 1331–1340.
  14. Загрязнение снежного покрова полициклическими ароматическими углеводородами и токсическими элементами на примере г. Новокузнецка / Н.В. Журавлева, Р.Р. Потоккина, З.Р. Исмагилов, Е.Р. Хабибулина // Химия в интересах устойчивого развития. – 2014. – № 21. – С. 445–454.
  15. Распределение и биологическая активность полициклических ароматических углеводородов в системе источник – снежный покров – почва – растение / Л.И. Белых, А.Г. Горшков, И.А. Рябчиков, В.А. Серышев, И.И. Маринайте // Сибирский экологический журнал. – 2004. – № 11(6). – С. 793–802.
  16. Распределение полициклических ароматических углеводородов в природных объектах на территории рассеивания выбросов Иркутского алюминиевого завода (г. Шелехов, Иркутская обл.) / И.И. Маринайте, А.Г. Горшков, Е.Н. Тараненко, Е.В. Чипанина, Т.В. Ходжер // Химия в интересах устойчивого развития. – 2013. – № 21. – С. 143–154.
  17. Вершинина Е.П., Гильдебрандт Э.М., Селина Е.А. Тенденции развития производства связующего для анодов алюминиевых электролизеров // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. – 2012. – Т. 5. – № 7. – С. 752–759
  18. Сравнительная оценка эмиссии канцерогенных веществ при использовании средне- и высокотемпературных пеков в производстве алюминия в электролизерах Содерберга / А.Г. Аншиц, Л.И. Куртеева, С.И. Цыганова А.Р. Суздорф, Н.Н. Аншиц, С.В. Морозов // Химия в интересах устойчивого развития. – 2001. – № 9. – С. 345–352.
  19. Мейсурова А.Ф., Хижняк С.Д., Пахомов П.М. Мониторинг воздушного загрязнения в районе свиноводческого комплекса // VIII Всероссийская конференция по анализу объектов окружающей среды «Экоаналитика-2011» и школа молодых ученых, посвященные 300-летию со дня рождения М.В. Ломоносова: Тезисы докладов. – Архангельск, 2011. – С. 189. URL: [http://csl.isc.irk.ru/BD/Books/экоаналитика\\_2011.pdf](http://csl.isc.irk.ru/BD/Books/экоаналитика_2011.pdf) (дата обращения: 29.10.2014).
  20. Modeling the influence of biogenic volatile organic compound emissions on ozone concentration during summer season in the Kinki region of Japan / H. Bao, K.L. Shrestha, A. Kondo, A. Kaga, Y. Inoue // Atmospheric Environment. – 2010. – V. 3. – № 44. – P. 421–431.
  21. Evaluation of light dependence of monoterpene emission and its effect on surface ozone concentration / H. Nishimura, H. Shimadera, A. Kondo, H. Bao, K.L. Shrestha, Y. Inoue // Atmospheric Environment. – 2015. – V. 104. – P. 143–153.
  22. Племенков В.В. Химия изопреноидов. Монотерпены // Химия растительного сырья. – 2006. – № 1. – С. 55–72.
  23. Adsorption sites, adsorption enthalpies and potential removal of terpenoids by atmospheric ice / C. Czecha, S.M. Hammera, B. Bonn, M.U. Schmidta // Atmospheric Environment. – 2011. – V. 45. – Iss. 3. – P. 687–693.
  24. Snowpack concentrations and estimated fluxes of volatile organic compounds in a boreal forest / H. Aaltonen, J. Pumpanen, H. Hakola, J. Back // Biogeosciences. – 2012. – V. 9. – Iss. 6. – P. 2033–2044. URL: [www.biogeosciences.net/9/2033/2012](http://www.biogeosciences.net/9/2033/2012) (дата обращения: 29.10.2014).

Поступила 27.10.2015 г.



UDC 504.054:547.62; 504.054:547.68; 665.1:664.3.014

## POLYCYCLIC AROMATIC HYDROCARBONS IN SOLID RESIDUE AND VOLATILE ORGANIC COMPOUNDS IN SNOW COVER FILTRATE OF BRATSK

**Natalia I. Yanchenko,**

Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov street, Irkutsk, 664074, Russia. E-mail: fduecn@bk.ru

**Larisa I. Belykh,**

Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov street, Irkutsk, 664074, Russia. E-mail: bgd@istu.irk.ru

**Sergey L. Slutsky,**

Irkutsk Center for Hydrometeorology and Environmental Monitoring,  
76, Partizanskaya street, Irkutsk, 664047, Russia. E-mail: sergey-sl74@mail.ru

**Anna V. Lanko,**

Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov street, Irkutsk, 664074, Russia. E-mail: lav-and-lav@ya.ru

**Relevance** of the study is determined by the need to obtain information on composition of gaseous and particulate air pollutants in the area of emission of the main industrial site of Bratsk, where there are large industrial enterprises, such as the production of primary aluminum and pulp and paper mill, thermal power plant, ferroalloy plant. The content of benzo (a) pyrene in aerosols in 2013 in the middle of the city exceeded the norm by three times. The malodorous substances in the surface layer of air reduce as well the quality of life of the population in Bratsk. During the last two or three years in the air of the Central area one can feel new unpleasant smell, in addition to the familiar but unpleasant smell of sulfur compounds, originating from the pulp and paper industry.

**Object** of the study is snow cover.

**Research methodology** is the snow-chemical survey.

**Results.** In December 2014 the authors selected the snow water filtrate, at the end of February 2015 they selected solid snow sediment samples. The polycyclic aromatic hydrocarbons were determined in snow solid sediment of Bratsk. The authors defined high correlation between the polycyclic aromatic hydrocarbons compounds in different parts of the emission area, as well as with polycyclic aromatic hydrocarbons of snow cover in the town with aluminum production – Novokuznetsk, and calculated the ratios for PAH of snow cover in Bratsk, Novokuznetsk and Shelekhov. The indicating ratios (fluoranthene/pyrene, fluoranthene) and (fluoranthene pyrene)/(chrysene+phenanthrene) display the pyrogenic nature of polycyclic aromatic hydrocarbon origin. For the first time the authors determined thirty-nine volatile organic compounds in the filtrate of snow cover in Bratsk, including natural terpenoids. The coniferous forests or the pine needle processing can be a source of the latter.

### Key words:

Polycyclic aromatic hydrocarbons, volatile organic compounds, snow cover, aluminum production.

The results of the research were obtained at partial financial support of the Federal special-purpose program of the Ministry of Education and Science «Unique identifier PNIER RFMEFI57715X0190».

### REFERENCES

1. Vasilenko V.N., Nazarov I.M., Fridman Sh.D. *Monitoring zagryazneniya snezhnogo pokrova* [Monitoring of snow cover pollution]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1985. 182 p.
2. *Gosudarstvenny doklad «Sostoyanie zagryazneniya atmosfernogo vozdukha na territorii deyatelnosti FGBU "Irkutskoe UGMS" v 2013 godu»* [The condition of atmospheric air pollution on the territory of activity of the Federal state budgetary institution «Irkutsk UGMS» in 2013]. Irkutsk, 2013. 328 p.
3. *GOST 32673-2014. Pravila ustanovleniya normativov i kontrolya vybrosov durnopakhnushchikh veshchestv v atmosfere* [State Standard 32673-2014. Rules of establishing standards and control of emissions of odorous substances to the atmosphere]. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 22 p.
4. *Klimat Bratska* [Bratsk climate]. Eds. Ts.A. Shver, V.N. Babichenko. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1985. 168 p.
5. Gruppya «Ilim» nachala vypusk tovarnoy belenoy khvoynoy tsellyulozy na novoy linii v Bratske [The «Ilim» group started to produce market bleached long pulp in Bratsk]. *Sdelano u nas.* 2010–2015. Available at: <http://sdelanounas.ru/blogs/32533> (accessed: 29 October 2014).
6. Gruppya «Ilim» snova obeshchaet, chto bratchane ne budut chuvstvovat nepriyatny zapakh [The «Ilim» group promises again that citizens of Bratsk won't feel unpleasant smell]. *Gorod.* 2010–2015. Available at: <http://tkgorod.ru/news/2905> (accessed 29 October 2014).
7. *Rukovodstvo po kontrolyu zagryazneniya atmosfery* [Guide to the control of air pollution]. RD 52.04.186-89. Moscow, Gidrometeoizdat Publ., 1991. 693 p.
8. Khaustov A.P., Redina M.M. Politsiklicheskie aromatische uglevodorody kak geokhicheskie markery neftyanogo zagryazneniya okruzhayushchey sredy [Polycyclic aromatic hydrocarbons as geochemical markers of oil pollution]. *Ekspozitsiya Neft – Gaz*, 2014, no. 4, pp. 92–96.
9. *Rukovodstvo po otsenke riska dlya zdorovya naseleniya pri vozdeystvii khimicheskikh veshchestv, zagryaznyayushchikh okruzhayushchuyu sredu* [Guidance on risk assessment for health when exposed to chemicals, polluting the environment]. R 2.1.10.1920-04. Moscow, Rospotrebnadzor Publ., 2004. 340 p.

10. Harvey R.G. *Polycyclic aromatic hydrocarbons*. Weinheim, Germany, Wiley-VCH Verlag GmbH, 1997. 300 p.
11. *ISPAC 2003 International Society for Polycyclic Aromatic Compounds 2003. ISPAC- International Society for Polycyclic Aromatic Compounds. 2008*. Available at: <http://www.ispac.org/links.html> (accessed 29 October 2014).
12. Lei X., Li W., Lu J., Tong Y., Li S. Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in snow of Mount Nanshan, Xinjiang. *Water and Environment Journal*, 2015, vol. 29, Iss. 2, pp. 252–258.
13. Long Y., Chi G., Qing H., Dai T., Wu Q. Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Street Dust from the Chang-Zhu-Tan Region, Hunan, China. *Journal of Environmental Protection*, 2011, vol. 2, no. 10, pp. 1331–1340.
14. Zhuravleva N.V., Potokina R.R., Ismagilov Z.R., Khabibulina E.R. Zagryaznenie snezhnogo pokrova politsiklicheskim aromaticeskimi uglevodorodami i toksicheskimi ehlementami na primere g. Novokuznetska [Snow cover pollution with polycyclic hydrocarbons and toxic elements on the example of Novokuznetsk]. *Khimiya v interesakh ustoychivogo razvitiya*, 2014, no. 21, pp. 445–454.
15. Belykh L.I., Gorshkov A.G., Ryabchikov I.A., Seryshev V.A., Marinayte I.I. Raspredelenie i biologicheskaya aktivnost politsiklicheskih aromaticeskikh uglevodorodov v ekosisteme istochnik – snezhny pokrov – pochva – rastenie [Distribution and biological activity of polycyclic aromatic hydrocarbons in the ecosystem source–snowpack–soil–plant]. *Sibirskiy ehkologicheskij zhurnal*, 2004, no. 11 (6), pp. 793–802.
16. Marinayte I.I., Gorshkov A.G., Taranenko E.N., Chipanina E.V., Khodzher T.V. Raspredelenie politsiklicheskih aromaticeskikh uglevodorodov v prirodnykh obektakh na territorii rasseivaniya vybrosov Irkutskogo alyuminievogo zavoda (g. Shelekhov, Irkutskaya oblast) [Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in natural objects on the territory of dispersion of emissions at Irkutsk aluminium smelter (g. Shelekhov, Irkutsk region)]. *Khimiya v interesakh ustoychivogo razvitiya*, 2013, no. 21, pp. 143–154.
17. Vershinina E.P., Gildebrandt E.M., Selina E.A. Tendentsii razvitiya proizvodstva svyazuyushchego dlya anodov alyuminievyykh elektrolizerov [Development trends of production of binders for anodes of aluminum electrolyzers]. *Zhurnal Sibirskogo federalnogo universiteta. Tekhnika i tekhnologii*, 2012, vol. 5, no. 7, pp. 752–759.
18. Anshits A.G., Kurteeva L.I., Tsyganova S.I., Suzdorf A.R., Anshits N.N., Morozov S.V. Sravnitel'naya otsenka emissii kantserogennykh veshchestv pri ispolzovanii sredne- i vysokotemperaturnykh pekov v proizvodstve alyuminiya v elektrolizerakh Soderberga [Comparative evaluation of emission of carcinogenic substances when using medium- and high-temperature pitches in aluminum production in Soderberg pots]. *Khimiya v interesakh ustoychivogo razvitiya*, 2001, no. 9, pp. 345–352.
19. Meysurova A.F., Khizhnyak S.D., Pakhomov P.M. Monitoring vozdušnogo zagryazneniya v rayone svinovodcheskogo kompleksa [Monitoring of air pollution near the pig-breeding complex]. *Ekoanalitika-2011. VIII Vserossiyskaya konferentsiya po analizu obektov okruzhayushchey sredy i shkola molodykh uchenykh, posuyashchennye 300-letiyu so dnya rozhdeniya M.V. Lomonosova. Tezisy dokladov* [Ecoanalitics-2011. VIII All-Russian conference on analysis of environmental objects and school for young scientists devoted to the 300 anniversary of the birth of M.V. Lomonosov]. Arhangelsk, 2011. P. 189. Available at: <http://csl.isc.irk.ru/BD/Books/ehkoanalitika2011.pdf> (accessed: 29.10.2014).
20. Bao H., Shrestha K.L., Kondo A., Kaga A., Inoue Y. Modeling the influence of biogenic volatile organic compound emissions on ozone concentration during summer season in the Kinki region of Japan. *Atmospheric Environment*, 2010, vol. 3, no. 44, pp. 421–431.
21. Nishimura H., Shimadera H., Kondo A., Bao H., Shrestha K.L., Inoue Y. Evaluation of light dependence of monoterpene emission and its effect on surface ozone concentration. *Atmospheric Environment*, 2015, vol. 104, pp. 143–153.
22. Plemenkov V.V. Khimiya izoprenoidov. Monoterpeny [Chemistry of isoprenoids. Monoterpenes]. *Khimiya rastitelnogo syrya*, 2006, no. 1, pp. 55–72.
23. Czecha C., Hammera S.M., Bonn B., Schmidta M.U. Adsorption sites, adsorption enthalpies and potential removal of terpenoids by atmospheric ice. *Atmospheric Environment*, 2011, vol. 45, Iss. 3, pp. 687–693.
24. Aaltonen H., Pumpanen J., Hakola H., Back J. Snowpack concentrations and estimated fluxes of volatile organic compounds in a boreal forest. *Biogeosciences*, 2012, vol. 9, Iss. 6, pp. 2033–2044. Available at: [www.biogeosciences.net/9/2033/2012](http://www.biogeosciences.net/9/2033/2012) (accessed 29 October 2014).

Received: 27 October 2015.

УДК 550.34.013.4

## РАСЧЕТ И АНАЛИЗ ТРИГГЕРНОГО ЭФФЕКТА ПРИЛИВНЫХ СИЛ НА НАИБОЛЕЕ КРУПНЫЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

**Чубаров Даниил Леонидович,**

студент Института природных ресурсов Национального исследовательского  
Томского политехнического университета,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: convert008@mail.ru

**Кочнев Владимир Алексеевич,**

доктор технических наук, ведущий научный сотрудник отдела  
вычислительной механики деформируемых сред Института  
вычислительного моделирования СО РАН, Россия, 660036, г. Красноярск,  
ул. Академгородок, 50, стр. 44. E-mail: kochnev@icm.krasn.ru

Большая часть твердых полезных ископаемых в мире (за исключением тех, что находятся на поверхности земли) добывается открытым и закрытым способом посредством штолен, шахт и других горных выработок. Немалая часть месторождений полезных ископаемых (в том числе и нефтяных) располагаются либо вблизи, либо непосредственно внутри зон повышенной сейсмологической активности (сюда можно отнести все месторождения Чили, Японии, Индонезии, некоторые месторождения США, России и других стран). Таким образом, если вблизи данных месторождений произойдет крупное землетрясение, то, вероятнее всего, это приведет, с одной стороны, к приостановке (или консервации) деятельности месторождения, с другой – к значительному числу жертв и экономическому ущербу. Чтобы избежать или хотя бы минимизировать данный ущерб, необходимо проводить полноценный сейсмологический мониторинг данных территорий, а также изучать все возможные причины возникновения землетрясений. Данная работа направлена на изучение природы землетрясений, что, несомненно, говорит об актуальности исследования.

**Цель данного исследования:** установить совместное триггерное воздействие гравитационных сил Луны и Солнца на сейсмологическую активность зон Земли.

**Методы исследования.** В данной работе за основу взята известная физико-математическая модель (приливная модель Дж. Дарвина), а также принято во внимание изменение относительного положения Луны и Солнца.

**Результаты.** При изучении триггерного воздействия приливных сил на сейсмологическую активность рассмотрены 6 наиболее крупных землетрясений, произошедших вблизи экваториальной широты за последние 15 лет. Построены изображения горизонтальных, вертикальных компонент и модулей вектора гравитационных сил на единичную массу в зависимости от взаимного положения Луны и Солнца в течение суток относительно исследуемого объекта с единичной массой. Проанализировано воздействие приливных сил на точки эпицентров 6 крупнейших землетрясений, произошедших вблизи экваториальной широты. Разрабатываемая технология может быть полезна в комплексе методов при изучении механизмов интегрирования и разрядки напряжений на границах блоковых структур.

### **Ключевые слова:**

Земные приливы, приливные силы, Луна, Солнце, триггерный эффект, сейсмологическая активность, землетрясения.

### **1. Введение. Обзор и анализ проблемы**

11 марта 2011 г. у восточного побережья острова Хонсю в Японии произошло землетрясение, ставшее причиной крупной радиационной аварии 7-го уровня по Международной шкале ядерных событий. Данное событие имело огромный резонанс во многих экологических организациях, так как нанесло огромный ущерб экологии и здоровью людей.

Стоит отметить, что в сейсмически активных зонах также располагаются и месторождения полезных ископаемых, разработка которых связана с компонентами, способными нанести вред как экологии, так и здоровью людей. Например, если вблизи Сахалинских нефтяных платформ произойдет землетрясение, которое спровоцирует цунами, не исключено их повреждение и, как следствие, – экологическая катастрофа, аналогичная разливу нефти в Мексиканском заливе в 2010 г. В связи с этим актуальным становится вопрос об изучении всех возможных механизмов возникновения землетрясений.

Одним из таких механизмов может быть воздействие приливных сил со стороны Солнца и Луны. Некоторые авторы отводят приливному силам роль в генерации магнитного поля Земли [1], аномалий электромагнитного излучения [2], не является секретом и наличие приливного горба на нашей планете.

Цель данной работы – установить наличие триггерного эффекта приливных сил в процессе подготовки наиболее крупных землетрясений.

Исследования связи приливных явлений с сейсмологической активностью берут свое начало в конце XIX века. Самые ранние статьи из тех, что удалось найти, были написаны Артуром Шустером (Arthur Shuster) [3] и Каргиллем Гильстоном Кноттом (Cargill Gilston Knott) [3] в 1897 и 1896 годах соответственно.

В своей статье [3] К.Г. Кнотт рассматривает взаимосвязь землетрясений, произошедших на территории Японии с 1885 по 1892 г., и оценивает связь частоты землетрясений с фазами Луны. В за-

ключении автор говорит о наличии доказательств связи между частотой землетрясений в изученном регионе и периодичностью, связанной с лунными сутками.

Роль триггера приливным силам в своей статье «Tidal triggering of earthquakes» [4] отвел Томас Хитон (Thomas H. Heaton). Анализируя результаты исследования, Хитон приходит к выводу, что в качестве триггера приливные силы если и могут действовать, то только для неглубоких (< 30 км) и слабых землетрясений.

В работе, выполненной группой британских ученых во главе с Р. Крокеттом (R.G.M. Crockett), проводилось исследование взаимосвязи приливных явлений с землетрясением 26 декабря 2004 года, произошедшего у берегов Суматры [5]. В заключении авторы утверждают, что корреляция между частотой землетрясений в данном регионе и фазами Луны (в период с 28 октября по 26 декабря 2004 г.) количественно оценена и довольно высока. Помимо вышеперечисленных авторов, изучением приливных сил и их способностью влиять на землетрясения, занималось большое количество исследователей из разных стран [6–12].

Из отечественных исследователей значительный вклад в развитие исследуемой тематики внес Юрий Николаевич Авсюк [13–16]. Вопросами взаимосвязи земных приливов и землетрясений занимался известный новосибирский ученый Гольдин Сергей Васильевич. В статье «Приливная модуляция слабой сейсмичности для южной части Сибири» [17] автор приводит результаты приливного анализа банков землетрясений азиатской части России по Байкальскому и Алтае-Саянскому регионам на примере Бусингольского землетрясения (27.12.1991).

## 2. Общие сведения о приливных силах.

### Физико-математическая модель исследования

Рис. 1 схематически иллюстрирует происхождение и свойства приливообразующих сил, вызванных Солнцем. Из данного рисунка следует, что величина приливообразующих сил равна  $ma_0\beta$ , где  $\beta=r/R$  – угол между направлениями на тело и на центр Земли из центра Солнца. Подставляя сюда  $a_0=GM_{sun}/R^2$  для приливной силы в точке А, получаем:

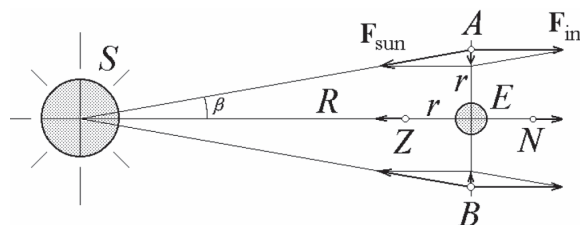


Рис. 1. Происхождение приливных сил вблизи Земли в неоднородном поле солнечного (лунного) тяготения [18]

Fig. 1. Sun-induced tide-generating forces in different points A, B, Z, and N [18]

$$F_A = G \frac{mM_{sun}}{R^2} \frac{r}{R}$$

Если тело находится в точке Z (для которой Солнце оказывается в зените), расстояние от тела до центра Солнца меньше, чем от центра Земли. Здесь сила тяготения Солнца в точности противоположна силе инерции, но имеет несколько большую величину. Поэтому приливная сила  $F_z$  в точке Z направлена вертикально вверх, от Земли к Солнцу. Ее величина дается соответствующей разностью:

$$F_z = G \frac{mM_{sun}}{(R-r)^2} - ma_0 = G \frac{mM_{sun}}{R^2} \frac{2r}{R}. \quad (1)$$

Точно такие же формулы применимы и для влияния Луны.

Однако во всех рассмотренных выше четырех точках приливные силы имеют вертикальные направления. Оказывается, что в промежуточных точках приливные силы имеют горизонтальные составляющие (рис. 2). Горизонтальные и вертикальные составляющие вектора приливной силы рассчитываются с учетом угла  $\theta$ .

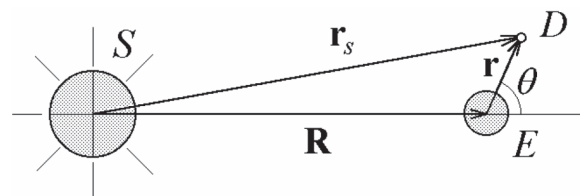


Рис. 2. Переменные  $r$  и  $\theta$ , используемые для указания положения произвольной точки вблизи Земли [18]

Fig. 2. Variables  $r$  and  $\theta$ , used for indicating location of an arbitrary point near the Earth surface [18]

Как видно из формулы (1), максимальные значения для горизонтальной составляющей будут наблюдаться при  $\theta=45^\circ$  и  $135^\circ$ , а при  $\theta=0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$  будут равны нулю. Соответствующие экстремумы вертикальной компоненты смещены на  $45^\circ$ .

Если же говорить о различии этих составляющих в зависимости от широты, то в таком случае нужно ввести величину  $r'$ , которая характеризует расстояние от исследуемой точки до оси вращения Земли:  $r'=r \cdot \cos\alpha$ , где  $\alpha$  – широтный угол. В таком случае очевидно, что максимальное значение приливной силы будет на экваторе, минимальное – на полюсах.

Далее необходимо принять во внимание, что взаимное положение Луны и Солнца – величина переменная, поэтому для разных положений на одну и ту же точку будет оказываться разное суммарное воздействие. Данную проблему можно решить, перебрав все возможные взаимные расположения Луны и Солнца (при шаге в 1 градус таких положений насчитывается 129600). Суммарная величина горизонтальной компоненты приливной силы находится сложением аналогичных компонент для Солнца и Луны при соответствующих их положениях.

Для примера рассмотрим случай, приведенный на рис. 3. Для экваториальной широты величина горизонтальной составляющей приливной силы, действующей со стороны Солнца и Луны на точку, будет находиться по формуле (2). В первом случае (со стороны Солнца) будет задействован угол  $\theta_1$ , во втором (со стороны Луны) –  $\theta_2$ . Общее значение горизонтальной компоненты будет находиться путем сложения этих двух величин. Точно так же по формуле (3) будет рассчитываться вертикальная компонента.

$$F_{hor} = -3G \frac{mM_{sun}}{R^3} r \cos \theta \sin \theta = -\frac{3}{2} G \frac{mM_{sun}}{R^3} r \sin \theta, \quad (2)$$

$$F_{vert} = G \frac{mM_{sun}}{R^3} r (3 \cos^2 \theta - 1) = \frac{3}{2} G \frac{mM_{sun}}{R^3} r (\cos 2\theta + \frac{1}{3}). \quad (3)$$

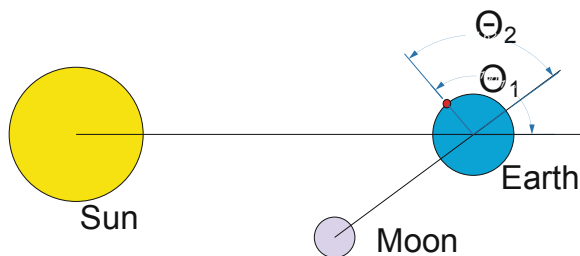


Рис. 3. Пример взаимного расположения Солнца и Луны

Fig. 3. Example of the Moon and the Sun relative position

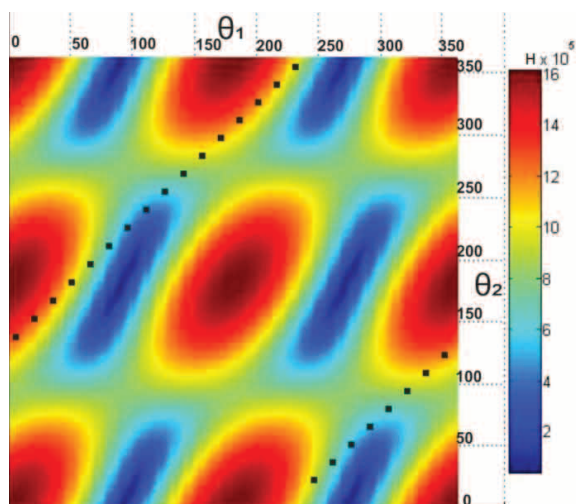


Рис. 4. Значение модуля суммарного вектора приливной силы Солнца и Луны: горизонтальная ось – значение угла  $\theta_1$ , вертикальная ось – значение угла  $\theta_2$ . ■ – суточные вариации (шаг – 1 час)

Fig. 4. Value of a module of the Moon and the Sun tidal force summarized vector. Axis: x – value of  $\theta_1$ , y – value of  $\theta_2$ ; ■ – daily variations (a step is an hour)

Рассмотрим модель действия приливных сил Луны и Солнца на тело, представляющее собой куб

с ребром 1 км, состоящий из воды плотностью 1 г/см<sup>3</sup> (масса такого объекта будет равна 10<sup>12</sup> кг).

Модуль суммарного вектора приливной силы рассчитывался по формуле  $F = \sqrt{F_{hor}^2 + F_{vert}^2}$ . Значения этой величины представлены на рис. 4.

### 3. Связь приливных сил с землетрясениями

Далее проанализируем влияние приливных сил на наиболее крупные землетрясения, произошедшие вблизи экваториальной широты. Данные о выбранных землетрясениях приведены в таблице.

Таблица. Землетрясения, выбранные для изучения триггерного воздействия приливных сил

Table. Earthquakes, chosen for trigger action of tidal forces exploration

N	Место Location	Ms	Дата Date	Время Time (UTC)			Широта Latitude	Долгота Longitude
				ч h	м m	с s		
1	Индонезия (Indonesia)	8,8	26.12.2004	0	58	48	3,39	95,84
		7,3	26.12.2004	4	21	26	6,8	92,86
		6,1	26.12.2004	19	19	55	3,08	93,49
2	Суматра (Sumatra)	8,5	11.04.2012	8	38	34	2,35	92,92
		8,2	12.04.2012	10	43	7	0,85	92,5
3	Суматра (Sumatra)	8,5	28.03.2005	16	9	34	2,03	97,01
		5,5	28.03.2005	23	12	58	2,92	96,47
4	Суматра (Sumatra)	8,3	12.09.2007	11	10	23	-4,4	101,48
		8,1	12.09.2007	23	49	1	-2,54	100,85
		7,3	13.09.2007	3	35	28	-2,08	99,67
5	Папуа-Новая Гвинея (Papua-New Guinea)	7,7	16.11.2000	7	42	14	-5,54	153,42
		7,5	16.11.2000	4	54	56	-4,41	152,05
		6	16.11.2000	11	5	39	-5,33	153,09
6	Перу (Peru)	7,9	15.08.2007	23	40	56	-13,31	283,4
		5,6	16.08.2007	11	35	30	-14,34	283,06

Методика определения влияния приливных сил на эпицентр землетрясения в момент толчка состоит в следующем. По известной широте и известной угловой скорости вращения Земли определялась временная поправка для точки эпицентра землетрясения (точная до секунд разность времени по сравнению с Гринвичским). По этой поправке рассчитывалось точное местное время в момент землетрясения, и по этому времени по формуле (4) определялся угол  $\theta_1$ , характеризующий положение Солнца относительно данной точки в момент толчка:

$$\theta_1 = t \cdot v_s, \quad (4)$$

где  $t$  – местное время землетрясения;  $v_s$  – угловая скорость вращения Земли (15 град/час).

По известному времени землетрясения определялся угол элонгации между Солнцем и Луной (рис. 5). Формула связи угла  $\alpha$  и угла элонгации  $\alpha'$  приведена в работе бельгийского ученого Поля Дж. Мелькиора [18] и выглядит следующим образом:

$$\cos \alpha' = \cos \alpha - \frac{a}{r} \sin^2 \alpha. \quad (5)$$



Рис. 5. Угол элонгации  $\alpha$  между Луной и Солнцем

Fig. 5. Elongation angle  $\alpha$  between the Moon and the Sun

В конце по данному углу рассчитывался угол  $\theta_2$ , характеризующий положение Луны относительно точки эпицентра в момент толчка. Далее, зная углы  $\theta_1$  и  $\theta_2$ , можем рассчитать значение горизонтальной (и вертикальной) компоненты приливной силы, а также значение модуля суммарного вектора.

Для того что бы понять степень влияния приливных сил на то или иное землетрясение, необходимо проследить изменение значений суммарного модуля приливных сил за некоторое время до самого события. Здесь необходимо учитывать, что в каждый момент времени для точки эпицентра изменялись не только углы  $\theta_1$  и  $\theta_2$ , но и расстояния до Солнца и Луны, а также наклон земного шара относительно этих двух объектов. Иллюстрации изменения приливных сил в эпицентрах землетрясений приведены на рис. 6–8.

#### 4. Заключение

Исследования, проводимые как российскими (Ребецкий Ю.Л., 2007), так и зарубежными (Melti- ever L. и др., 2009) исследователями, показывают, что в целом роль приливных сил при подготовке землетрясений численно не велика. Тем не менее, полностью отрицать участие приливных сил в фор-

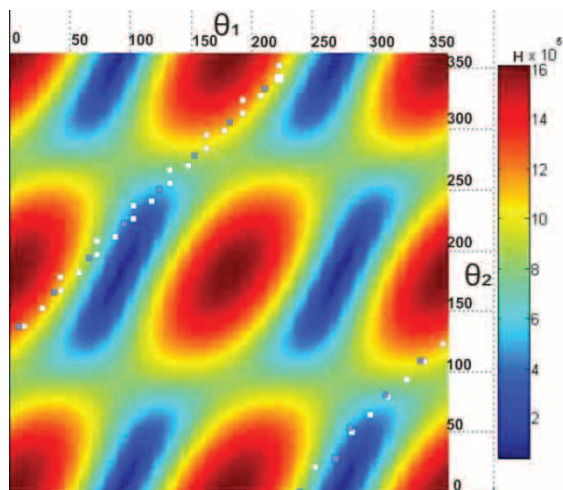


Рис. 6. Влияние приливных сил на точки эпицентров землетрясений на Суматре и в Папуа-Новой Гвинее в течение суток до толчка

Fig. 6. Influence of variation of tidal forces summarized vector on earthquake epicenter points in Sumatra and Papua-New Guinea during the day before the shock

	Воздействие приливных сил на эпицентр землетрясения на Суматре 11.04.2012 г. в течение суток до момента толчка (сам толчок отмечен увеличенным квадратом), шаг – 1 час
	Воздействие приливных сил на эпицентр землетрясения в Папуа-Новой Гвинее 16.11.2000 г. в течение суток до момента толчка (сам толчок отмечен увеличенным квадратом), шаг – 2 часа

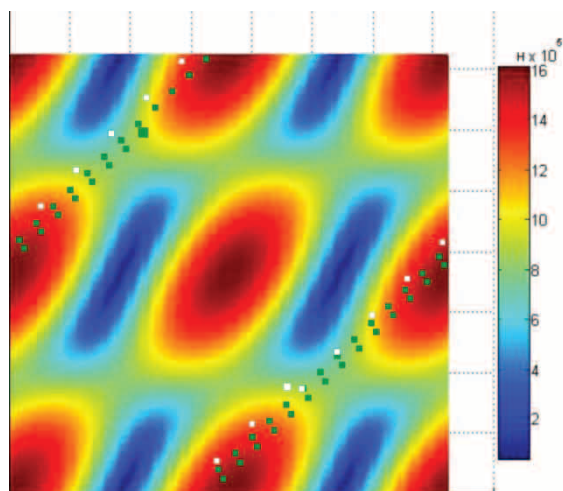
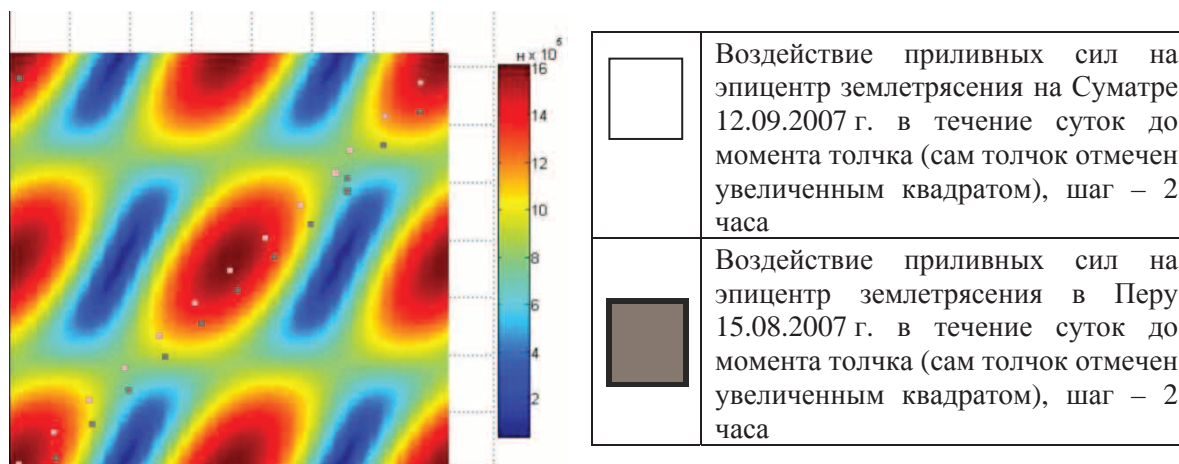


Рис. 7. Влияние приливных сил на точки эпицентров землетрясений в Японии и Индонезии в течение суток до толчка

Fig. 7. Influence of variation of tidal forces summarized vector on earthquake epicenter points in Indonesia and Japan during the day before the shock

	Воздействие приливных сил на эпицентр землетрясения в Японии 11.03.2011 г. в течение суток до момента толчка (сам толчок отмечен увеличенным квадратом), шаг – 2 часа
	Воздействие приливных сил на эпицентр землетрясения в Индонезии 26.12.2004 г. в течение суток до момента толчка (сам толчок отмечен увеличенным квадратом), шаг – 1 час



**Рис. 8.** Влияние приливных сил на точки эпицентров землетрясений на Суматре и в Перу в течение суток до толчка

**Fig. 8.** Influence of variation of tidal forces summarized vector on earthquake epicenter points in Sumatra and Peru during the day before the shock

мировании поля напряжений в земной коре не берется ни один исследователь, и для регионов, где сейсмологическая активность наиболее высока (Япония, Индонезия и т. д.), изучение любых возможных механизмов, приводящих к землетрясениям, является весьма актуальной проблемой.

Данное исследование может быть полезно в комплексе методов при изучении механизмов интегрирования и разрядки напряжений на границах блоковых структур, а также для более точного понимания и численного описания процесса подготовки землетрясений.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кочнев В.А. Кинематико-гравитационная модель геодинамо // Геофизический журнал. – 2013. – Т. 35. – № 4. – С. 3–15.
2. Степанов М.В. Изучение краткосрочных предвестников землетрясений методом электромагнитной эмиссии: дис. ... канд. физ.-мат. наук. – М., 2004. – 190 с.
3. Schuster A. On Lunar and Solar Periodicities of Earthquakes // Proc. R. Soc. Lond. – 1897. – № 61. – P. 455–465.
4. Knott C.G. On Lunar Periodicities in Earthquake Frequency // Proc. R. Soc. Lond. – 1896. – № 60. – P. 457–466.
5. Heaton T.H. Tidal triggering of earthquakes // Geophys. J. R. astr. Soc. – 1975. – № 43. – P. 307–326.
6. Tidal synchronicity of the 26 December 2004 Sumatran earthquake and its aftershocks / R.G.M. Crockett, G.K. Gillmore, P.S. Phillips, D.D. Gilbertson // Geophys. Res. Lett. – 2006. – № 33. L19302. DOI: 10.1029/2006GL027074.
7. Emter D. Tidal triggering of earthquakes and volcanic events // Tidal Phenomena / Ed. by H. Wilhelm, W. Zurn, H.G. Wenzel. – New York: Springer, 1997. – P. 293–310.
8. Knopoff L. Earth tides as a triggering mechanism for earthquakes // Bull. seism. Soc. Am. – 1964. – № 54. – P. 1865–1870.
9. Earthquake Clustering Relative to Lunar Phases in Taiwan / C.H. Lin, Y.H. Yeh, Y.I. Chen, J.Y. Liu, K.J. Chen // TAO. – 2003. – V. 14. – № 3. – P. 1–10.
10. Palumbo A. Lunar and solar tidal components in the occurrence of earthquakes in Italy // Geophys. J. R. Astr. Soc. – 1986. – № 84. – P. 93–99.
11. Rydelek P.A., Davies P.M., Koyanagi R.Y. Tidal triggering of earthquake swarms at Kilauea Volcano, Hawaii // J. Geophys. Res. – 1988. – № 95. – P. 4401–4411.
12. Shirley J.H. Lunar and solar periodicities of large earthquake: Southern California and Alaska-Aleutian islands seismic region // Geophys. J. – 1988. – № 92. – P. 403–420.
13. Wilcock W.S.D. Tidal triggering of micro earthquakes on the Juan de Fuca Ridge // Geophys. Res. Lett. – 2001. – № 28 (20). – P. 3999–4002.
14. Авсюк Ю.Н. Приливные силы и природные процессы. – М.: ОИФЗ РАН, 1996. – 188 с.
15. Авсюк Ю.Н. Связь приливной эволюции системы Земля–Луна с проблемами геодинамики // Вестник Российской академии наук. – 1996. – Т. 66. – № 2. – С. 129–134.
16. Авсюк Ю.Н. Эволюция системы Земля–Луна и ее место среди проблем нелинейной геодинамики // Геотектоника. – 1993. – № 1. – С. 13–22.
17. Приливная модуляция слабой сейсмичности для южной части Сибири / С.В. Гольдин, В.Ю. Тимофеев, М. ван Раумбеке, Д.Г. Ардюков, М.Е. Лаврентьев, Р.Г. Седусов // Физическая мезомеханика. – 2008. – Т. 11. – № 4. – С. 81–93.
18. Butikov E. A Dynamical Picture of the Oceanic Tides // American Journal of Physics. – 2002. – V. 70. – № 10. – P. 1001–1011.
19. Melchior P. Earth tides // Geophysical Surveys. – 1974. – № 1. – P. 275–303.
20. Ребецкий Ю.Л. Механизм генерации тектонических напряжений, обусловленный гравитационными силами, пластическим течением и вертикальными перемещениями // Девятые геофизические чтения Федынского: тез. докладов. – М.: Изд-во «Геос», 2007. – С. 80–81.
21. Evidence of earthquake triggering by the solid earth tides / L. Meltiever, O. de Viron, C.P. Conrad, S. Renault, M. Diamant, G.Patau // Earth Planet. Sci. Lett. – 200. – № 278. – P. 370–375. DOI:10.1016/j.epsl.2008.12.024.

Поступила 25.01.2016 г.

UDC 550.34.013.4

## CALCULATION AND ANALYSIS OF TIDAL FORCES TRIGGER EFFECT ON THE GREATEST EARTHQUAKES

Daniil L. Chubarov,

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk,  
634050, Russia. E-mail: convert008@mail.ru

Vladimir A. Kochnev,

Institute of Calculation Modeling SB RAS, 50/44, Akademgorodok Street,  
Krasnoyarsk, 660036, Russia. E-mail: kochnev@icm.krasn.ru

The majority of solid minerals in the world (excluding those, which are on the Earth's surface) are mined by the open- and close-cut techniques using adits, mines and other minings. A large part of deposits of minerals (including the oil ones) occur either close or just inside the areas of higher seismological activity (all deposits in Chilly, Japan, Indonesia, some deposits in the USA, Russia and other countries can be referred to this type). Thus, if a major earthquake occurs near such deposit it will probably result in suspension (conservation) of the deposit activity, on the one hand, and on the other hand in significant amount of victims and economic damage. In order to avoid or at least to minimize the damage it is necessary to monitor the seismological situation in these territories and to study all possible causes of earthquake occurrence. The paper is devoted to the study of the earthquake nature. This is the relevance of the research.

**The aim** of the study is to establish the combined effect of the gravitational forces of the Moon and Sun on the Earth's seismological activity zones.

**Methods.** Physical and mathematical model (G. Darwin tidal model) is taken as a basis, and the combined effect of the Moon and Sun and their relative positions are taken into account.

**Results.** The authors have studied six largest earthquakes with epicenters located near the equator during the last 15 years and prepared a map of horizontal and vertical components and the magnitudes of gravitational force, depending on the relative position of the moon and the sun. The influence of tidal forces on epicenters of six greatest earthquakes, located near the equator, was analyzed. The developed technique can be useful for studying the mechanisms of stress at the boundaries of block structures.

**Key words:**

Earth tides, tidal forces, Moon, Sun, trigger effect, seismological activity, earthquakes.

## REFERENCES

- Kochnev V.A. Kinematiko-gravitatsionnaya model gedynamo [Geodynamo kinematics and gravitational model]. *Geophysical journal*, 2013, vol. 35, no. 4, pp. 3–15.
- Stepanov M.V. *Izychenie kratkosrochnykh predvestnikov zemletryaseniy metodom elektromagnitnoy emissii*. Dis. Dokt. nauk [Research of short earthquakes precursors by the electromagnetic emission method. Dr. Diss]. Moscow, 2004. 190 p.
- Schuster A. On Lunar and Solar Periodicities of Earthquakes. *Proc. R. Soc. Lond.* 1897, no. 61, pp. 455–465.
- Knott C.G. On Lunar Periodicities in Earthquake Frequency. *Proc. R. Soc. Lond.*, 1896, no. 60, pp. 457–466.
- Heaton T.H. Tidal triggering of earthquakes. *Geophys. J. R. astr. SOC.*, 1975, no. 43, pp. 307–326.
- Crockett R.G.M., Gillmore G.K., Phillips P.S., Gilbertson D.D. Tidal synchronicity of the 26 December 2004 Sumatran earthquake and its aftershocks. *Geophys. Res. Lett.*, 2006, no. 33, L19302. DOI: 10.1029/2006GL027074.
- Emter D. Tidal triggering of earthquakes and volcanic events. *Tidal Phenomena*. Eds. H. Wilhelm, W. Zurn, H.G. Wenzel. New York, Springer, 1997. pp. 293–310.
- Knopoff L. Earth tides as a triggering mechanism for earthquakes. *Bull. seism. SOC. Am.*, 1964, no. 54, pp. 1865–1870.
- Lin C.H., Yeh Y.H., Chen Y.I., Liu J.Y., Chen K.J. Earthquake Clustering Relative to Lunar Phases in Taiwan. *TAO*, 2003, September, 14, no. 3, pp. 1–10.
- Palumbo A. Lunar and solar tidal components in the occurrence of earthquakes in Italy. *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 1986, no. 84, pp. 93–99.
- Rydelek P.A., Davies P.M., Koyanagi R.Y. Tidal triggering of earthquake swarms at Kilauea Volcano, Hawaii. *J. Geophys. Res.*, 1988, no. 95, pp. 4401–4411.
- Shirley J.H. Lunar and solar periodicities of large earthquake: Southern California and Alaska-Aleutian islands seismic region. *Geophys. J.*, 1988, no. 92, pp. 403–420.
- Wilcock W.S.D. Tidal triggering of micro earthquakes on the Juan de Fuca Ridge. *Geophys. Res. Lett.*, 2001, no. 28 (20), pp. 3999–4002.
- Avsyuk Yu.N. *Prilivnye sily i prirodnye protsessy* [Tidal forces and natural processes]. Moscow, OIPE RAS Press, 1996. 188 p.
- Avsyuk Yu.N. Svyaz prilivnoy evolyutsii sistemy Zemlya–Luna s problemami geodinamiki [Relation between tidal evolution of the Earth–Moon system and problems of geodynamic]. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 1996, 66, no. 2, pp.129–134.
- Avsyuk Yu.N. Evolyutsia sistemy Zemlya–Luna i ee mesto sredi problem nelineynoy geodinamiki [Evolution of the Earth–Moon system and its place in problems of nonlinear geodynamic]. *Geotectonics*, 1993, no. 1, pp. 13–22.
- Goldin S.V., Timofeev V.Yu., van Ruymbeke M. Prilivnaya modulatsia slaboy seysmichnosti dlya yuzhnoy chaste Sibiri [Tidal modulation of low seismicity in Southern Siberia]. *Physical Mesomechanics*, 2008, vol. 11, no. 4, pp. 81–93.
- Butikov E. A Dynamical Picture of the Oceanic Tides. *American Journal of Physics*, 2002, October, vol. 70, no. 10, pp. 1001–1011.
- Melchior P. Earth tides. *Geophysical Surveys*, 1974, no. 1, pp. 275–303.
- Rebetsky Yu.L. Mekhanizm generatsii tektonicheskikh napryazheniy obuslovlenny gravitatsionnymi silami, plasticheskimi techeniyami i vertikalnymi peremeshcheniyami [Mechanism of tectonic stress generation by gravitational forces, plastic flow and vertical movement]. *Devyatye geofizicheskie chteniya Fedynskogo* [Fedynsky Ninth geophysical conference. Abstracts]. Moscow, 1–3 of March 2007. Moscow, Gers Publ., 2007. pp. 80–81.
- Meltieuer L., de Viron O., Conrad C.P., Renault S., Diamant M., Patau G. Evidence of earthquake triggering by the solid earth tides. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2009, no. 278, pp. 370–375. DOI: 10.1016/j.epsl.2008.12.024.

Received: 25 January 2016.



УДК 550.83+550.36:551.2(571.6)

## РЕОЛОГИЧЕСКАЯ И ГЕОТЕРМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОХОТОМОРСКОГО ПЛЮМА

**Петрищевский Александр Митрофанович,**

доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры геофизики  
Института природных ресурсов Национального исследовательского  
Томского политехнического университета,  
Россия, 634050, Томск, пр. Ленина, 30; заведующий лабораторией  
моделирования геологических структур Института комплексного анализа  
региональных проблем ДВО РАН, Россия, 679016, г. Биробиджан,  
ул. Шолом Алейхема, 4. E-mail: petris2010@mail.ru

**Актуальность работы** обусловлена необходимостью выяснения тектонической природы Охотского моря и глубинного строения тектоносферы Охотоморской переходной зоны «континент-океан», поскольку с этими вопросами связано прогнозирование углеводородного потенциала этой территории.

**Цель работы:** исследовать и дать тектоническую оценку пространственным распределениям формальных и взаимно независимых гравитационных и термометрических признаков существования структуры центрального типа плюмовой природы в тектоносфере Охотского моря.

**Методика исследований:** построение 3D-реологических гравитационных и геотермических моделей тектоносферы.

**Результаты.** С помощью геотермических и гравитационных моделей в Охотоморском регионе охарактеризованы признаки линейных рифтогенных и концентрически зональных (надплюмовых) распределений геофизических параметров, что указывает на существование здесь двух классов тектонических структур и соответствующих геодинамических процессов. В результате анализа пространственных распределений температуры и гравитационного параметра, характеризующего реологические свойства тектонических сред, определены местоположение и пространственные параметры головы Охотоморского плюма, стволочная часть которого приурочена к поднятию Института Океанологии. Кровля головы плюма диаметром 800–850 км прогнута над мантийным стволом. В кровле термической астеносферы с температурой 1200 °С выявлены области вязких сред, предположительно соответствующие магматическим очагам под впадиной Дерюгина, Южно-Охотским и Татарским рифтами. Второй ярус магматических очагов под этими же структурами, а также под вулканическими поясами (Охотско-Чукотским, Восточно-Камчатским и Восточно-Сихотэ-Алинским) выявлен в нижнем слое земной коры на глубинах 20–30 км и подкоровом слое верхней мантии. Астеносфера в зонах растяжения приближается к поверхности Земли до глубины 30–60 км. Полученные модели доказывают растекание астеносферной части мантийного плюма под подошвой литосферы. Нижняя литосфера Охотоморского региона расчленена двумя региональными зонами растяжения – глубокими раздвигами: Дерюгинским и Южно-Охотским, наложенными на плюм или предшествующими ему.

### **Ключевые слова:**

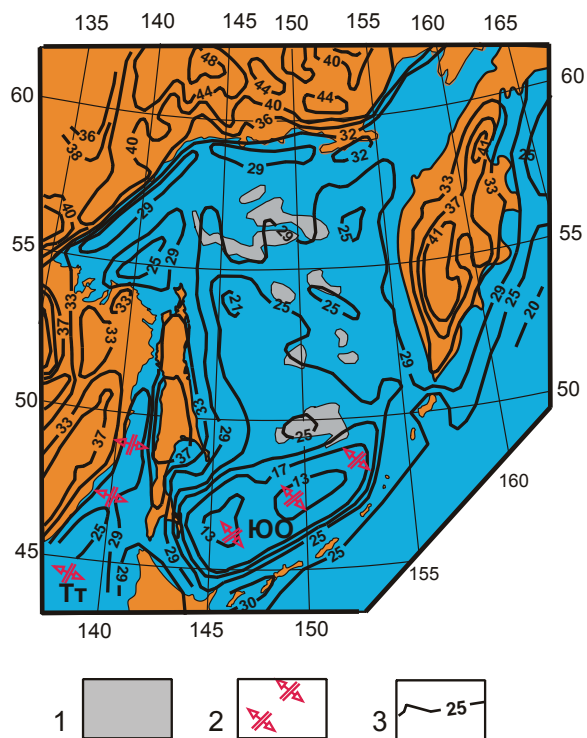
Гравитационные модели, реология, тепловой поток, температура, земная кора, верхняя мантия, астеносфера, Охотоморский регион.

### **Постановка задачи**

Тектоническая природа и глубинное строение тектоносферы Охотского моря являются предметом острых дискуссий. Одни исследователи [1, 2] отождествляют эту плиту с затопленной окраиной континента, другие [3] – предполагают ее океаническое происхождение и отождествляют плиту с океаническим базальтовым плато, причлененным к континенту в позднем мезозое, третьи [4] – связывают ее образование с подъемом мантийного диапира.

Начиная с миоцена и до настоящего времени Охотоморская плита является местом проявления интенсивных деструктивных процессов, в результате которых ее земная кора была раздроблена [5] и пронизана магматическими инъекциями преимущественно андезитового состава [6, 7]. В приповерхностном слое эти процессы выражены многочисленными рифтогенными впадинами, мощность осадков в которых достигает 8 км (в среднем – 3–4 км) [5, 8], а в нижней литосфере – образованием трансрегиональной Охотско-Анадырской структуры растяжения [9]. В последнее время некоторые сторонники континентальной природы Охотоморской плиты [10] поддерживают плюмо-

вую модель ее образования, в которой, однако, сохраняется роль континентального фундамента вулканических структур в формировании и строении дна Охотского (так же как Японского и Филиппинского) окраинного моря. Геометрические модели тектоносферы Охотского моря описываются в самом общем виде неоднозначно и в немногочисленных работах [1, 5, 9, 11–13]. Последние преимущественно основываются на сейсмических разрезах [1, 5, 8], реже на измерениях теплового потока [5, 14, 15], геоэлектрических [11] и гравитационных [9, 12, 13, 16] моделях. В одной из таких работ [5], в частности, приведена тепловая модель кровли астеносферы, достигающей глубины 20–30 км под Центрально-Охотоморской подводной возвышенностью, хотя сейсмические разрезы в этом районе Охотского моря [1, 8] свидетельствуют об отсутствии разрыва нижнего слоя земной коры. Мощность земной коры Охотского моря сокращена на 12–15 км относительно прибрежно-материковых районов и полуострова Камчатка, однако на прилагаемой схеме (рис. 1) структура центрального типа не просматривается, а наименьшая мощность коры отмечена в Южно-Охотской впадине.



**Рис. 1.** Схема мощности земной коры Охотоморского региона [5]: 1 – подводные возвышенности; 2 – оси рифтов: ТТ – Татарского; ЮО – Южно-Охотского; 3 – изопахиты подошвы земной коры, км

**Fig. 1.** Map of the crustal thickness of the Okhotsk Sea area [5]: 1 are the submarine rises; 2 are the axes of rifts: TT – Tatarsky; ЮО – South-Okhotsky; 3 – isopachytes of the Earth's crust bottom, km

Отсюда следует вывод, что признаки Охотоморского плюма ранее можно было найти только в структурах верхней мантии. Они были проявлены в выпуклой форме Охотоморской литосферной плиты и обширном ареале сред пониженной вязкости на глубинах от 80 до 120 км, отождествляемом с астеносферой [12, 13]. Исследования, результаты которых приводятся ниже, обнаружили такие признаки в среднем слое земной коры, начиная с глубины 20 км.

В гипотезах формирования тектонических структур дна Охотского моря тепловым процессам отводилась значительная роль и предлагались разные механизмы этих процессов. Большинство исследователей считает, что тепловые аномалии Охотского моря в основном определяются мантийной составляющей. Однако они признают, что «...трудно достоверно установить, из какого интервала глубин поступает нагретое вещество и подается ли оно сразу в подкоровое пространство или образует какой-то промежуточный резервуар, тепловой эффект которого достигает поверхности через сотни миллионов лет» [1, с. 30]. Это обстоятельство требует привлечения других геофизических данных, компарируемых с теплофизическими моделями.

В предлагаемой вниманию читателей статье сопоставляются 3D-тепловая модель Охотоморского

региона с распределениями гравитационного  $\mu_z$ -параметра, характеризующего реологическое состояние тектонических сред [13]. Подразумевается, что оба параметра отражают степень вязкости сред, обусловленную их флюидно-термической проработкой.

#### Исходные данные и методика построения моделей

Исходными данными для построения объемной гравитационной модели  $\mu_z(x, y, z)$  в тектоносфере Охотоморского региона являются симметричные гравитационные аномалии Буге всех видимых пространственных классов, регистрируемые на параллельных равноотстоящих друг от друга (на 30 км) профилях широтного направления. Для каждой аномалии, число которых в регионе составило 1570, вычислялась глубина залегания центра масс возмущающего источника ( $Z_0$ ) и измерялась соответствующая ему амплитуда аномалии Буге ( $V_{zm}$ ). Источники гравитационных аномалий дифференцировались по слоям, ограничиваемых поверхностями на глубинах: 0, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 60, 80, 100, 120, 150 и 180 км. Аномальные массы каждого слоя выметались (по Пуанкаре) на поверхности эквивалентных сфер, касательных к поверхностям слоев, и рассчитывались значения параметра:

$$\mu_z = \frac{V_{zm} Z_0}{4\pi K (Z_0 - Hc)^2},$$

где  $Hc$  – глубина залегания поверхности, касательной к поверхностям эквивалентных сфер;  $K$  – гравитационная постоянная.  $Hc(n)$  всегда располагалась выше поверхности слоя ( $n$ ), поэтому функция  $\mu_z$  не терпит разрыв в точках  $Z_0 = Hc$ . Пиковые значения  $\mu_z$ -параметра в точках, близких к поверхностям  $Hc$ , сглаживались. Физический смысл этого параметра соответствует поверхностной плотности эквивалентной сферы, нормированной по глубине залегания центра масс.

$\mu_z$ -параметр характеризует плотностную контрастность геологических сред на отрезках между вычисленными центрами аномальных масс и поверхностями  $Hc$ . В разрезе тектоносферы Северо-Восточной Азии повсеместно низкие значения  $\mu_z$ -параметра установлены в подкоровом вязком слое [17] и астеносфере [12, 13], где они совпадают с низкими значениями удельных электрических сопротивлений, зонами затухания и поглощения сейсмических волн, нередко сопровождаемыми повышением температуры.

В результате вычислений была сформирована 3D-модель  $\mu_z(x, y, Hc)$ , трансформированная в матрицу с размерами ячеек  $50 \times 50 \times 20$  км.

Вторым параметром, опосредованно характеризующим относительную вязкость тектонических сред, является простейшая модель распределения температур  $T$  °C ( $x, y, z$ ), рассчитанная в точках измерения теплового потока (122 точки) для дискретных значений глубин – 0, 5, 10, 20, 30, 40, 60, 80, 100, 120, 150 и 200 км.

При расчетах температур были приняты условия стационарного теплового режима и вертикального кондуктивного теплопереноса в однородной среде, описываемого одномерным уравнением теплопроводности [18]:

$$\frac{d}{dz} \left( \lambda \frac{dT}{dz} \right) = -A(z),$$

где  $T$  – температура;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $A$  – тепловыделение в горных породах;  $z$  – глубина расчетной точки.

Предполагается, что нестационарные эффекты и влияние невертикальных потоков малы по сравнению с другими погрешностями модели. Граничными условиями расчетов [14, 15] являются следующие допущения:

- температура на поверхности Земли (среднегодовая для Охотского моря) равна нулю;
- тепловой поток во внешнем пространстве равен нулю.

Температура на подошве «геотермической» литосферы принята равной 1200 °С. Ниже подошвы литосферы распределение температур определялось как произведение адиабатического градиента на мощность слоя. Адиабатический градиент определяется термодинамической формулой:

$$dT / dp = \alpha T / c p,$$

где  $p$  – давление;  $\alpha$  – коэффициент объемного расширения;  $\rho$  – плотность пород;  $c$  – теплоемкость при постоянном давлении. После упрощений для  $T=1300$  °С  $dT/dz \approx 0,5$  °С/км [18].

В приводимых моделях приняты следующие значения тепловыделения в слоях тектоносферы: приповерхностный вулканогенно-осадочный слой – 1,2; гранитно-метаморфический слой – 0,9; «базальтовый» слой – 0,5; верхняя мантия от подошвы земной коры до подошвы литосферы – 0,05; верхняя мантия ниже подошвы литосферы – 0,005 мкВт/м<sup>3</sup>.

В тех же слоях средние значения коэффициентов теплопроводности составляют: 1,7; 2,1; 1,5; 5,0 и 10,0 Вт/мК. Задаваемые значения ( $A$ ) и ( $\lambda$ ) соответствуют принятым в этом регионе [14, 16].

Средняя мощность земной коры в Охотском море принята равной 30 км, а в прилегающих районах континента – 40 км. Средняя мощность литосферы в акватории моря составляет 80 км, а в континентальных районах – 150 км [14].

Для построения 3D-модели распределений температур в интервале глубин 0–200 км в границах Охотоморского региона (рис. 2, а) результаты вычислений транспонированы в ячейки регулярной сети с размерами 50×50×20 км. Полученный цифровой массив  $T$  °С ( $x, y, z$ ) использован в дальнейшем для построения графических образов (карт-срезов и разрезов) распределений температур в земной коре и верхней мантии Охотоморского региона с помощью программного пакета Surfer-8 и интерфейса Глаголева–Петрищевского [19]. При построении разрезов размеры ячеек в горизонтальных срезах модели сужались до 10×10 км.

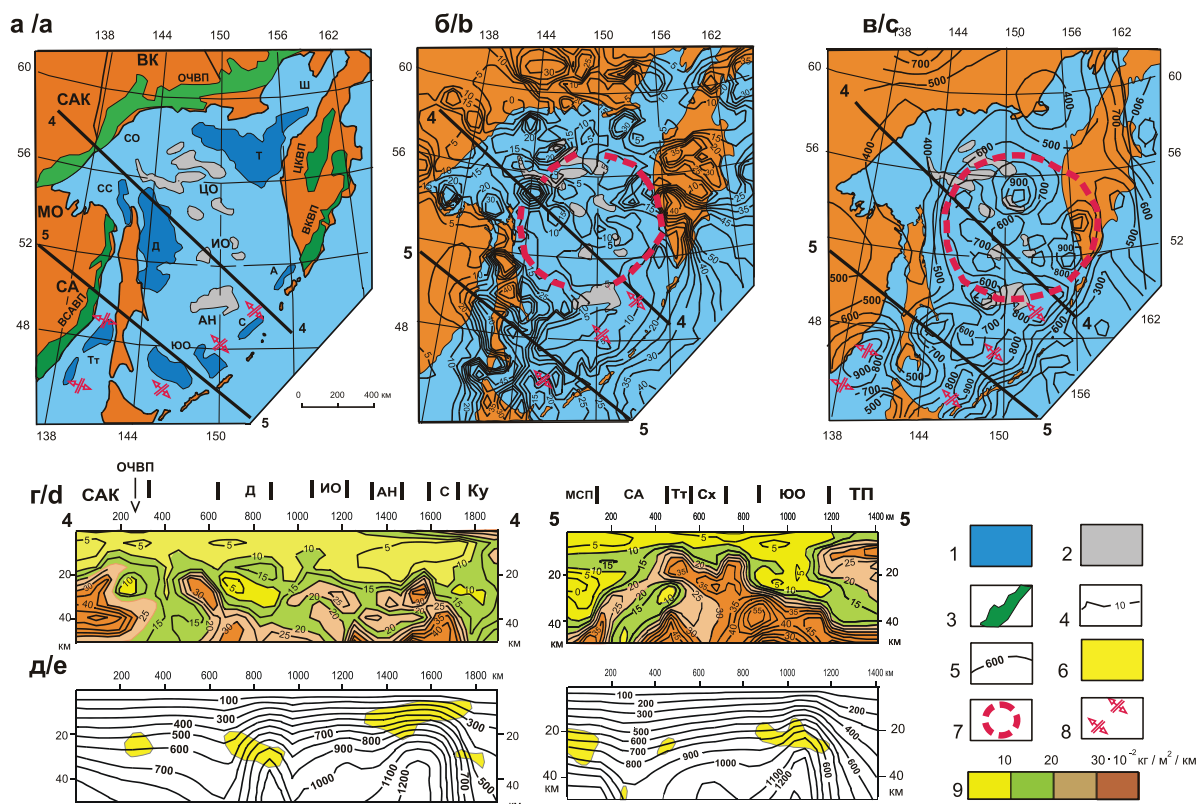
Построенная таким образом 3D-температурная модель обеспечивает развернутый (объемный) и более детальный, по сравнению с предшествующими, анализ распределений температур в земной коре и верхней мантии исследуемого региона, который открывает возможность выявления новых региональных закономерностей распределения и корреляции тепловых аномалий с тектоническими структурами, в том числе уточнения пространственных параметров Охотоморского плюма. Выполненные построения сопоставлены с реологической гравитационной 3D-моделью тектоносферы этого региона в тех же узлах расчетной сети [12], что позволило оценить глубину залегания и вероятные формы источников тепловых аномалий в разрезах тектоносферы.

#### Сопоставление гравитационной и геотермической моделей головы Охотоморского плюма

Признаки структуры центрального типа в тектоносфере Охотского моря в обеих моделях начинают проявляться в среднем слое земной коры, начиная с глубины 20 км. Температурный срез на этой глубине (рис. 2, в) характеризуется наличием изометричного максимума температуры в центральном районе Охотского моря, очерчиваемого изотермой 600 °С с севера, запада и востока. Максимум обладает концентрической зональностью, типичной для структур центрального типа [20, 21]. Внутри максимума локальные повышения температуры до 900 °С располагаются по его периферии, а в центре структуры температура понижена. Такая зональность в распределении температур может быть обусловлена инверсией (прогибанием) свода корового тектоно-магматического сооружения над стволовой частью мантийного плюма. В срезе гравитационной модели (рис. 2, б) на этой же глубине центральная часть Охотского моря отмечается аномально низкими значениями  $\mu_z$ -параметра (0–7 усл. ед.), что может быть следствием размягчения (уменьшения вязкости) нижнего слоя земной коры под влиянием тепла, мантийных флюидов и кайнозойских магм. Широкий минимум  $\mu_z$ -параметра близок по размерам к температурному максимуму (рис. 2, в) и обрамляется концентрически расположенными локальными максимумами  $\mu_z$ -параметра (рис. 2, б).

В юго-восточном районе Охотского моря линейный максимум температур в среднекоровом срезе совпадает с Южно-Охотской рифтовой зоной, а внутри него локальные максимумы коррелируются с кайнозойскими впадинами Южно-Охотской, Симуширской и Атласова. Еще один температурный максимум располагается в южной части Таттарского рифта (рис. 2, а, в).

В срезе гравитационной модели (рис. 2, б) контрастный минимум  $\mu_z$ -параметра приурочен к северо-западному борту Южно-Охотского рифта. Несовпадение осей температурного максимума с  $\mu_z$ -минимумом примерно на 100 км может быть результатом наклонного положения структуры ра-



**Рис. 2.** Тектоническая схема (а), плотностной «реологической» (б) и температурный (в) срезы земной коры Охотоморского региона на глубине 20 км; распределения  $\mu_z$ -параметра (г) и температуры (д) в разрезах. 1 – кайнозойские впадины Охотского моря; 2 – подводные возвышенности; 3 – окраинно-материковые вулканические пояса; 4, 5 – изолинии  $\mu_z$ -параметра,  $10^2 \text{ кг/м}^2/\text{км}$ , и температуры,  $^{\circ}\text{C}$ ; 6 – зоны реологического разуплотнения в гравитационной модели; 7 – контур головы Охотоморского плюма в горизонтальном срезе; 8 – оси рифтов; 9 – шкала раскраски разрезов  $\mu_z$ -параметра. Обозначения структур: САК – Северо-Азиатский кратон, МСП – Мая-Селемджинский плюм, ТП – Тихоокеанская плита; впадины Охотского моря: СС – Северо-Сахалинская, СО – Северо-Охотская, Т – ТИНРО, Д – Дерюгина, ЮО – Южно-Охотская, С – Симуширская, А – Атласова, Тт – Татарская; подводные возвышенности: ЦО – Центрально-Охотоморская, ИО – Института Океанологии, АН – Академии Наук; вулканические пояса: ЦКВП – Центрально-Камчатский, ВКВП – Восточно-Камчатский, ВСАВП – Восточно-Сихотэ-Алинский; складчато-надвиговые системы: СА – Сихотэ-Алинская, МО – Монголо-Охотская, ВК – Верхояно-Колымская; островные дуги: Ку – Курильская, Сх – Сахалинская

**Fig. 2.** Tectonic map (a), density «rheological» (b) and temperature (c) shears of the Earth's crust of the Okhotsk sea region at a depth of 20 km with the sections of  $\mu_z$ -parameter (d) and temperature (e). 1 are the Cainozoic cavities of the Okhotsk sea; 2 are the submarine rises; 3 are the marginal-continental volcanic belts; 4–5 are the isolines of  $\mu_z$ -parameter,  $10^2 \text{ kg/m}^2/\text{km}$  (4) and temperatures,  $^{\circ}\text{C}$  (5); 6 are the zones of rheological decompression in gravity model; 7 is the contour of the head of the Okhotsk sea plume in horizontal shear; 8 are the axes of the rifts; 9 is the coloring scale of sections of the  $\mu_z$ -parameters. Structures: САК – North-Asian craton, МСП – Maya-Selemdzha plume, ТП – Pacific plate; the Okhotsk sea cavities: СС – North-Sakhalin, СО – North-Okhotsk, Т – TINRO, Д – Deryugina, ЮО – South-Okhotsk, С – Simushirskaya, А – Atlasova, Тт – Tatarskaya; submarine rises: ЦО – Tsentralno-Okhotomorskaya, ИО – Instituta okeanologii, АН – Akademii nauk; volcanic belts: ЦКВП – Tsentralno-Kamchatsky, ВКВП – Vostochno-Kamchatsky, ВСАВП – Vostochno-Sikhote-Alinsky; fold-thrust systems: СА – Sikhote-Alinsky, МО – Mongolo-Okhotskaya, ВК – Verkhoyano-Kolymskaya; island arcs: Ку – Kurilskaya, Сх – Sakhalinskaya

стяжения. Аналогичная ситуация имеет место в земной коре Байкальского рифта, где локальный максимум теплового потока смещен на 150 км от зоны подкорового реологического разуплотнения, перекрытой верхнекоревой пластиной в теле Амурской плиты [22]. В этом районе горизонтальный перенос тепла доказан термодинамическими расчетами [23], а региональная аномалия теплового потока тоже смещена к юго-востоку от оси Байкальского рифта [24].

Охотско-Чукотский вулканический пояс, также имеющий рифтогенное происхождение [13], со-

проводается цепочкой локальных минимумов  $\mu_z$ -параметра в срезе на глубине 20 км (рис. 2, б), а в более глубоких срезах ( $H_c=35-40 \text{ км}$ ) эти минимумы сливаются в широкой полосе [13]. Отсутствие плотной сети измерений теплового потока в северной части Охотоморского региона не позволяет адекватно сопоставить гравитационную модель с геотермической, однако понижение среднекоревой температуры в северной части Охотского моря (рис. 2, в) коррелируется здесь с поясом локальных максимумов  $\mu_z$ -параметра (рис. 2, б) и утолщением земной коры на 4–5 км (рис. 1).

Сравнение распределений температур в срезе на глубине 20 км (рис. 2, в) со схемой мощности земной коры (рис. 1) приводит к выводу, что повышенные и высокие температуры в этом срезе тепловой 3D-модели характерны для структур с уменьшенной мощностью земной коры: Татарского и Южно-Охотского рифтов. Области и участки пониженной до 400 °С температуры располагаются под континентальными окраинами, островом Сахалин и Центральной Камчаткой, где мощность земной коры увеличена до 37–42 км против 25–30 км в Охотском море.

Таким образом, на обеих сравниваемых схемах (рис. 2, б, в) ясно различаются признаки линейных рифтогенных и концентрически зональных (надплюмовых) распределений геофизических параметров, что указывает на существование двух классов тектонических структур и соответствующих геодинамических процессов в Охотоморском регионе. Наложения рифтов на плюмы и наоборот – плюмов на рифты – не столь уж редки в геологической природе [25–28]. В частности, в южных районах Дальнего Востока России автором этой статьи были обнаружены признаки наложения Южно-Якутского рифта на Алдано-Зейский плюм [20] и Хингано-Охотского рифтогенного вулканического пояса – на Мая-Селемджинский плюм [21]. Обнаружены признаки горизонтальной миграции структур растяжения Танлу и Охотско-Чукотской [29].

Судя по распределениям  $\mu_z$ -параметра и температуры, в Охотоморском регионе рифтогенные процессы развивались независимо от плюмовых, преимущественно на конвергентных границах литосферных плит: Евразийской (Охотско-Чукотский и Татарский рифты) и Тихоокеанской (Южно-Охотский рифт).

В разрезах 3D-моделей (рис. 2, г, д) участки и зоны реологических разуплотнений группируются в кровле температурных аномалий в интервале температур 500–1000 °С. Наиболее резкие поднятия изотерм регистрируются под впадиной Дерюгина и Южно-Охотским рифтом, где изотерма 1200 °С, соответствующая положению кровли астеносферы, достигает глубины 35–40 км (рис. 2, д), а мощность земной коры сокращена до 12–15 км (рис. 1).

В разрезе 5–5, примерно совпадающим с геотраверсом «Сахалин – о. Итуруп – Тихий океан», контрастная реологическая граница в подкоровом слое верхней мантии под Южно-Охотской котловиной (рис. 2, г) соответствует резкой плотностной границе (+0,30 г/см<sup>3</sup>) на глубине 30 км [16]. Таким образом, осадочный слой в этой впадине в реологической модели (рис. 2, г) сливается с подкоровым вязким слоем, температура в котором достигает 1000 °С. Скоростная структура переходного слоя под впадиной весьма неоднородна и варьирует от 6,8 до 8,2 км/с<sup>2</sup> [16].

Минимум  $\mu_z$ -параметра в северо-западной части разреза 5–5 обусловлен влиянием Мая-Селем-

джинского плюма [21]. Такой же минимум наблюдается под Охотско-Чукотским вулканическим поясом (разрез 4–4).

Охарактеризованные распределения  $\mu_z$ -параметра и температуры в среднем слое земной коры (рис. 2) в основном сохраняются в переходном слое «кора-мантия» – в срезе моделей на глубине 30 км (рис. 3). В гравитационной модели (рис. 3, а), характеризующей реологическую неоднородность слоя в интервале глубин 30–50 км, признаки рифтогенных структур не проявлены, однако концентрическая зональность  $\mu_z$ -аномалий в этом срезе наоборот выражена более четко по сравнению со среднекоровым срезом (рис. 2, б).

В геотермическом срезе на глубине 30 км (рис. 3, б) стволовая зона Охотоморского плюма выражена хуже, однако и здесь локальные максимумы температур 1000–1100 °С обрамляют минимум (800–900 °С) в центре.

В температурных разрезах до глубины 100 км (рис. 2, в) Охотоморский плюм выражен резким поднятием изотерм, осложненным прогибом в центре. Зоны пониженной вязкости, маркируемые минимумами  $\mu_z$ -параметра, располагаются на двух дискретных уровнях: в подкоровом слое верхней мантии (интервал глубин 20–40 км) и астеносфере (интервал глубин 60–80 км). Такая дискретность наблюдается во всех районах Северо-Восточной Азии [12], только под кратонами и террейнами кратонного типа эти интервалы увеличиваются, соответственно, до 40–60 и 90–130 км. Гравитационная расслоенность тектоносферы Охотского моря соответствует геоэлектрической расслоенности [11], согласно которой мощность корово-мантийного проводящего слоя минимальна под островом Сахалин (10–15 км) и максимальна – под Южно-Охотской котловиной и Сихотэ-Алинем (30–40 км). Это хорошо видно в разрезе 5–5 на рис. 2, г. Мощность геоэлектрической астеносферы в южных районах Охотского моря составляет 30–40 км [11], что примерно соответствует мощности «гравитационной» астеносферы в разрезе 4–4 на рис. 4, г.

Редкая сеть магнитотеллурических наблюдений не позволяет пока сопоставить геометрические образы геоэлектрических, гравитационных и тепловых неоднородностей в верхней мантии Охотского моря, однако, исходя из сопоставления температурных и плотностных аномалий (рис. 2, г; 3, в), можно предположить, что тепловой поток, флюиды и магмы из верхней мантии способствовали образованию магматических очагов в астеносфере и подкоровом слое, локализация которых зависела от теплопроводности и реологии конкретных локальных замкнутых объемов тектонических сред. Исходя из такого предположения, можно заключить, что ближайшие к поверхности магматические очаги располагаются под Восточной Камчаткой (разрез 1–1 на рис. 3), Южно-Охотским рифтом (разрезы 4–4 и 5–5 на рис. 2) и впадиной Дерюгина (разрез 4–4), а также под Охотско-Чукотским вулканическим поясом (разрез 4–4). Восточно-Камчатский

температурный минимум в разрезе 1–1 (рис. 3, в) согласуется с плотностной моделью литосферы по геотраверсу «Камчатка – Тихий океан» [30], которая предполагает приближение астеносферы под Восточной Камчаткой до глубины 50–60 км.

Второй ярус магматических очагов располагается в кровле астеносферной части Охотоморского

плюма на глубинах 60–80 км (разрезы 1–1 и 4–4 на рис. 3, в).

Существование сред пониженной вязкости ( $\mu_z < 15$  ед.) в нижней коре и подкоровом слое верхней мантии в сочетании с повышениями температуры в этих слоях (рис. 2, 3) позволяет ориентировочно оценить перспективы нефтегазоносности не-

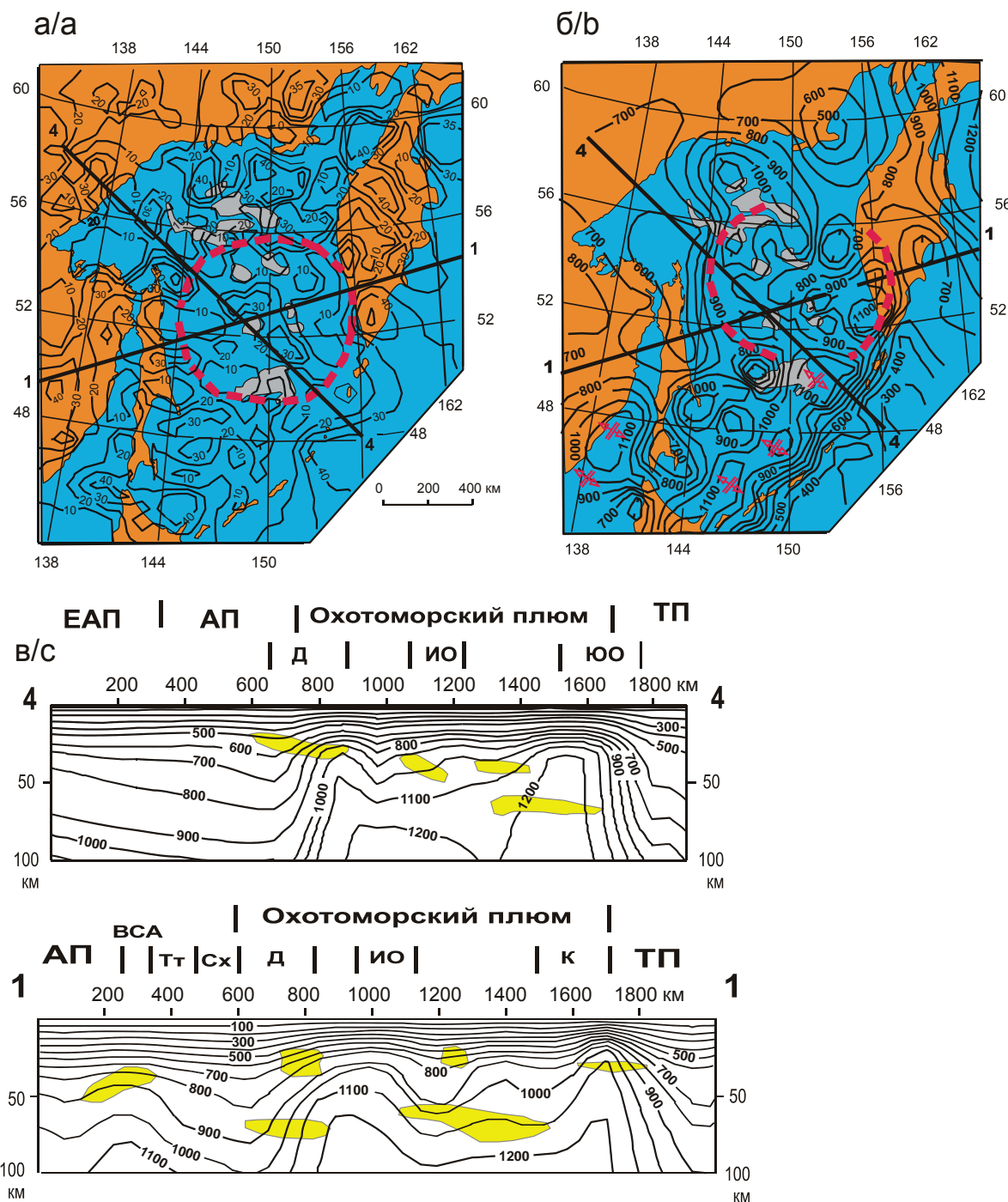
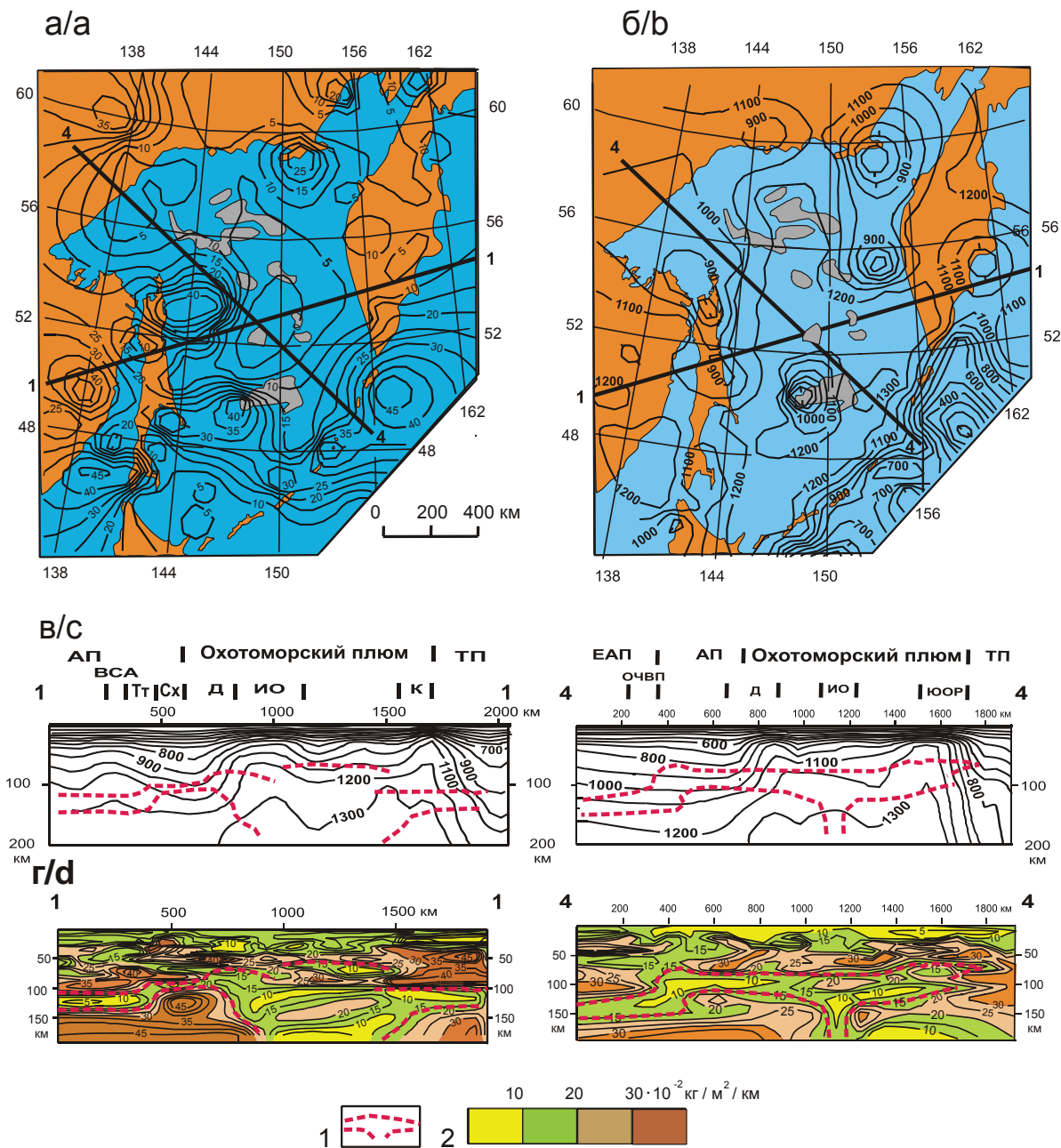


Рис. 3. Гравитационный «реологический» (а) и температурный (б) срезы земной коры Охотоморского региона на глубине 30 км с разрезами температурной модели (в). Плиты: ЕАП – Евразийская, АП – Амурская, ТП – Тихоокеанская. К – Камчатская композитная островная дуга. Другие обозначения показаны на рис. 2.

Fig. 3. Gravity «rheological» (a) and temperature (b) shears of the Earth's crust of the Okhotsk sea region at a depth of 30 km with the sections of temperature model (c). Plates: EAP – Eurasian, AP – Amur, TP – Pacific, K – Kamchatka. Other symbols are in Fig. 2



**Рис. 4.** Гравитационный «реологический» (а) и температурный (б) срезы земной коры Охотоморского региона на глубине 100 км с разрезами температурной (в) и гравитационной (г) моделей: 1 – контуры астеносферной части Охотоморского плюма в разрезах

**Fig. 4.** Gravity «rheological» (a) and temperature (b) shears of the Earth's crust of the Okhotsk sea region at a depth of 100 km with the sections of temperature (c) and gravity (d) models: contours of asthenosphere part of the Okhotsk sea plume in sections

которых районов Охотоморского региона. По полученным данным, повышенными перспективами нефтегазоносности характеризуются южный фланг Западно-Камчатского шельфа, средняя часть о. Сахалин (от п. Тымовск до п. Макаров), залив Терпения, Северо-Охотский прогиб, впадина ТИНРО и подводные возвышенности Центрально-Охотоморская и Академии Наук. Более детальный анализ реологических гравитационных моделей Прикамчатского района [13] приводит к выводу,

что Западно-Камчатский шельф является первоочередным объектом поисков углеводородных залежей.

В подлитосферном срезе  $\mu_z(x, y, H_c)$ -модели (рис. 4, а) контуры плюма смазываются, но центральная часть этого тектоно-магматического сооружения отмечается минимумом  $\mu_z$ -параметра, свидетельствующего о том, что стволовая зона плюма прослеживается в мантии ниже подошвы астеносферы. Центральный  $\mu_z$ -минимум имеет три

ответвления: на север, восток и юг. В температурном срезе на той же глубине (рис. 4, б) контуры головы плюма тоже не читаются, но широкий максимум температуры на глубине 100 км характеризуется тремя ответвлениями в тех же направлениях. В их числе диагностируются два линейных температурных максимума (более 1200 °С), первый из которых совпадает с Южно-Охотским рифтом, а второй (назовем его Дерюгинским) протягивается в субмеридиональном направлении. В средней части он проходит по восточному прогибу впадины Дерюгина, а на юге смыкается с Южно-Охотской впадиной. Морфология изотермы 1200 °С дает приблизительное представление о контурах астеносферных поднятий в Южно-Охотской и Дерюгинской рифтовых зонах, под Ключевской группой вулканов Восточной Камчатки и Карагинским заливом. Расширение контуров астеносферной линзы в срезе на глубине 100 км (рис. 4, б) относительно контуров ствальной части Охотоморского плюма в срезах 20 и 30 км (рис. 2, в; 3, б) свидетельствует о горизонтальном растекании астеносферных магм под подошвой литосферы, что является типичной особенностью плюмов [20, 21, 30–33].

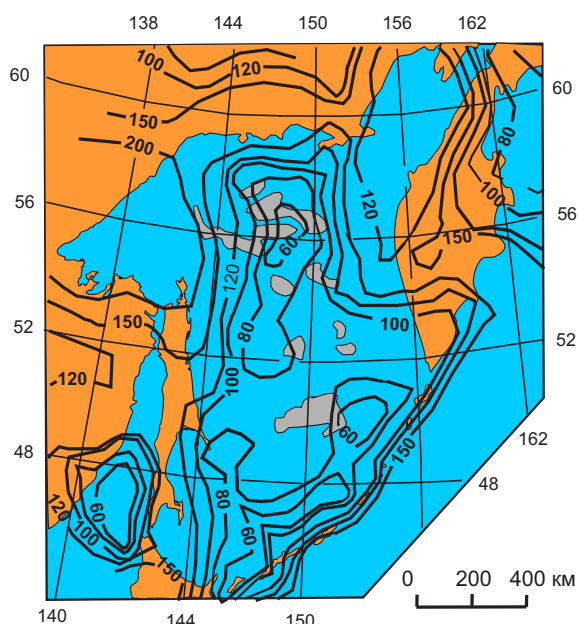


Рис. 5. Схема мощности литосферы Охотоморского региона по изотерме 1200 °С, км

Fig. 5. Map of lithosphere capacity of the Okhotsk sea region by the isotherm 1200 °C, km

Температурные разрезы (рис. 4, в) и схема рельефа кровли астеносферы, построенная по изотерме 1200 °С (рис. 5) предполагают прогибание головы плюма над его центральным стволом и выжимание горячих мантийных магм в стороны от него. При этом максимальное приближение магм к поверхности Земли (до глубины 60–80 км) предполагается в Дерюгинской и Южно-Охотской рифтовой зонах. Кажущееся утолщение литосферы на западной границе Тихоокеанской плиты объясняется ее наклоном (субдукцией) [30].

Полученные данные приводят к выводу, что кайнозойская трансформация верхней мантии Охотского моря подчинялась и продолжает подчиняться двум тектоническим процессам: формированию головы мантийного плюма и растяжениям литосферы в зонах глубоких раздвигов. Рассмотренные модели не предоставляют убедительные признаки для однозначного определения относительного возраста плюмовых и рифтогенных процессов, однако можно предположить, что Татарский рифт заложился позже формирования головы Охотоморского плюма, поскольку астеносферный слой резко смещается в зонах Татарского и Охотско-Чукотского рифтов (рис. 4, в). О более позднем возрасте Южно-Охотского рифта свидетельствует распределение температур, дискордантное контурам астеносферного слоя в разрезе 4–4 на рис. 4, в.

Генерализованные разрезы гравитационной и температурной моделей до глубины 200 км (рис. 4, в, г) иллюстрируют связь астеносферного слоя пониженной вязкости с мантийным тепловым потоком. В зоне влияния Охотоморского плюма кровля «реологической гравитационной» астеносферы примерно соответствует изотерме 1200 °С, а подошва – 1300 °С. Утолщение астеносферы диагностируется в ствальной зоне плюма, которая располагается в районе поднятия Института Океанологии. Резкое погружение астеносферного слоя наблюдается на границах Евразийской и Амурской плит (рис. 4, в), что соответствует известным геофизическим данным [1, 5, 11, 34]. Пространственные параметры «гравитационной» астеносферы в континентальной части разрезов 1–1 и 4–4 (рис. 4, г) удовлетворительно согласуются с магнитотеллурическими данными [11, 34] и двумерными теплофизическими построениями [34].

#### Выводы

Сопоставление объемной модели гравитационного параметра  $\mu_z$ , отображающего реологическое состояние тектонических сред, с распределениями температуры в общих узлах 3D-расчетных сетей позволило уточнить элементы глубинного строения нижнего слоя земной коры и верхней мантии Охотоморского региона:

1. Независимыми построениями, двумя методами, определены пространственные параметры головы Охотоморского плюма, ствальная часть которого приурочена к поднятию Института Океанологии. Горизонтальные размеры (800–850 км), грибовидная форма в разрезе и концентрическая зональность температурных и плотностных аномалий в голове плюма типичны для структур подобного типа [20, 21, 31–33].
2. Коревая часть головы плюма инверсирована (прогнута) над мантийным стволом, что выражается в распределениях температур и гравитационного  $\mu_z$ -параметра, связанных с реологическим состоянием тектонических сред.



3. В кровле термической астеносферы с температурой 1200 °С по формальным признакам в гравитационной модели выявлены области вязких сред, предположительно соответствующие магматическим очагам под впадиной Дерюгина, Южно-Охотским и Татарским рифтами. Второй ярус магматических очагов под этими же структурами, а также под вулканическими поясами (Охотско-Чукотским, Восточно-Камчатским и Восточно-Сихотэ-Алинским) выявлен в нижнем слое земной коры на глубинах 20–30 км и подкоровом слое верхней мантии.
4. Нижняя литосфера Охотоморского региона расчленена двумя региональными зонами растяжения – глубокими раздвигами – Дерюгинским и Южно-Охотским, наложенными на

плюм или предшествующими ему. Астеносфера в зонах растяжения приближается до глубины 30–60 км.

5. Сочетание минимумов  $\mu_z$ -параметра с максимумами температуры в нижнем слое земной коры и подкоровом слое верхней мантии может быть использовано при оценках перспектив нефтегазоносности Западно-Камчатского шельфа, о. Сахалин, Северо-Охотского прогиба, впадины ТИНРО и подводных возвышенностей Центрально-Охотоморской и Академии Наук.

*Автор благодарен П.Ю. Горнову за предоставленные материалы по тепловому потоку и расчеты температур в точках измерения теплового потока.*

*Статья подготовлена при поддержке гранта ДВО РАН 15-I-2-004 по программе фундаментальных исследований ДВО РАН «ДАЛЬНИЙ ВОСТОК» на 2015–2017 гг.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тектоносфера Тихоокеанской окраины Азии / под ред. В.В. Гордиенко. – Владивосток: ДВО РАН, 1992. – 238 с.
2. Красный Л.И. Восходящие глубинные и близповерхностные структуры и связь с ними минерализации // Отечественная геология. – 2000. – № 6. – С. 23–28.
3. Богданов Н.А., Чехович В.Д. О коллизии Западно-Камчатской и Охотоморской плит // Геотектоника. – 2002. – № 1. – С. 72–85.
4. Злобин Т.К. Охотская литосферная плита и модель эволюции системы «окраинное море – островная дуга – глубоководный желоб» // Вестник ДВО РАН. – 2006. – № 1. – С. 26–32.
5. Структура и динамика литосферы и астеносферы Охотоморского региона. Результаты исследований по международным геофизическим проектам / под ред. А.Г. Родникова. – М.: РАН. Национальный геофизический комитет, 1996. – 337 с.
6. О возрасте магматических пород Охотского моря / О.С. Корнев, Ю.А. Неверов, В.И. Нарыжный, А.Д. Маляренко // Возраст геологических образований Охотоморского региона. – Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1989. – С. 9–15.
7. Геология и особенности вулканизма дна Охотского моря / Т.А. Емельянова, Е.П. Леликов, В.Т. Съедин, В.И. Нарыжный // Тихоокеанская геология. – 2003. – Т. 22. – № 4. – С. 3–18.
8. Злобин Т.К. Строение земной коры Охотского моря и нефтегазоносность ее в северо-восточной (Прикамчатской) части (по сейсмическим данным). – Южно-Сахалинск: Дальнаука, 2002. – 97 с.
9. Петрищевский А.М., Злобин Т.К. Плотностная неоднородность тектоносферы Охотоморского региона // Ученые записки Сахалинского государственного университета: Сборник научных статей. Вып. 4. – Южно-Сахалинск: Изд-во СахГУ. – 2004. – С. 10–20.
10. Емельянова Т.А., Леликов Е.П. Магматизм и его роль в формировании структур окраинных морей Тихого океана // Литосфера. – 2010. – № 3. – С. 21–35.
11. Туезов И.К. Геоэлектрический разрез литосферы и астеносферы Северо-Восточной Азии и прилегающих частей Тихого океана. – Владивосток: Дальнаука, 1994. – 303 с.
12. Петрищевский А.М. Гравитационные модели двухъярусной коллизии литосферных плит на Северо-Востоке Азии // Геотектоника. – 2013. – № 6. – С. 60–83.
13. Петрищевский А.М. Гравитационный метод оценки реологических свойств земной коры и верхней мантии (в конвергентных и плюмовых структурах Северо-Восточной Азии). – М.: Наука, 2013. – 192 с.
14. Туезов И.К. Геотермическая астеносфера Азиатско-Тихоокеанской зоны сочленения и прилегающих частей Азии и Тихого океана. – Владивосток: ДВО РАН, 1990. – 109 с.
15. Туезов И.К., Епанешников В.Д., Хаякава М. Геотермия. Региональные проблемы. Моделирование. Практические приложения. – М.: Недра, 1995. – 303 с.
16. Красный М.Л., Косыгин В.Ю., Исаев В.И. Оптимальная плотностная модель тектоносферы вдоль геотраверса о. Сахалин – о. Итуруп – Тихий океан // Тихоокеанская геология. – 1985. – № 6. – С. 36–48.
17. Петрищевский А.М. Вязкий слой на границе кора–мантия (Дальний Восток) // Геотектоника. – 2008. – № 5. – С. 37–48.
18. Викулин А.В. Введение в физику Земли. – Петропавловск-Камчатский: ИВИС ДВО РАН, 2004. – 239 с.
19. Глаголев В.Н., Петрищевский А.М. Простой алгоритм построения разрезов с использованием 3D-массивов геолого-геофизической информации (Юго-Восток России) // Тихоокеанская геология. – 2010. – Т. 4. – № 3. – С. 78–85.
20. Петрищевский А.М., Юшманов Ю.П. Геофизические, магматические и металлогенические признаки проявления мантийного плюма в верховьях рек Алдан и Зея // Геология и геофизика. – 2014. – Т. 55. – № 4. – С. 568–593.
21. Петрищевский А.М., Юшманов Ю.П. Реология и металлогения Мая-Селемджинского плюма // Докл. РАН. – 2011. – Т. 440. – № 2. – С. 207–212.
22. Петрищевский А.М. Реологическая гравитационная модель тектоносферы Забайкалья // Доклады РАН. – 2009. – Т. 426. – № 2. – С. 248–255.
23. Голубев В.А. Кондуктивный и конвективный вынос тепла в Байкальской рифтовой зоне. – Новосибирск: Изд-во ГЕО, 2007. – 222 с.
24. Petit C., Burov E., Tiberi C. Strength of the lithosphere and strain localization of the Baikal rift // Earth and Planetary Science Letters. – 2008. – V. 269. – P. 523–529.
25. Leitch A.M., Davies G.F., Wells M. A plume head melting under a rifting margin // Earth and Planetary Science Letters. – 1998. – V. 161. – № 1. – P. 161–177.
26. Styles of continental rifting: crust-mantle detachment and mantle plumes / H. Zeyen, F. Volker, V. Wehre, K. Fushs, V.S. Sobolev, R. Altherr // Tectonophysics. – 1997. – V. 278. – № 3. – P. 329–352.
27. Пермотриасовое оруденение Азии и его связь с проявлением плюмового магматизма / А.С. Борисенко, В.И. Сотников, Ф.Э. Изох, Г.В. Поляков, А.А. Оболенский // Геология и геофизика. – 2006. – Т. 47. – № 1. – С. 166–182.

28. Regional uplift associated with continental large igneous provinces: the role of mantle plumes and the lithosphere / A.D. Saunders, S.M. Jones, L.A. Morgan, K.L. Pierce, M. Widdowson, Y.G. Xu // *Chemical Geology*. – 2007. – V. 241. – P. 282–318.
29. Петрищевский А.М. Отражения рифтогенных структур в гравитационных моделях Северо-Востока Азии // *Тектоника, магматизм и геодинамика Востока Азии*. – Хабаровск: ИТИГ ДВО РАН, 2011. – С. 298–301.
30. Красный М.Л., Косыгин В.Ю., Исаев В.И. Оптимальная плотностная модель земной коры и верхней мантии вдоль геотранверса Камчатка – Тихий океан // *Тихоокеанская геология*. – 1985. – № 1. – С. 72–84.
31. Добрецов Н.Л., Кирдяшкин А.А., Кирдяшкин А.Г. Диаметр и время формирования головы плюма на подошве «тугоплавкого» слоя в литосфере // *Докл. РАН*. – 2006. – Т. 406. – № 1. – С. 99–103.
32. Параметры горячих точек и термохимических плюмов в процессе подъема и излияния / Н.Л. Добрецов, А.А. Кирдяшкин, И.Н. Кирдяшкин, Н.В. Сурков // *Петрология*. – 2006. – № 14. – С. 508–523.
33. Plume head-lithosphere interaction near intra-continental plate boundaries / E. Burov, L. Guillou-Frottier, E. D'Acromont, L. Le Pourhiet, S. Cloeting // *Tectonophysics*. – 2007. – V. 434. – P. 15–38.
34. Глубинное строение и металлогения Восточной Азии / под ред. А.Н. Диденко, В.Б. Каплун, Ю.Ф. Малышева. – Владивосток: Дальнаука, 2010. – 332 с.

*Поступила 29.12.2015 г.*

UDC 550.83+550.36:551.2(571.6)

## RHEOLOGICAL AND GEOTHERMAL FEATURES OF THE OKHOTSK SEA PLUME

Alexander M. Petrishchevsky,

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia; Institute of Complex analysis of regional problems, 4, Sholom Aleikhema street, Birobidzhan, 679016, Russia. E-mail: petris2010@mail.ru

The relevance of the research is caused by the need to reveal the tectonic nature of the Sea of Okhotsk and the deep structure of a tectonosphere in the transitional zone «continent–ocean» because the oil-gas forecasting in this region is connected with these issues.

**The aim** of the work is to research the space distributions of formalized and mutually independent gravity and geothermic parameters to receive an evidence of the plume structure in the Okhotsk Sea tectonosphere.

**The method used in the study:** the construction of 3D gravity and geothermic models of the tectonosphere.

**Results.** The author has described the features of linear rift-nature and concentrically zonal (above plume) distributions of geophysical parameters with the help of the gravity and thermometric models. This indicates the existence of two types of deep tectonic structures and corresponding two geodynamic processes in the Sea of Okhotsk Area. In the result of analysis of space distributions of temperature and gravity parameter, which reflects rheological properties of geological media, the author determined the setting and the space sizes of the Okhotsk Sea plume head. The central part of the plume is arranged to the Academy Science underwater rise. A roof of the plume with the diameter of 800–850 km is downthrown above a mantle trunk. In the roof of thermal asthenosphere with the temperature of 1200 °C the viscos medium areas were revealed. Probably they correspond to magmatic chambers beneath the Deryugina Basin, South Okhotsk and Tatar rifts. The second level of magmatic chambers under the same structures as well as under volcanic belts (the Okhotsk-Chukotka, East-Kamchatka and East-Sikhote-Alin) was determined into the lower crust layer at a depth of 20–30 km and in subcrustal layer. In the stretch-structures the asthenosphere raises toward the Earth's surface up to a depth of 30–60 km. The received models prove a spreading of the asthenosphere beneath the lithosphere bottom. The lower lithosphere of the Okhotsk Sea area is broken off by two regional stretch-zones: Deryugina and South-Okhotsk, which are superimposed on the plume or which preceded it.

**Key words:**

Gravity models, rheology, heat flow, temperature, crust, upper mantle, asthenosphere, Area of the Sea of Okhotsk.

The author expresses gratitude to P.Yu. Gornov for the materials on heat flow and temperature calculations in the points of measuring heat flow.

The paper was supported by the grant FEB RAS 15-I-2–004 in the program of fundamental researches of FEB RAS «DALNY VOSTOK» for 2015–2017.

## REFERENCES

1. *Tektonosfera Tikhookeanskoj okrainy Azii* [Tectonosphere of the Pacific Margin of Asia]. Ed. by V.V. Gordienko. Vladivostok, Far East Branch of the RAS, 1992. 238 p.
2. Krasny L.I. Voskhodyashchie glubinye i blizpoverkhnostnye struktury i svyaz s nimi mineragenii [Deep upwelling and shallow structures and their connection with minerageny]. *Otechestvennaya geologiya*, 2000, no. 6, pp. 23–28.
3. Bogdanov N.A., Chekhovich V.D. O kollizii Zapadno-Kamchatkoy i Okhotomorskoy plit [On collision of the West Kamchatka with the Sea of Okhotsk plates]. *Geotektonika*, 2002, no. 1, pp. 72–85.
4. Zlobin T.K. Okhotskaya litosfernaya plita i model evolyutsii sistemy «okrainnoe more – ostrovnaya duga – glubokovodny zhelob» [The Sea of Okhotsk plate and the evolution model of the «margin sea – island arc – deep-water trough» system]. *Vestnik of the Far East Branch of the RAS*, 2006, no. 1, pp. 26–32.
5. *Struktura i dinamika litosfery i astenosfery Okhotomorskogo regiona. Rezultaty issledovaniy po mezhdunarodnym geofizicheskim proektam* [Structure and dynamics of lithosphere and asthenosphere of the Sea of Okhotsk area. Results of researches by international geophysical projects]. Ed. by A.G. Rodnikov. Moscow, National Geophysical Committee Press, 1996, 337 p.
6. Kornev O.S., Neverov Yu.A., Naryzhny V.I., Malyarenko A.D. O vozraste magmaticheskikh porod Okhotskogo morya [On the age of magmatic rocks of the Sea of Okhotsk]. *Vozrast geologicheskikh obrazovaniy Okhotskogo moray* [The age of geological formations of the Sea of Okhotsk]. Vladivostok, Far Eastern Science Center, 1989. pp. 9–15.
7. Emelyanova T.A., Lelikov E.P., S'edin V.T., Narzhzhny V.I. Geologiya i osobennosti vulkanizma dna Okhotskogo moray [Age and features of volcanism of the Okhotsk Sea bottom]. *Tikhookeanskaya geologiya*, 2003, vol. 22, no. 4, pp. 3–18.
8. Zlobin T.K. Stroenie zemnoy kory Okhotskogo morya i neftegazonosnost ee v severo-vostochnoy (Prikamchanskoy) chasti (po seismicheskim dannym) [The crust structure of the Okhotsk Sea and its oil and gas content in the North-East (near Kamchatka) part (by seismic data)]. Yuzhno-Sakhalinsk, Dalnauka Publ., 2002. 97 p.
9. Petrishchevsky A.V., Zlobin T.K. Plotnostnaya neodnorodnost tektonosfery Okhotomorskogo regiona [Density heterogeneities of the tectonosphere of the Okhotsk Sea Area]. *Uchenye zapiski Sakhalinskogo gosudarstvennogo universiteta: sbornik nauchnykh statey* [Science letters of the Sakhalin State university: collection of science papers]. Yuzhno-Sakhalinsk, SakhGU Press, 2004. Iss. 4, pp. 10–20.
10. Emelyanova N.F., Lelikov E.P. Magmatizm i ego rol v formirovani structure okrainnykh morey Tikhogo okeana [Magmatism and its role in forming the structure of the Pacific marginal seas]. *Litosfera*, 2010, no. 3, pp. 21–35.
11. Tuezov I.K. *Geoelektricheskiy razrez litosfery i astenosfery Severo-Vostochnoy Azii i prilgayushchikh chastey Tikhogo okeana* [Geo-electric section of the lithosphere and asthenosphere of the North-East Asia and adjacent parts of the Pacific Ocean]. Vladivostok, Dalnauka Publ., 1994. 303 p.
12. Petrishchevsky A.M. Gravitatsionnye modeli dvukhyarusnoy kollizii litosfernykh plit na Severo-Vostoke Azii [Gravity models of two level collisions of lithospheric plates in Northeastern Asia]. *Geotektonika*, 2013, no. 6, pp. 60–83.

13. Petrishchevskiy A.M. *Gravitatsionnyy metod otsenki reologicheskikh svoystv zemnoy kory i verkhney mantii (v konvergentsnykh i plyumovykh strukturakh Severo-Vostochnoy Azii)* [Gravity method for evaluating rheological properties of the crust and uppermost mantle (in the convergent and plume structures of the North-East Asia)]. Moscow, Nauka Publ., 2013. 192 p.
14. Tuezov I.K. *Geotermicheskaya astenosfera Aziatsko-Tikhookeanskoy zony sochleneniya i prilagayushchikh chastey Azii i Tikhogo okeana* [Geothermic asthenosphere of the Asia-Pacific transition zone and adjacent parts of the Asia and Pacific Ocean]. Vladivostok, Far East Branch of the RAS, 1990. 109 p.
15. Tuezov I.K., Epaneshnikov V.D., Khayakava M. *Geotermya. Regionalnye problemy. Modelirovanie. Prakticheskie prilozheniya* [Geothermics. Regional problems. Modelling. Practical supplements]. Moscow, Nedra Publ., 1995. 303 p.
16. Krasniy M.L., Kosygin V.Yu., Isaev V.I. Optimalnaya plotnostnaya model tektonosfery vdol geotraversa o. Sakhalin – o. Iturup – Tikhyy okean [Optimum density model of the tectonosphere along geotraverse o. Sakhalin – o. Irturup – Pacific]. *Russian Journal of Pacific geology*, 1985, no. 6, pp. 36–48.
17. Petrishchevsky A.M. Vyazkiy sloy na granitse kora–mantiya (Dalniy Vostok) [A viscous layer at the crust–mantle boundary in the Far East of Russia]. *Geotektonika*, 2008, no. 5, pp. 37–48.
18. Vikulin A.V. *Vvedenie v fiziku Zemli* [Introduction to Physics of the Earth]. Petropavlovsk-Kamchatskii, Institut vulkanologii i seismologii FEB RAS Press, 2004. 234 p.
19. Glagolev V.N., Petrishchevsky A.M. Prostoy algoritm postroeniya razrezov s ispolzovaniem 3D-massivov geologo-geofizicheskoy informatsii (Yugo-Vostok Rossii) [A simple algorithm for generating cross sections using 3D geological and geophysical data sets (Southeastern Russia)]. *Russian Journal of Pacific geology*, 2010, vol. 4, no. 3, pp. 78–85.
20. Petrishchevskiy A.M., Yushmanov Yu.P. Geofizicheskie, magmaticheskie i metallogenicheskie priznaki proyavleniya mantiynogo plyuma v verkhovyakh rek Aldan i Zeya [Geophysical, magmatic and metallogenic manifestations of a mantle plume in the upper reaches of the Aldan and Amur Rivers.]. *Russian Geology and Geophysics*, 2014, vol. 55, no. 4, pp. 568–593.
21. Petrishchevskiy A.M., Yushmanov Yu.P. Reologiya i metallogeniya Maya-Selemdzhinskogo plyuma [Rheology and Metallogeny of the Maya-Selemdzha Plume]. *Doklady Akademii Nauk*, 2011, vol. 440, no. 2, pp. 207–212.
22. Petrishchevskiy A.M. Reologicheskaya gravitatsionnaya model zemnoy kori i verkhney mantii Zabaikalya [Rheological Gravity Model of the Crust and Upper Mantle of Transbaikalia]. *Doklady Akademii Nauk*, 2009, vol. 426, no. 2, pp. 248–255.
23. Golubev V.A. *Konduktivnyy i konvektivnyy vynos tepla v Baikalskoy riftovoy zone* [Conductive and convective carrying out of heat in the Baikal rift zone]. Novosibirsk, GEO Publ., 2007. 222 p.
24. Petit C., Burov E., Tiberi C. Strength of the lithosphere and strain localization of the Baikal rift. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, vol. 269, pp. 523–529.
25. Leitch A.M., Davies G.F., Wells M. A plume head melting under a rifting margin. *Earth and Planetary Science Letters*, 1998, vol. 161, no. 1, pp. 161–177.
26. Zeyen H., Volker F., Wehre V., Fushs K., Sobolev V.S., Altherr R. Styles of continental rifting: crust-mantle detachment and mantle plumes. *Tectonophysics*, 1997, vol. 278, no. 3, pp. 329–352.
27. Borisenko A.S., Sotnikov V.I., Izokh F.E., Polyakov G.V., Obolenskii A.A. Permotriasovoe orudnenie Azii i ego svyaz s proyavleniyami plyumovogo magmatizma [Permian-triassic ore bearing in Asia and its relation to occurrence of plume magmatism]. *Russian Geology and Geophysics*, 2006, vol. 47, no. 1, pp. 166–182.
28. Saunders A.D., Jones S.M., Morgan L.A., Pierce K.L., Widowson M., Xu Y.G. Regional uplift associated with continental large igneous provinces: the role of mantle plumes and the lithosphere. *Chemical Geology*, 2007, vol. 241, pp. 282–318.
29. Petrishchevskiy A.M. Otrazheniya riftogennykh struktur v gravitatsionnykh modelyakh Severo-Vostoka Azii [Reflections of the rift structures in gravity models of the North East Asia]. *Tektonika, magmatizm i geodinamika Vostoka Azii* [Tectonics, magmatism and geodynamics of the Eastern Asia]. Khabarovsk, Institute of Tect. and Geophys. Press, 2011. pp. 298–301.
30. Krasniy M.L., Kosygin V.Yu., Isaev V.I. Optimalnaya plotnostnaya model zemnoy kory i verkhney mantii vdol geotraversa Kamchatka – Tikhyy okean [Optimum density model of the crust and upper mantle along geotraverse Kamchatka – Pacific]. *Russian Journal of Pacific geology*, 1985, no. 1, pp. 72–84.
31. Dobretsov N.L., Kirdyashkin A.A., Kirdyashkin A.G. Diametr i vremya formirovaniya golovy plyuma na podoshve tugoplavkogo sloya v litosfere [Diameter and time of formation of plume head at the bottom of the bed-melted layer in lithosphere]. *Doklady Akademii Nauk*, 2006, vol. 406, no. 1, pp. 99–103.
32. Dobretsov N.L., Kirdyashkin A.A., Kirdyashkin A.G., Surkov N.V. Parametry goryachikh tochek i termokhimicheskikh plyumov v protsesse podema i izliyaniya [Parameters of heat points and thermal-chemical plumes during upwelling and eruption]. *Petrologiya*, 2006, no. 14, pp. 508–523.
33. Burov E., Guillou-Frottier L., D’Acremont E., Pourhiet L. Le, Cloeting S. Plume head-lithosphere interaction near intra-continental plate boundaries. *Tectonophysics*, 2007, vol. 434, pp. 15–38.
34. *Glubinnoe stroenie i metallogeniya Vostochnoy Azii* [Deep structure and metallogene of the Eastern Asia]. Eds. A.N. Didenko, V.B. Kaplun, Yu.F. Malyshev. Vladivostok, Dalnauka Publ., 2010. 332 p.

Received: 29 December 2015.

УДК 54–162.2

## ЗАПАСАНИЕ ЭНЕРГИИ НАНОПОРОШКОМ АЛЮМИНИЯ В НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОМ СОСТОЯНИИ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЁТКИ

**Мостовщиков Андрей Владимирович,**

кандидат технических наук, инженер кафедры общей химии и химической технологии Института физики высоких технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: pasembellum@mail.ru

**Ильин Александр Петрович,**

доктор физико-математических наук, профессор кафедры общей химии и химической технологии Института физики высоких технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: genchem@mail.ru

**Маргарита Анатольевна Захарова,**

магистрант кафедры общей физики Физико-технического института Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: tibiboreth@gmail.com

*При переводе металлов в нанодисперсное состояние наблюдается появление новых свойств нанопорошков, в том числе запасаение нанопорошками энергии. Возрастающий интерес к порошкам и нанопорошкам алюминия обусловлен их использованием в качестве высокоэнергетических добавок в ракетные топлива и пиротехнические смеси. Актуальность исследования связана с необходимостью установления механизмов запасаения энергии нанопорошком алюминия. Вместе с тем существенной проблемой является определение величины запасенной энергии в нанопорошке Al. В работе использовали пассивированный малыми добавками воздуха нанопорошок алюминия, полученный методом электрического взрыва алюминиевых проводников в среде аргона с помощью установки УДП-4Г, разработанной в Томском политехническом университете.*

**Цель работы:** экспериментально установить величину энергии, запасаемой в форме напряженно-деформированного состояния кристаллической решётки нанопорошка алюминия и сравнить с общей величиной запасенной энергии.

**Методы исследования:** дифракционные рентгеноструктурные исследования, дифференциальный термический анализ.

**Результаты.** Установлено, что в пассивированном воздухе электровзрывном нанопорошке алюминия кристаллическая решётка находится в напряженном состоянии. Модифицированная функция Лоренца была выбрана в качестве аппроксимирующей, микроскажения кристаллитов, рассчитанные методом аппроксимаций, составляют  $8,66 \cdot 10^{-4}$ . Величина энергии, запасаемой в напряженно-деформированном состоянии кристаллической решётки электровзрывного нанопорошка алюминия –  $0,385$  Дж/г, в то время как определенная с помощью дифференциального термического анализа запасаенная энергия составляет  $348$  Дж/г. Таким образом, вероятным механизмом запасаения значительной энергии нанопорошком алюминия является формирование более энергонасыщенных структур в твердом теле (в том числе, за счёт формирования на поверхности нанопорошка алюминия при пассивировании двойного электрического слоя, обладающего псевдоемкостью).

### **Ключевые слова:**

Нанопорошок алюминия, запасаенная энергия, рентгеноструктурный анализ, двойной электрический слой, микродеформации, напряженно-деформированное состояние.

### **Введение**

Явление запасаения нанопорошками металлов энергии является новым свойством, возникающим при переводе металлов в нанодисперсное состояние. При этом запасаенная энергия связана с энергией поверхности наночастиц, также энергия может запасааться в их структуре. Запасаенная поверхность энергия ограничена устойчивостью наночастиц: если диаметр наночастицы металла меньше  $30$  нм, то такая частица не может стабилизироваться в воздухе из-за значительной величины удельной запасаенной энергии [1]. Известно, что толщина защитной пленки при уменьшении диаметра частиц снижается. Это явление не может быть объяснено диффузией окислителя через слой защитной пленки. В работе [2] было выдвинуто

предположение о существовании двойного электрического слоя, обладающего псевдоемкостью, разрушение которого сопровождается выделением запасаенной энергии. Возрастающий интерес к порошкам и нанопорошкам алюминия (НП Al) [3, 4] обусловлен перспективой их использования в качестве высокоэнергетических добавок в ракетные топлива и пиротехнические смеси. Кроме того, содержание в нем запасаенной энергии позволяет использовать НП Al в качестве спекающей добавки при получении различных материалов вместо микрпорошка алюминия [5–9], а также в 3D-печати. Вместе с тем существенной проблемой является определение величины запасаенной энергии и структурно-энергетического состояния металлической составляющей в наночастице. Основной ме-

трологической проблемой является точность измерения величины запасенной энергии, которая зависит от способа измерения: бомбовая калориметрия, растворная калориметрия, дифференциальный термический анализ [10]. Они дают различные результаты вследствие измерения тепловых эффектов процессов, имеющих различную физико-химическую природу. Бомбовая калориметрия позволяет определить тепловой эффект сгорания порошка в кислороде при высоком давлении – интегральное энерговыделение. Тепловой эффект сгорания алюминия в кислороде составляет 837 кДж/моль [11], а величина запасенной энергии – примерно 90...120 кДж/моль, поэтому на фоне большого теплового эффекта точно определить величину запасенной энергии не представляется возможным. Кроме того, при проведении экспериментов по бомбовой калориметрии необходимо проверять целостность оборудования из-за сгорания частей бомбы при сгорании алюминия и взаимодействия несгоревшего алюминия с материалом бомбы. Дифференциальный термический анализ (в зависимости от газовой атмосферы) дает возможность измерить тепловой эффект окисления, а также скрытую теплоту фазовых переходов (при их наличии) и энергию рекомбинации некоторых типов дефектов. Растворная калориметрия позволяет определить тепловой эффект при растворении кристаллической решётки в данном растворителе – при этом отдельной задачей является подбор растворителя и изотермического режима взаимодействия растворителя с порошком алюминия. Таким образом, каждый из существующих методов позволяет измерить тепловыделение, протекающее сразу по нескольким механизмам. Следовательно, возникает необходимость оценки величины энергии, запасенной в различных формах.

Целью настоящей работы является экспериментальная оценка величины запасенной энергии в напряженно-деформированном состоянии кристаллической решёткой нанопорошка алюминия с использованием метода рентгеноструктурного анализа микродеформаций и напряжений 2-го рода.

#### Методики экспериментов

В работе использовали нанопорошок алюминия, полученный методом электрического взрыва алюминиевого проводника в среде аргона с использованием установки УДП-4Г, разработанной в Томском политехническом университете. Нанопорошок алюминия представлял собой совокупность сферических частиц, распределение которых близко к нормально-логарифмическому, с максимумом 120 нм. Формирование наночастиц в условиях электрического взрыва проводника характеризуется экстремальными параметрами: максимальная температура атомной подсистемы – до  $10^4$  К, скорость охлаждения  $\sim 10^{10}$  °С/с. Пассивированный малыми добавками воздуха после получения нанопорошок алюминия не пирофорен, но при нагревании взаимодействует практически со всеми

известными веществами, а в воздухе сгорает в режиме теплового взрыва [12–16]. В пассивированном нанопорошке алюминия содержание металлического алюминия составляло 88 мас. %, оксидов и гидроксидов  $\sim 6$  мас. %, общее содержание ад- и абсорбированных газов  $\sim 6$  мас. %. При этом содержание металлических примесей (железо, марганец, медь) не превышает 0,3 мас. % [17]. Насыпная плотность исследуемого образца нанопорошка алюминия равна 200 кг/м<sup>3</sup>.

Величину запасенной энергии в нанопорошке алюминия определяли с помощью метода дифференциального термического анализа (ДТА) в Научно-аналитическом центре Томского политехнического университета (термоанализатор STD Q600) по изменению величины экзотермического эффекта окисления при нагревании навески нанопорошка алюминия в воздухе массой около 5 мг и со скоростью 10 °С/мин. Рентгеноструктурные исследования проводили с использованием дифрактометра Shimadzu XRD 7000 (излучение  $\text{Cu}_{K\alpha}$ ). Для определения параметров кристаллической структуры использовали международную картотеку ASTM (Американское общество испытаний материалов), выпуски которой издаются Объединенным комитетом порошковых дифракционных стандартов (JCPDS ICDD, каталог PDF4+). В картотке-определителе указывается химическая формула соединения, пространственная группа, периоды элементарной ячейки, межплоскостные расстояния и индексы Миллера, соответствующие дифракционным рефлексам.

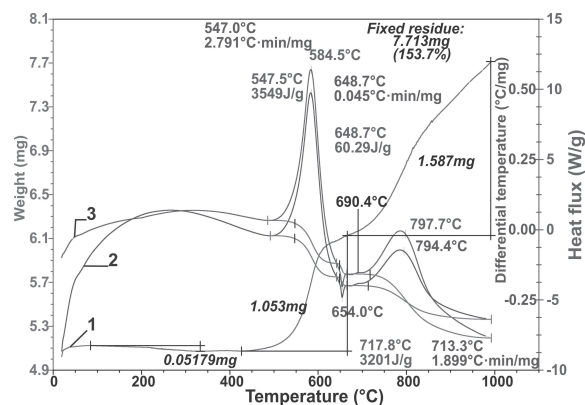
#### Результаты экспериментов

При нагревании нанопорошка алюминия в воздухе происходила десорбция воды и газов с поверхности и из объёма наночастиц с уменьшением массы на 1 %. Низкотемпературное окисление нанопорошка алюминия (до 660 °С) сопровождалось экзотермическим эффектом (3549 Дж/г). Затем происходило расплавление алюминия внутри наночастиц, что сопровождалось эндоэффектом (60,29 Дж/г) [18].

На рис. 1 представлены результаты дифференциального термического анализа нанопорошка алюминия (нагрев в воздухе).

Согласно данным дифференциального термического анализа, тепловой эффект окисления нанопорошка алюминия при нагреве до температуры плавления алюминия составлял 3549 Дж/г, при этом температура начала окисления  $\sim 440$  °С, а степень окисленности при нагревании до 1000 °С – 53,7 мас. %. На второй стадии окисления нанопорошка алюминия (увеличение массы на 31 %) происходило только окисление алюминия: после плавления (654 °С) алюминий переходит в жидкую фазу и все дефекты структуры металла релаксируют. Поэтому дальнейшее окисление алюминия не сопровождается выделением запасенной энергии. Согласно данным термограммы (рис. 1), удельный тепловой эффект окисления на первой стадии (3549 Дж/г) больше соответствующего теплового

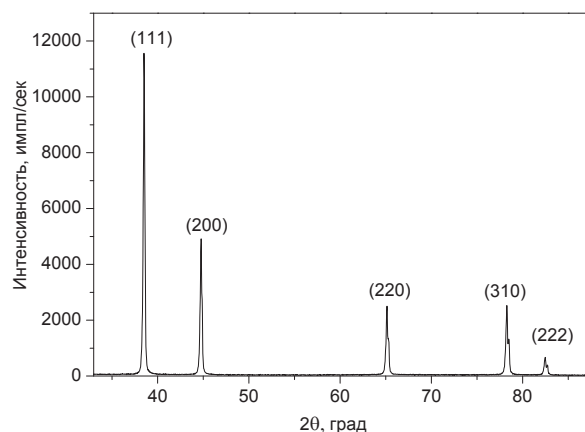
эффекта на второй стадии (3201 Дж/г) на 348 Дж/г. Таким образом, процесс окисления нанопорошка алюминия в твердой фазе (до плавления) сопровождается выделением запасенной энергии, а во время второй стадии окисления жидкого алюминия тепло выделяется только за счет протекания окисления.



**Рис. 1.** Результаты дифференциального термического анализа нанопорошка алюминия: 1 – изменение массы; 2 – тепловой эффект; 3 – тепловой поток

**Fig. 1.** The results of differential thermal analysis of aluminum nanopowder: 1 is the change of weight, 2 is the thermal effect, 3 is the heat flux

На рис. 2 приведена дифрактограмма нанопорошка алюминия, полученная в условиях симметричной съемки (геометрия Брегга–Брентано) [19]. С использованием методов рентгеноструктурного анализа были определены величины микродеформаций и остаточных напряжений в образце нанопорошка алюминия.



**Рис. 2.** Дифрактограмма нанопорошка алюминия

**Fig. 2.** Diffraction pattern of aluminum nanopowder

Для разделения вкладов в физическое уширение рентгеновских рефлексов от малости областей когерентного рассеяния и микродеформаций использовали метод аппроксимаций [20], основанный на том, что физическое уширение дифракционной линии обусловлено малыми размерами ОКР и наличием микродеформаций решетки и

связано с напряжениями второго рода. Для рентгенограммы нанопорошка алюминия наименьшая погрешность аппроксимации достигается для функции  $(1+kx^2)^{-1.5}$ . Для данной функции физическое уширение  $\beta(2\theta)$  линий определяется соотношением

$$\left( \frac{\beta(2\theta)\cos\theta_{hkl}}{\lambda} \right)^{1.5} = \left( \frac{1}{D_{hkl}} \right)^{1.5} + \left( 4\varepsilon \frac{\sin\theta_{hkl}}{\lambda} \right)^{1.5}, \quad (1)$$

где  $\lambda$  – длина волны рентгеновского излучения ( $K_{\alpha 1}$ );  $\theta_{hkl}$  – угол дифракции для плоскости ( $hkl$ );  $D_{hkl}$  – размер области когерентного рассеяния;  $\varepsilon$  – микродеформации.

Таким образом, разделение вкладов в физическое уширение дифракционных линий производилось посредством построения линейных зависимостей  $\left( \frac{\beta(2\theta)\cos\theta}{\lambda} \right)^{1.5} = \varphi(\sin^{1.5}\theta)$  с использованием

пар линий  $(111)_{\text{ГЦК}}$  и  $(222)_{\text{ГЦК}}$ . Величины микродеформаций  $\varepsilon$  были определены как тангенс угла наклона прямой. Микронапряжения второго рода были рассчитаны в соответствии с законом Гука:

$$\sigma = \varepsilon \frac{E}{\nu}, \quad (2)$$

где модуль Юнга для алюминия  $E = 70$  ГПа, коэффициент Пуассона  $\nu = 0,34$ .

Таким образом, в соответствии с формулами (1) и (2) рассчитанное значение относительной микродеформации составило  $\varepsilon = 8,66 \cdot 10^{-4}$ , а соответствующая величина микронапряжений второго рода  $\sigma = 178$  МПа.

Расчет объемной плотности энергии  $W$ , запасенной в напряженно-деформированном состоянии микрочастиц в наночастицах, проводили по формуле

$$W = \frac{\sigma\varepsilon}{2}. \quad (3)$$

Расчет величины энергии  $W$  по формуле (3) дает значение  $77,0$  кДж/м<sup>3</sup>. Таким образом, принимая плотность алюминия равной  $2,7$  г/см<sup>3</sup>, величина запасенной в механической форме энергии в НП Al составляет  $0,385$  Дж/г. В то же время величина запасенной энергии, определенная путем вычитания теплового эффекта окисления (до плавления алюминия), сопровождающегося релаксацией микронапряжений и тепловым эффектом только окисления (выше температуры плавления алюминия), составляет  $348$  Дж/г. Рассмотренный в данной статье метод позволяет количественно оценить величину запасенной энергии, связанной со структурно-энергетическим состоянием металлической составляющей наночастицы.

### Заключение

С помощью метода рентгеноструктурного анализа установлено, что в пассивированном воздухе электровзрывном нанопорошке алюминия кристаллическая решётка находится в напряжен-

ном состоянии (относительные микроискажения кристаллитов составляют  $8,66 \cdot 10^{-4}$ ), и в виде механических искажений запасается относительно небольшая величина энергии (0,385 Дж/г). Общая величина запасенной энергии, определенная с помощью дифференциального термического анализа, составляет 348 Дж/г. Эта величина включает в себя как энергию напряженно-деформированного состояния микрокристаллитов в наночастице, так и энергию поверхности наночастицы.

Таким образом, согласно данным рентгеноструктурного и дифференциального термического анализов, формами запасания энергии наночастиц являются как её поверхность, так и напряженно-деформированное состояние металлической составляющей, сформированное в экстремальных условиях получения наночастиц при электрическом взрыве проводника.

*Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ 15-03-05385.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Korshunov A.V., Heyrovsky M. Voltammetry of aluminum nanoparticles in aqueous media with hanging mercury drop electrode // *Electroanalysis*. – 2010. – V. 22. – P. 1989–1993.
- Хауффе К. Реакции в твердых телах и на их поверхности. Ч. 1. – М.: ИЛ, 1962. – 416 с.
- Beaumont F.V. Aluminum P/M: Past, present and future // *Inter. J. Powd. Metal.* – 2000. – V. 6. – P. 41–44.
- Beckstead M.W. A summary of aluminum combustion. RTO/VKI Special Course on «Internal Aerodynamics in Solid Rocket Propulsion»: Report number RTO-EN-023, 2002. – 45 p.
- Khabas T.A. Solid-phase synthesis and sintering in oxide-metal mixtures of highly dispersed powders // *Glass and Ceramics*. – 2002. – V. 59. – P. 404–408.
- Hunt W.H. New directions in aluminum-based P/M materials for automotive applications // *International Journal of Powder Metallurgy*. – 2000. – V. 36. – P. 50–56.
- Chun-Nan Lin, Shyan-Lung Chung. Combustion synthesis of aluminum nitride powder using additives // *J. Mater. Res.* – 2001. – V. 16 – P. 2200–2208.
- Shyan Lung Chung, Chun Hung Lai. Combustion Synthesis of Aluminum Nitride: a review. *Key Eng. Mat.* – 2012. – V. 521 – P. 101–111.
- Salt-Assisted SHS Synthesis of Aluminium Nitride Powders for Refractory Applications / A. Wilmański, M. Bućko, Z. Pędzich, J. Szczerba // *J. Mater. Sci. Chem. Eng.* – 2014. – V. 2. – P. 26–31.
- Уэндландт В. Термические методы анализа. – М.: Мир, 1978. – 527 с.
- Cox J.D., Wagman D.D., Medvedev V.A. CODATA Key Values for Thermodynamics. – New York, USA: Hemisphere Publishing Corp., 1989. – 528 p.
- Gromov A.A., Chukhlomina L.N. Nitride Ceramics: Combustion Synthesis, Properties and Applications. – Weinheim: Wiley-VCH, 2014. – 332 p.
- Il'in A.P., Mostovshchikov A.V., Root L.O. Growth of Aluminum Nitride Single Crystals under Thermal Explosion Conditions // *Tech. Phys. Lett.* – 2011. – V. 37/10. – P. 965–966.
- Ильин А.П., Мостовщиков А.В., Тимченко Н.А. Изучение последовательности фазообразования при горении прессованного нанопорошка алюминия в воздухе с применением синхротронного излучения // *Физика горения и взрыва*. – 2013. – Т. 49. – № 3. – С. 72–76.
- Swihart M.T., Catorie L. Thermochemistry of aluminum species for combustion modeling from Ab Initio molecular orbital calculation // *Combust. Flame*. – 2000. – V. 121. – P. 210–222.
- Gromov A.A., Teipel U. Metal Nanopowders: Production, Characterization and Energetic Applications. – Weinheim: Wiley-VCH, 2014. – 440 p.
- Состав примесей и микропримесей в нанопорошке алюминия и продуктах его сгорания в воздухе / А.П. Ильин, А.А. Громов, В.Г. Меркулов, А.В. Мостовщиков // *Известия вузов. Физика*. – 2015 – Т. 58. – № 6/2. – С. 101–105.
- The kinetics of oxidation of aluminum electroexplosive nanopowders during heating in air / A.V. Korshunov, A.P. Il'in, N.I. Radishevskaya, T.P. Morozova // *Russ. J. Phys. Chem. A*. – 2010. – V. 84. – P. 1576–1584.
- Рентгенодифракционные исследования структурно-фазовых состояний в поверхностных слоях никелида титана, модифицированных электронно-пучковой обработкой / М.Г. Остапенко, Л.Л. Мейснер, А.И. Лотков, Е.Ю. Гудимова, М.А. Захарова // *Известия Томского политехнического университета. Химия*. – 2014. – Т. 324. – № 3. – С. 36–43.
- Genzel Ch. A Study of X-Ray Residual Stress Gradient Analysis in Thin Layers with Strong Fibre Texture // *Phys. stat. sol. (a)*. – 1998. – V. 165. – P. 347–360.

*Получена 16.12.2015 г.*



UDC 54–162.2

**ENERGY STORAGE IN ALUMINUM NANOPOWDER IN STRESS-STRAIN STATE OF CRYSTAL LATTICE****Andrey V. Mostovshchikov,**

Tomsk Polytechnic University,

30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: pasembellum@mail.ru

**Alexander P. Ilyin,**

Tomsk Polytechnic University,

30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: genchem@mail.ru

**Margarita A. Zakharova,**

Tomsk Polytechnic University,

30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: tibiboreth@gmail.com

When transforming metals into nanodispersed state nanopowders acquire new properties, including the storage of energy by nanopowders. The increasing interest to aluminum powders and nanopowders is caused by their application as a high-energy additive in rocket fuels and pyrotechnic mixtures. Thus, the investigation of energy storage in Al nanopowder is of great importance. Besides, it is not easy to determine the amount of stored energy in Al nanopowder. The authors have used the aluminum nanopowder obtained by electrical explosion of aluminum wire in argon, using UDP-4D installation developed in Tomsk Polytechnic University.

**The main aim of the study** is to assess experimentally the value of energy, stored in the form of stress-strain state of the crystal lattice of Al nanopowder and to compare the obtained value to a general value of stored energy.

**The methods used in the study** are the X-Ray diffraction, differential thermal analysis.

It was ascertained that the crystal lattice is in stressed state in air-passivated electroexplosive aluminum nanopowder. The modified Lorenz function was used as a profile function; crystalline microdistortions, calculated by the approximation technique, amount to  $8,66 \cdot 10^{-4}$ . The value of energy, stored in the stress-strain state of the crystal lattice of electroexplosive aluminum nanopowder, is 0,385 J/g, while the value of stored energy, determined by means of differential thermal analysis, is 348 J/g. Thus, the most feasible mechanism of storing significant energy in aluminum nanopowder is the formation of more energy-saturated structures in solid (the formation of a double electric layer with pseudocapacity during passivation).

**Key words:**

Aluminum nanopowder, stored energy, X-Ray diffraction, double electric layer, microstrain, stress-strain state.

The reported study was funded by RFBR according to the research project no. 15–03–05385

**REFERENCES**

- Korshunov A.V., Heyrovsky M. Voltammetry of aluminum nanoparticles in aqueous media with hanging mercury drop electrode. *Electroanalysis*, 2010, vol. 22, pp. 1989–1993.
- Hauffe K. *Reaktsii v tverdykh telakh i na ikh poverkhnosti* [Reactions in and on solids]. Moscow, IL, 1962. 416 p.
- Beaumont F.V. Aluminum P/M: Past, present and future. *Inter. J. Powd. Metal.*, 2000, vol. 6, pp. 41–44.
- Beckstead M.W. A summary of aluminum combustion. *RTO/VKI Special Course on «Internal Aerodynamics in Solid Rocket Propulsion»*. Report number RTO-EN-023. 2002. 45 p.
- Khabas T.A. Solid-phase synthesis and sintering in oxide-metal mixtures of highly dispersed powders. *Glass and Ceramics*, 2002, vol. 59, pp. 404–408.
- Hunt W.H. New directions in aluminum-based P/M materials for automotive applications. *International Journal of Powder Metallurgy*, 2000, vol. 36, pp. 50–56.
- Chun-Nan Lin, Shyan-Lung Chung, Combustion synthesis of aluminum nitride powder using additives. *J. Mater. Res.*, 2001, vol. 16, pp. 2200–2208.
- Shyan Lung Chung, Chun Hung Lai, Combustion Synthesis of Aluminum Nitride: A Review. *Key Eng. Mat.*, 2012, vol. 521, pp. 101–111.
- Wilmański A., Bućko M., Pędzich Z., Szczerba J. Salt-Assisted SHS Synthesis of Aluminium Nitride Powders for Refractory Applications. *J. Mater. Sci. Chem. Eng.*, 2014, vol. 2, pp. 26–31.
- Wendlandt W.W. *Thermal Methods of Analysis*. NY, John Wiley & Sons, 1974. 527 p.
- Cox J.D., Wagman D.D., Medvedev V.A. *CODATA Key Values for Thermodynamics*. New York, USA, Hemisphere Publishing Corp., 1989. 528 p.
- Gromov A.A., Chukhlomina L.N. *Nitride Ceramics: Combustion Synthesis, Properties and Applications*. Weinheim, Wiley-VCH, 2014. 332 p.
- Il'in A.P., Mostovshchikov A.V., Root L.O. Growth of Aluminum Nitride Single Crystals under Thermal Explosion Conditions. *Tech. Phys. Lett.*, 2011, vol. 37, no. 10, pp. 965–966.
- Il'in A.P., Mostovshchikov A.V., Timchenko N.A. Phase Formation Sequence in Combustion of Pressed Aluminum Nanopowder in Air Studied by Synchrotron Radiation. *Combust., Expl., Shock Waves*, 2013, vol. 49 (3), pp. 320–324.
- Swihart M.T., Catorie L. Thermochemistry of aluminum species for combustion modeling from Ab Initio molecular orbital calculation. *Combust. Flame*, 2000, vol. 121, pp. 210–222.
- Gromov A.A., Teipel U. *Metal Nanopowders: Production, Characterization, and Energetic Applications*. Weinheim, Wiley-VCH, 2014. 440 p.
- Ilyin A.P., Gromov A.A., Merkulov V.G., Mostovshchikov A.V. Sostav primesey i mikroprimesey v nanoporoshke aluminiya i produktakh ego sgoraniya [Composition of impurities and trace substances in aluminum nanopowder and its combustion products in air]. *Russian Physics Journal*, 2015, vol. 58, no. 6/2, pp. 101–105.
- Korshunov A.V., Il'in A.P., Radishevskaya N.I., Morozova T.P. The kinetics of oxidation of aluminum electroexplosive nanopowders during heating in air. *Russ. J. Phys. Chem. A.*, 2010, vol. 84, pp. 1576–1584.

19. Ostapenko M.G., Meisner L.L., Lotkov A.I., Gudimova E.Yu., Zakharova M.A. Rentgenodifraktsionnye issledovaniya strukturo-fazovykh sostoyaniy v poverkhnostnykh sloyakh nikelida tita-na, modifitsirovannykh elektronno-puchkovoy obrabotkoy [X-Ray diffraction study of structural phase states in TiNi near-surface layers irradiated with pulsed electron beams]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 324, no. 3, pp. 36–43.
20. Genzel Ch. A Study of X-Ray Residual Stress Gradient Analysis in Thin Layers with Strong Fibre Texture. *Phys. stat. sol. (a)*, 1998, vol. 165, pp. 347–360.

*Received: 16 December 2015.*

УДК 631.438

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЛИНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ СОЗДАНИЯ БАРЬЕРА БЕЗОПАСНОСТИ ВЫВОДИМОГО ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ РЕАКТОРА АД

**Чубреев Дмитрий Олегович,**

аспирант Физико-технического института Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: d.chubreev@gmail.com

**Кузнецов Гений Владимирович,**

доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой теоретической и промышленной теплотехники Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: marisha@tpu.ru

*Предметом настоящей публикации являются результаты математического моделирования процессов диффузии и фильтрации  $C^{14}$  в создаваемом глинистом барьере.*

**Актуальность работы** обусловлена необходимостью создания дополнительных природных барьеров безопасности, обеспечивающих выполнение требований радиационной безопасности, при выводе реакторов из эксплуатации по варианту радиационно-безопасного захоронения на месте.

**Цель работы:** оценка влияния свойств глинистых пород на долговечность барьера и определение оптимального типа материала для использования в качестве барьерного; показать, что влияние вертикальной диффузии и процесса конвективного переноса радионуклидов в увлажнённом слое грунта водами, фильтрующимися через слой твёрдых отходов, играют определяющую роль в процессе распространения радионуклидов.

**Методы исследования:** математические расчеты уравнения нестационарной диффузии методом конечных разностей в программном комплексе MatLab.

**Результаты.** Построена математическая модель оценки миграции радиоуглерода в барьере безопасности выводимого из эксплуатации реактора АД. Определено распределение удельной активности радионуклида по глубине глинистого барьера безопасности, а также наиболее надежный тип глины, который будет сохранять свои гидроизолирующие и барьерные свойства спустя длительный период времени. Показано, что через длительный временной интервал пласты глины будут сохранять свои гидроизолирующие и барьерные свойства, а сооруженный за пределами влияния тектонических разломов пункт захоронения радиоактивных отходов за время своей эксплуатации и консервации не будет разрушен и заполнен водой. Определено, что размещение радиоактивных отходов в геологических формациях с многобарьерной геотехнологической системой защиты – оптимальный по безопасности вариант научно обоснованного и технически доступного решения проблемы удаления радиоактивных отходов.

### **Ключевые слова:**

Вывод из эксплуатации, пункт захоронения радиоактивных отходов, барьеры безопасности, миграция, метод конечных разностей.

### **Введение**

Реактор АД представляет собой одноцелевой проточный промышленный уран-графитовый реактор на тепловых нейтронах, размещенный в глубине горного массива в скальных выработках Ангаро-Канского гидрогеологического массива. Данные породы характеризуются низкой пористостью и проницаемостью. Скорость фильтрации воды находится в диапазоне 0,15–110 м/год [1]. Реактор остановлен 30.06.1992 г. для вывода из эксплуатации по варианту безопасного захоронения на месте.

Согласно ФЗ «Об использовании атомной энергии» при хранении или при захоронении радиоактивных отходов должны быть обеспечены их надежная изоляция от окружающей среды, защита настоящего и будущих поколений, биологических ресурсов от радиационного воздействия сверх установленных норм.

В соответствии с [2] для изоляции радионуклидов от окружающей среды создаются дополнительные барьеры безопасности, которые сооружаются за пределами и в пределах шахты реактора и хра-

нилищ твердых радиоактивных отходов (РАО), находящихся на площадке размещения реактора.

В работе [3] рассмотрен процесс миграции  $C^{14}$  в окружающую среду. С целью обоснования пригодности использования глин при выводе из эксплуатации реактора АД ФГУП «ГХК» по варианту захоронения на месте проведено дополнительное исследование влияния свойств глинистых пород, в частности вермикулита вспученного, бентонита камалинского, каолиновой глины и суглинка березовского, на долговечность глинистого барьера безопасности.

Предметом настоящей публикации являются результаты математического моделирования процессов диффузии и фильтрации  $C^{14}$  в создаваемом глинистом барьере.

Основными требованиями, предъявляемыми к барьерным материалам, являются: низкая водопроницаемость, высокая сорбционная способность по отношению к радионуклидам, стабильность свойств на протяжении времени, высокая пластичность и достаточная несущая способность.

ИФХЭ РАН проведен комплекс исследований образцов глинистых пород, включающий определение гранулометрического и минералогического состава пород, их химических, водно-физических и сорбционных свойств (табл.) [4].

**Таблица.** Характеристики глинистых пород

**Table.** Clay material characteristics

Глинистая порода Clay material		Вермикулит вспученный Vermiculite expanded	Бентонит камалинский Bentonite Samalinsky	Каолинитовая глина Kaolinite clay	Суглинок березовский Loam Berezovsky
Параметры Characteristic					
Содержание фракций частиц породы (%) Fraction content [5, 6]	Гравий gravel	19,5	0,6	–	–
	Песок sand	74,6	30,6	12,7	5,2
	Пыль dust	–	54,7	66,7	90
	Ил silt	–	14,1	20,6	4,8
Коэффициент межфазного распределения, $K_d$ (м <sup>3</sup> /кг) Constant of interface distribution		0,25	0,12	0,0	0,1
Фактор задержки, $R$ Delay factor		600	3200	65	320
Плотность, $\rho$ (кг/м <sup>3</sup> ) Density		150	1190	880	1310
Средняя влажность, $\theta$ (%) Average humidity		71,4	55	58,8	31,8
Коэффициент диффузии, $D$ (м <sup>2</sup> /год) Diffusion constant		0,76	$1,58 \cdot 10^{-3}$	$2,75 \cdot 10^{-3}$	$3,16 \cdot 10^{-4}$

Вертикальная диффузия и процесс конвективного переноса радионуклидов в слое грунта, увлажнённого водами, фильтрующимися через слой твёрдых отходов, играют определяющую роль в процессе распространения радионуклидов [4]. За время существования пункта захоронения радиоактивных отходов (ПЗРО) радионуклиды могут проникнуть на значительную глубину, достигая уровня грунтовых вод [7, 8, 9]. Поэтому представляет практический интерес использование математических моделей, позволяющих быстро находить содержание радионуклидов в почве в любой момент времени. Результаты моделирования могут быть в дальнейшем использованы для анализа экологических последствий распространения загрязняющих веществ в окружающей среде.

**Задача.** Требуется оценить распределение объемной активности радиоуглерода во времени и по глубине глинистого барьера безопасности, а также выявить наиболее подходящий материал для создания барьера безопасности.

Процесс распространения радиоуглерода описывается дифференциальным уравнением нестационарной диффузии при наличии фильтрационного движения влаги:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v \frac{\partial C}{\partial x} - \lambda C + \varphi, \quad (1)$$

где  $C$  – концентрация радионуклида в глине;  $t$  – время;  $x$  – пространственная координата;  $D$  – коэффициент диффузии радионуклида в глине;  $v$  – скорость движения радионуклида в глине под действием влаги;  $\lambda$  – постоянная распада радионуклида;  $\varphi$  – функция источника поступления радионуклида в глину.

Функция  $\varphi$  учитывает время  $t$  выщелачивания радиоуглерода из графитовой кладки и неравномерность распределения радионуклидов в ней,  $\lambda C$  учитывает радиоактивный распад радионуклидов.

Для решения поставленной задачи приняты следующие допущения: слой глины представляет собой пористую однородную среду  $0 < x < H$ ; влага фильтруется с постоянной скоростью; в качестве загрязняющего вещества рассмотрен  $C^{14}$ , который не вступает в химическое взаимодействие. Также принято допущение, что процесс выщелачивания  $C^{14}$  из графитовой кладки происходит с постоянной скоростью. Численные решения нестационарного уравнения диффузии проводились методом конечных разностей в программном комплексе MatLab [10–12].

**Исходные данные:**

- толщина глинистого барьера ( $H$ ) – 6 м;
- скорость движения почвенной влаги ( $u$ ) –  
1) 0,15 м/год;  
2) 55 м/год;  
3) 110 м/год;
- период полураспада радиоуглерода ( $T$ ) – 5730 лет;
- скорость поступления радионуклида в глину ( $\varphi$ ) –  $10^{-5} \dots 10^{-6}$  кг/м<sup>2</sup>·сут [13];
- начальная концентрация радионуклида на границе барьера ( $C_0$ ) –  $6,8 \cdot 10^{14}$  Бк/кг.

**Начальные и граничные условия:**

$$t = 0 : C = C_0, \quad 0 \leq x \leq H;$$

$$x = 0 : -D \frac{\partial C}{\partial x} = 0, \quad t > 0;$$

$$x = H : -D \frac{\partial C}{\partial x} = 0, \quad t > 0.$$

**Методика решения**

На рис. 1 представлена геометрия данной задачи. Для ее решения методом конечных разностей построена конечно-разностная сетка (рис. 2). Определено значение концентрации в  $i$ -м узле в момент времени  $t = t_n = n \tau$  как  $C(x_i, t_n) = C_i^n$ , где  $\tau$  – шаг интегрирования по временной координате,  $n$  – номер шага по времени.

В уравнении (1) дифференциальные операторы заменены на их конечно-разностные аналоги и получено уравнение вида

$$\frac{C_i^{n+1} - C_i^n}{\tau} = D \cdot \left( \frac{C_{i+1}^{n+1} - 2C_i^{n+1} + C_{i-1}^{n+1}}{h^2} \right) - v \cdot \left( \frac{C_i^{n+1} - C_i^n}{h} \right) - \lambda \cdot \left( \frac{C_i^{n+1} - C_i^n}{\tau} \right) + \varphi.$$

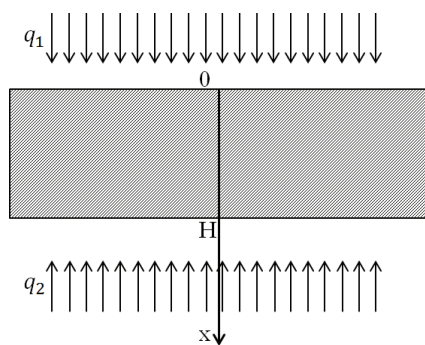


Рис. 1. Геометрия задачи

Fig. 1. Task geometry

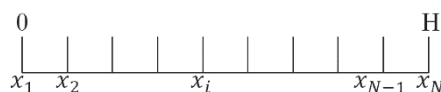


Рис. 2. Конечно-разностная сетка:  $x_2, x_3, \dots, x_{N-1}$  – координаты внутренних узлов;  $x_1, x_N$  – координаты граничных узлов

Fig. 2. Finite-difference mesh:  $x_2, x_3, \dots, x_{N-1}$  – internal node coordinates;  $x_1, x_N$  – boundary node coordinates

Проведена дискретизация граничных условий II рода с погрешностью  $O(h^2)$ . После ряда математических преобразований получены выражения для определения удельной активности радионуклида в первом и последнем узлах [14, 15]:

$$C_1^{n+1} = \frac{2D\tau}{2D\tau - h^2} \cdot C_2^{n+1} + \frac{h(1 - \lambda\tau)}{2D\tau - h^2} \cdot C_1^n + \frac{h^2\varphi\tau}{2D\tau - h^2}; \quad (2)$$

$$C_N^{n+1} = \frac{hC_N^n(2D\alpha_{N-1} + h(1 - \lambda)) + 2D\tau\beta_{N-1} - h^2\varphi}{2D + h^2}. \quad (3)$$

Для определения средней линейной скорости движения радиоуглерода под действием влаги использовано выражение  $v = \frac{\theta u}{K_d \rho}$  [16, 17].

### Результаты и обсуждение

Ранее [3] было установлено, что только в первые 1100 лет после создания барьеров безопасности возможно превышение уровня вмешательства удельной концентрации радиоуглерода на выходе из графитовой кладки. В связи с этим для данного периода времени и четырех типов глинистых пород построена зависимость удельной концентрации радиоуглерода на выходе из глинистого барьера безопасности.

На рис. 3 видно, что лучшими глинистыми породами на пути миграции радионуклида являются бентонит камалинский (3) и вермикулит вспученный (4). Для данных пород проведен анализ влияния сильных осадков на барьерную способность.

На рис. 4 приведено распределение удельной концентрации  $C^{14}$  по толщине глинистого барьера для скорости фильтрации влаги.

На рис. 4 видно, что для бентонита камалинского, при интенсивном увлажнении, например в

сезоны дождей, концентрация радиоуглерода по толщине барьера практически не меняется в отличие от вермикулита вспученного. Это обусловлено сильным отличием диффузионных свойств пород [18]. Кроме того, на величину водопроницаемости в сильной степени влияет пористость глинистой породы. Со временем происходит постепенное уплотнение и заиливание порового пространства [19, 20].

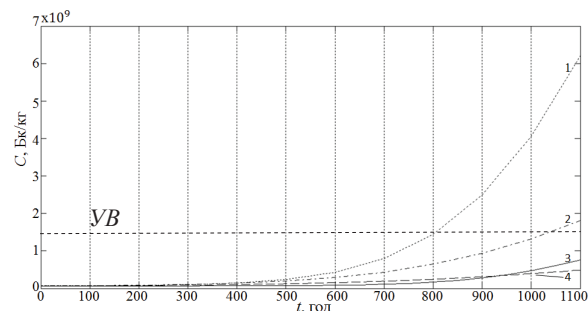


Рис. 3. Удельная концентрация  $C^4$  на выходе из глинистого барьера: 1 – суглинок березовский, 2 – каолинистая глина, 3 – бентонит камалинский, 4 – вермикулит вспученный

Fig. 3.  $C^4$  specific concentration on the going out of clayey barrier: Berezovsky loam (1), kaolinite clay (2), Camalinsky bentonite (3), expanded vermiculite (4)

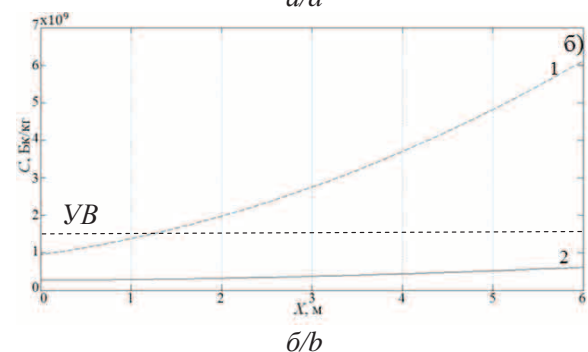
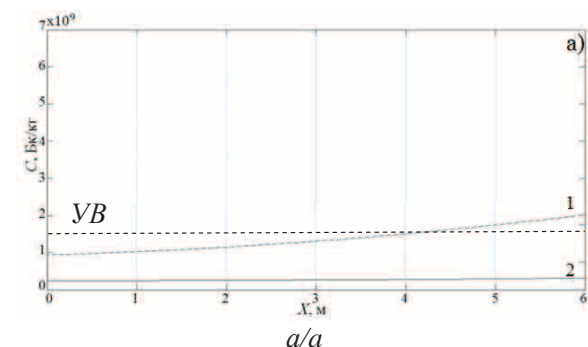


Рис. 4. Удельная концентрация  $C^4$  по толщине барьера: а – 55 м/год; б – 110 м/год; 1 – вермикулит вспученный; 2 – бентонит камалинский

Fig. 4.  $C^4$  specific concentration along the barrier thickness: а) 55 m/year; б) 110 m/year; expanded vermiculite (1), Camalinsky bentonite (2)

Бентонит камалинский и вермикулит вспученный пригодны для использования в качестве материалов для создаваемых барьеров безопасности.

В течение периода времени 1100 лет рассматриваемые материалы не допустят выхода радиоуглерода за пределы ПЗРО, кроме ситуаций, связанных с интенсивным выпадением осадков. В случае обильных осадков противифльтрационные и противомиграционные свойства вермикулита заметно уступают бентониту.

#### Заключение

Данная модель миграции использована для оценки диффузии и фильтрации радионуклида в барьере безопасности выводимого из эксплуатации реактора АД.

Размещение в геологических формациях с многобарьерной геотехнологической системой защиты – оптимальный по безопасности вариант

научно обоснованного и технически доступного решения проблемы удаления радиоактивных отходов.

Пункт захоронения радиоактивных отходов является сложной многоуровневой геотехнологической системой, основное назначение которой – сохранить стабильность первоначальных условий изоляции радионуклидов в пространственно ограниченном объеме недр в течение заданного интервала времени.

Наиболее вероятно, что и через 500 лет пласты глины будут сохранять свои гидроизолирующие и барьерные свойства, а сооруженный за пределами влияния тектонических разломов ПЗРО за время своей эксплуатации и консервации не будет разрушен и заполнен водой.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сбор и систематизация имеющихся сведений о природных и техногенных условиях горного массива, вмещающего основные сооружения ФГУП «ГХК» для обоснования безопасности долговременной изоляции ОЯТ и/или РАО в подземных сооружениях комбината. – Железногорск: ЗАО «Геоспецэкология», 2008. – 95 с.
2. Антоненко М.В., Чубреев Д.О., Кузнецов Г.В. Моделирование процесса диффузии радиоуглерода из активной зоны выводимого из эксплуатации ПУТР АД // Атомная энергия. – 2015. – Т. 118. – С. 63–68.
3. Захарова Е.В., Горбунова О.А., Волкова А.Г. Отчет «Определение сорбционных характеристик образцов глинистых пород». – М.: ИФХЭ РАН, 2013. – 76 с.
4. Прохоров В.М. Миграция радиоактивных загрязнений в почвах. – М.: Энергоиздат, 1981. – 98 с.
5. Савоненков В.Г., Андерсон Е.Б., Шабалев С.И. Глины как геологическая среда для изоляции радиоактивных отходов. – СПб.: ИД «Инфо Ол», 2012. – 215 с.
6. Lab scale experiments for permeable reactive barriers against contaminated groundwater with ammonium and heavy metals / J. Park, S. Lee, J. Lee, C. Lee // Journal of Hazardous Materials. – 2012. – V. 95. – P. 65–79.
7. Smith G.E. Fractionation of Actinide Elements in Sediments via an Optimized Protocol for Sequential Chemical Extractions. Florida: Florida state University, 1998. – 115 p.
8. Bowman R.S. Applications of surfactant-modified zeolites to environmental remediation // Microporous Mesoporous. – 2014. – V. 61. – P. 43–56.
9. Germanskaia A.A. Natural Background Radioactive Carbon and the Natural Death Rate of People // Rejuvenation Research. – 2006. – V. 9. – P. 302–308.
10. Воробьева Л.А. Химический анализ почв. – М.: Изд-во МГУ, 1998. – 272 с.
11. Шарафутдинов Р.Б. Моделирование диффузии радионуклидов из приповерхностных хранилищ жидких РАО // Ядерная и радиационная безопасность. – 2008. – № 1. – С. 18–25.
12. Шейн Е.В. Курс физики почв. – М.: Изд-во МГУ, 2005. – 432 с.
13. Мионов В.П. Обращение с радиоактивными отходами. – Минск: МГЭУ им. А.Д. Сахарова, 2009. – 172 с.
14. Лыков А.В. Тепломассообмен. – М.: Энергия, 1978. – 479 p.
15. Tesser A., Campbell P.G.C., Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals // Analytical Chemistry. – 1979. – V. 51. – P. 844–851.
16. Базылев В.В. Параметры миграции радионуклидов из грунтовых могильников твердых радиоактивных отходов // Вопросы радиационной безопасности. – 1997. – № 1. – С. 31–35.
17. Кудряшов Н.А., Серебрякова И.Е. Математическое моделирование миграции долгоживущих радионуклидов в почве в результате радиоактивных выпадений // Атомная энергия. – 1993. – Т. 74. – С. 243–247.
18. Соколова Т.А., Дронова Т.Я., Толпешта И.И. Глинистые минералы в почвах. – Тула: Гриф и К, 2005. – 336 с.
19. Орлов Д.С. Химия почв. – М.: Изд-во МГУ, 1992. – 400 с.
20. Содержание трансурановых элементов в почвах и донных отложениях / Ф.И. Павлоцкая, Т.И. Гряченкова, И.Е. Казинская, В.В. Ткачев, Б.Ф. Мясоедов // Радиохимия. – 2003. – Т. 45. – № 5. – С. 471–478.

Поступила 01.12.2015 г.

UDK 631.438

## USING CLAY MATERIALS FOR DEVELOPING SAFETY BARRIER OF DECOMMISSIONING AD REACTOR

Dmitry O. Chubreev,

Tomsk Polytechnic University,

30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: d.chubreev@gmail.com

Geny V. Kuznetsov,

Tomsk Polytechnic University,

30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: marisha@tpu.ru

**The relevance** of the research is caused by the necessity of developing the additional safety barriers providing implementation of radiation safety requirements in the time of reactor decommissioning by the method of burial site.

**The aim** of the research is to evaluate the impact of clay materials properties on barrier durability and to determine the optimum type of material for applying as a barrier; to show that the effect of the vertical diffusion and convective transport of radionuclides in the soil moistened layer with water, filtered through a bed of solid wastes, play a decisive role in distribution of radionuclides. The results of mathematical modeling of diffusion and filtration of radiocarbon in the generated clay barrier are the subject of the paper.

**Methods:** unsteady-state diffusion math equation by finite difference method in MatLab software package.

**Results.** The authors have developed the mathematical model for estimating radiocarbon migration in the decommissioning reactor AD safety barrier and defined the most reliable clay type as well as the radionuclide specific activity distribution in clay safety barrier thickness. It is shown that in a long time interval the clay layers will maintain their waterproofing and barrier properties, and the burial site of radioactive wastes, built outside the influence of tectonic faults, won't be destroyed and filled with water during its operation and conservation. It was determined that the placement of a radioactive waste in geological formations with a multi-barrier geotechnological protection system is the optimum security option of scientifically sound and commercially available solution to the problem of radioactive waste disposal.

**Key words:**

Decommissioning, disposal of radioactive waste, safety barrier, migration, finite difference method.

## REFERENCES

1. *Sbor i sistematizatsiya imeyushchihsvya svedeniy o prirodnykh i tekhnogennykh usloviyakh gornogo massiva, vmeshchayshuchego osnovnye soorzheniya GHK dly obosnovaniya bezopasnosti dolgovremennoy izolyatsii OYaT v podzemnykh soorzyeniakh* [Collection and systematization of information on natural and man-made conditions of the rock mass, enclosing the main structures of the FSUE «MCC» to substantiate the safety of long-term isolation of spent nuclear fuel and/or radioactive waste in underground constructions plant]. Zheleznogorsk, Geospetsekologiya Publ., 2008. 95 p.
2. Antonenko M.V., Chubreev D.O., Kuznetsov G.V. Modelirovanie protsessy diffuzii radioiugleroda iz aktivnoy zony vyvodimogo iz ekspluatatsii PUGR AD [Modelling of radiocarbon diffusion from the core of decommissioned PUGR AD]. *Atomic Energy*, 2015, vol. 118, pp. 63–68.
3. Zakharova E.V., Gorbunova O.A., Volkova A.G. *Opreделение sorbtionnykh kharakteristik obraztsov glinistykh porod* [Determination of sorption characteristics of samples of argillaceous rocks]. Moscow, IFHE RAN Press, 2013. 76 p.
4. Prokhorov V.M. *Migratsiya radioaktivnykh zagryazneniy v pochvakh* [Migration of radioactive contaminants in soils]. Moscow, Energoizdat Publ., 1981. 98 p.
5. Savonenkov V.G., Anderson E.B., Shabalev S.I. *Gliny kak geologicheskaya sreda dlya izolyatsii radioaktivnykh otkhodov* [Clay as a geological environment for radioactive waste disposal]. Saint-Petersburg, Info Ol Publ. House, 2012. 215 p.
6. Park J., Lee S., Lee J., Lee C. Lab scale experiments for permeable reactive barriers against contaminated groundwater with ammonium and heavy metals. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, vol. 95, pp. 65–79.
7. Smith G.E. *Fractionation of Actinide Elements in Sediments via an Optimized Protocol for Sequential Chemical Extractions*. Florida, Florida state University, 1998. 115 p.
8. Bowman R.S. Applications of surfactant-modified zeolites to environmental remediation. *Microporous Mesoporous*, 2014, vol. 61, pp. 43–56.
9. Germanskaia A.A. Natural Background Radioactive Carbon and the Natural Death Rate of People. *Rejuvenation Research*, 2006, vol. 9, pp. 302–308.
10. Vorobeva L.A. *Khimichesky analiz pochv* [Chemical analysis of soil]. Moscow, MSU Press, 1998. 272 p.
11. Sharafutdinov R.B. Modelirovanie diffuzii radionuklidov iz pripoverhnostnykh khranilishch zhidkikh RAO [Modelling of radionuclides diffusion from the near-surface storage facilities for liquid radioactive waste]. *Nuclear and Radiation Safety*, 2008, no. 1, pp. 18–25.
12. Shein E.V. *Kurs fiziki pochv* [The course of soil physics]. Moscow, MSU Press, 2005. 432 p.
13. Mironov V.P. *Obrashchenie s radioaktivnymi otkhodami* [Radioactive waste handling]. Minsk, MSEU im. A.D. Saharova Press, 2009. 172 p.
14. Lykov A.V. *Teplomassoobmen* [Heat and Mass Transfer]. Moscow, Energiya Publ., 1978. 479 p.
15. Tesser A., Campbell P.G.C., Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. *Analytic Chemical*, 1979, vol. 51, pp. 844–851.
16. Bazylev V.V. Parametry migratsii radionuklidov iz gruntovykh mogilnikov tverdykh radioaktivnykh otkhodov [Migration of radionuclides from groundwater burial of solid radioactive waste]. *Radiation Safety Issues*, 1997, no. 1, pp. 31–35.
17. Kudryashov N.A., Serebryakova I.E. Matematicheskoe modelirovanie migratsii dolgozhivushchikh radionuklidov v pochve v rezultate radioaktivnykh vypadeniy [Mathematical modeling of migration of long-lived radionuclides in soil as a result of radioactive fallout]. *Atomic energy*, 1993, vol. 74, pp. 243–247.
18. Sokolova T.A., Dronova T.Ya., Tolpeshta I.I. *Glinistye materialy v poshvakh* [Clay minerals in soils]. Tula, Grif I K Publ., 2005. 336 p.
19. Orlov D.S. *Khimiya Pochv* [Soil Chemistry]. Moscow, MSU Press, 1992. 400 p.
20. Pavlockaya F.I., Gryachenkova T.I., Kazinskaya I.E., Tkachev V.V., Myasoedov B.F. Soderzhanie transuranovykh elementov v pochvakh i donnykh otlozheniyakh [The content of transuranic elements in soils and sediments]. *Radiochemistry*, 2003, vol. 45, no. 5, pp. 471–478.

Received: 1 December 2015.

УДК 504.4:551.312:556.431(571.16)

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ВЕРТИКАЛЬНОМ ПРОФИЛЕ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ СЛАБОПРОТОЧНЫХ ВОДОЕМОВ ТОМСКОГО РАЙОНА

**Иванов Андрей Юрьевич,**

старший преподаватель кафедры геоэкологии и геохимии  
Института природных ресурсов Национального исследовательского  
Томского политехнического университета,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: Ivanov-13@mail.ru

**Актуальность работы** обосновывается необходимостью разработки критериев оценки состояния окружающей среды. Донные отложения депонируют в себе поступающие в водоемы химические элементы из природных и техногенных источников и могут служить индикатором антропогенного изменения природной среды.

**Цель работы:** изучение специфики изменения химического элементного состава и выявление вероятных источников поступления химических элементов в донные отложения слабопроточных водоемов юга Томской области.

**Методы исследования:** детальное мелкосекционное опробование донных отложений разнотипных слабопроточных водоемов, инструментальный нейтронно-активационный анализ (количественное определение 29 химических элементов), атомно-адсорбционный метод «холодного пара» (определение Hg), методы  $\alpha$ -спектрометрии ( $^{241}\text{Am}$ ) и гамма-спектрометрии ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ).

**Результаты.** Выделено три типа слабопроточных водоемов по характеру распределения элементов в вертикальном профиле донных отложений Томского района: первый – тип равномерного распределения со слабо проявленными аномалиями (оз. Ларино (оз. Ум)), что указывает на преимущественно кластогенное поступление элементов-примесей в водоем; второй – тип слабо дифференцированного распределения с проявлением слабовыраженных аномалий в верхней части (оз. в с. Тимирязевское), связанных с периодическим и неравномерным привнесением загрязняющих веществ в водоем, например, в результате половодья; третий – тип резко дифференцированного распределения с контрастными аномалиями (Черное озеро), указывающими на резкую смену геохимической обстановки, соответствующей периоду 1950–1960 гг., что приходится примерно на десятисантиметровый интервал в вертикальной колонке донных отложений. Смену геохимических ассоциаций можно приурочить к строительству Сибирского химического комбината и началу промышленной перестройки г. Томска.

### **Ключевые слова:**

Вертикальное распределение, донные отложения, слабопроточные водоемы, элементы-примеси, окружающая среда.

### **Введение**

Донные отложения часто служат источником информации о хронологии поступления техногенных радионуклидов и прочих загрязнителей (тяжелых металлов, хлорорганических соединений) в окружающую среду. Эффективность использования донных отложений в качестве инструмента для оценки изменчивости состояния окружающей среды отражена в многочисленных исследованиях [1–6]. Показано, что, несмотря на миграцию ряда химических элементов в донных отложениях, они служат достаточно надежной депонирующей средой для выявления периодов интенсивного поступления химических элементов в водоемы.

Характер вертикального распределения элементов-примесей в донных отложениях зависит от большого количества факторов, таких как химические свойства элементов, гидрогеологический режим, климатические и окислительно-восстановительные условия, интенсивность атмосферных выпадений и др.

Как правило, толщина слоя осадка, выпавшего за последнее столетие в озерах, не превышает нескольких десятков сантиметров [7]. Это позволяет при детальном секционном опробовании на сравнительно небольшом интервале разреза проследить характер временной изменчивости поступления в донные отложения большой группы химических элементов, изучить закономерности и оце-

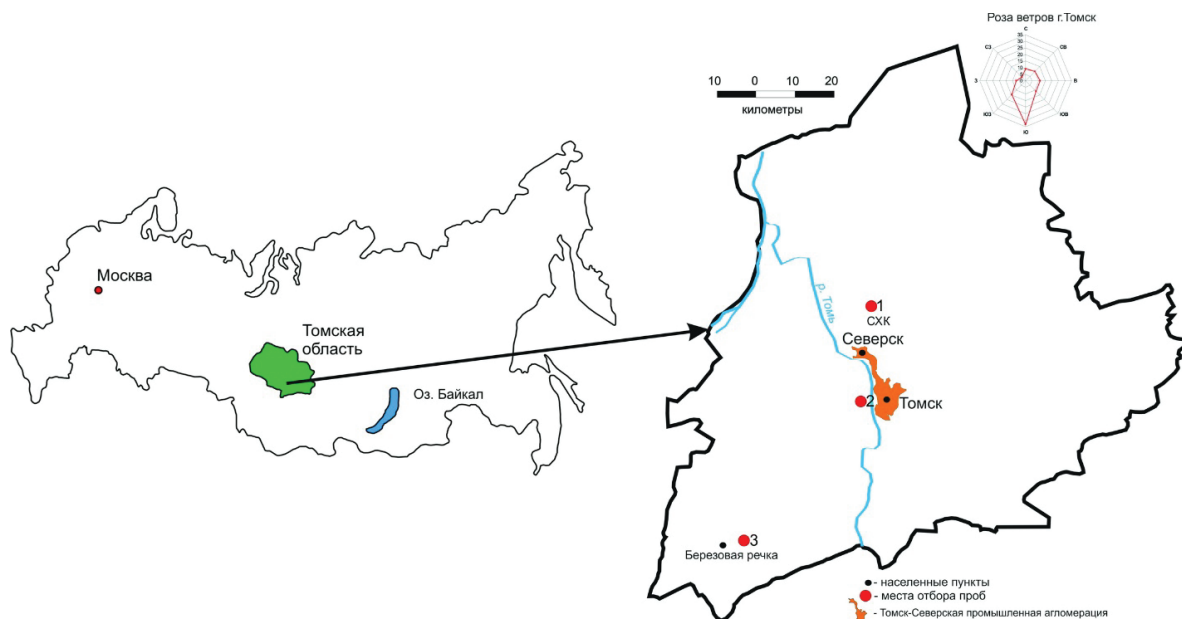
нить природу их накопления. В связи с этим с целью оценки техногенного влияния на территорию юга Томского района был изучен характер вертикального распределения элементов-примесей в донных отложениях в нескольких слабопроточных водоемах: оз. Ларино (оз. Ум), озеро с. Тимирязевское, Черное озеро, находящихся на различном расстоянии от основных источников техногенного воздействия Томск-Северской промышленной агломерации (рис. 1).

Цель работы заключалась в изучении специфики изменения химического элементного состава и в выявлении вероятных источников поступления химических элементов в донные отложения слабопроточных водоемов юга Томской области. Для этого оценивались уровни накопления и исследовались закономерности распределения химических элементов в вертикальном профиле донных отложений.

### **Характеристика объектов исследования**

Исследуемые озера располагаются на территории Томского района (рис. 1). В г. Томске и его округе существует ряд промышленных объектов федерального значения: предприятие госкорпорации «Росатом» Сибирский химический комбинат (СХК), приборный, электротехнический, радиотехнический и другие заводы, а также Томский нефтехимический комбинат (ТНХК). Каждый из





**Рис. 1.** Схема размещения исследуемых озер на территории Томского района (1 – Черное озеро, 2 – оз. в с. Тимирязевское, 3 – оз. Ларино (оз. Ум))

**Fig. 1.** Allocation scheme of the investigated lakes in the territory of Tomsk region (1 – Lake Chyornoe, 2 – the lake in the Timiryazevskoe village, 3 – Lake Larino (Lake Um))

них оказывает характерное воздействие на окружающую среду [8].

Обследованные озера располагаются вдоль основного направления розы ветров на юго-западе и северо-востоке от г. Томска. Водоминеральное питание озер осуществляется грунтовыми водами и в некоторых случаях паводковыми. Все исследуемые озера являются пресными.

Озеро Ларино (оз. Ум) расположено к юго-западу от города Томска на расстоянии 40 км и рассматривается как объект, расположенный в зоне наименьшего влияния Томск-Северской промышленной агломерации. Озеро находится в сосновом бору, размещается среди эоловых (дюнных) песков. Площадь водной поверхности составляет около 10 га (500×200 м), средняя глубина – 3 метра.

Озеро в с. Тимирязевское расположено в пойме р. Томи, в левобережье, непосредственно вблизи крутого яра, ограничивающего пойму. Представляет собой старицу. Залегает среди песчано-галечниковых пойменных отложений. Площадь водной поверхности 0,3 га. Длина озера свыше 150 м, ширина не превышает 20 м.

Черное озеро расположено к северо-востоку от Томска в зоне непосредственного влияния Сибирского химического комбината, на р. Песочке. Площадь водной поверхности 36 га, размеры 450×800 м.

#### Методика исследований

Опробование донных отложений было начато в 2004 г. и выполнялось сотрудниками кафедры геоэкологии и геохимии, а в 2006–2009 гг. – автором статьи. Отбор проб производится с помощью спе-

циального пробоотборника, позволяющего проводить детальное опробование колонки донных отложений. Интервал отбора изменялся от 0,015 до 0,4 м в зависимости от поставленной задачи. В каждом из озер выполнено детальное поинтервальное опробование донных отложений. Пробы высушивались в естественных условиях, удалялись любые включения, после чего растирались и просеивались через сито с диаметром отверстий 1 мм.

Для количественного определения содержания исследуемых химических элементов в донных отложениях применялись современные ядерно-физические методы анализа. В качестве основного метода использовался многоэлементный инструментальный нейтронно-активационный анализ (ИНАА), выполненный в ядерно-геохимической лаборатории кафедры геоэкологии и геохимии (ЯГЛ ГЭГХ) Томского политехнического университета (аналитики А.Ф. Судыко и Л.В. Богутская). Достоверность полученного аналитического материала подтверждается результатами интеркалибровок метода ИНАА по многочисленным стандартным образцам сравнения, в том числе с байкальским илом (БИЛ) (таблица) [9].

Содержание ртути в донных отложениях было определено методом атомной адсорбции на приборе РА-915М с приставкой ПИРО-915+ (аналитик Н.А. Осипова).

Метод определения ртути основан на термической атомизации содержащейся в пробе ртути в приставке ПИРО-915+ и последующем ее определении методом беспламенной атомной абсорбции на анализаторе ртути РА-915М.

**Таблица.** Результаты определения содержания химических элементов в стандартном образце сравнения БИЛ (донные отложения оз. Байкал)

**Table.** Results of estimation of chemical element content in a standard sample of bottom sediments of Lake Baikal

Стандартный образец Standard sample	La	Ce	Nd	Eu	Sm
БИЛ-1	45±6 <sup>(1)</sup>	80±5	39±5	1,4±0,2	7±1
ЯГЛ ТПУ	43,2±0,8 <sup>(2)</sup>	71,1±3,6	38,4±2,2	1,35±0,04	7,0±0,2
Стандартный образец Standard sample	Yb	Lu	Sc	U	Th
БИЛ-1	2,9±0,4	0,40±0,05	13±2	12,0±1,1	12,7±1,3
ЯГЛ ТПУ	2,7±0,10	0,40±0,01	12,6±0,26	11,2±0,7	14,9±2,1

Примечание: <sup>(1)</sup> – паспортные данные; <sup>(2)</sup> – результаты ИНАА.

Note: БИЛ is Baikal silt; ЯГЛ ТПУ is the nuclear geochemical laboratory at Tomsk Polytechnic University; <sup>(1)</sup> are the nameplate data; <sup>(2)</sup> are the results of the INNA.

Определение удельной активности америция проводилось методом  $\alpha$ -спектрометрии по стандартной методике в Институте геологии и минералогии СО РАН (аналитик М.С. Мельгунов) [10].

Определение содержания радиоцезия проводилось на гамма-спектрометрах с колодезными сцинтилляционными кристаллами NaI (Тl) размерами 200×200 и 150×150 мм [11]. Нижний предел определения <sup>137</sup>Cs в этом случае составляет 0,01–0,03 Бк/кг.

<sup>210</sup>Pb анализировался гамма-спектрометрическим инструментальным способом путем регистрации естественной рентгеновской линии 46,5 кэВ на планарном полупроводниковом детекторе с защитой от естественного излучения на основе особо

чистых свинца и вольфрама, из навесок от 10 до 50 г, при строго выдержанной геометрии измерения [12].

### Результаты исследований и их обсуждение

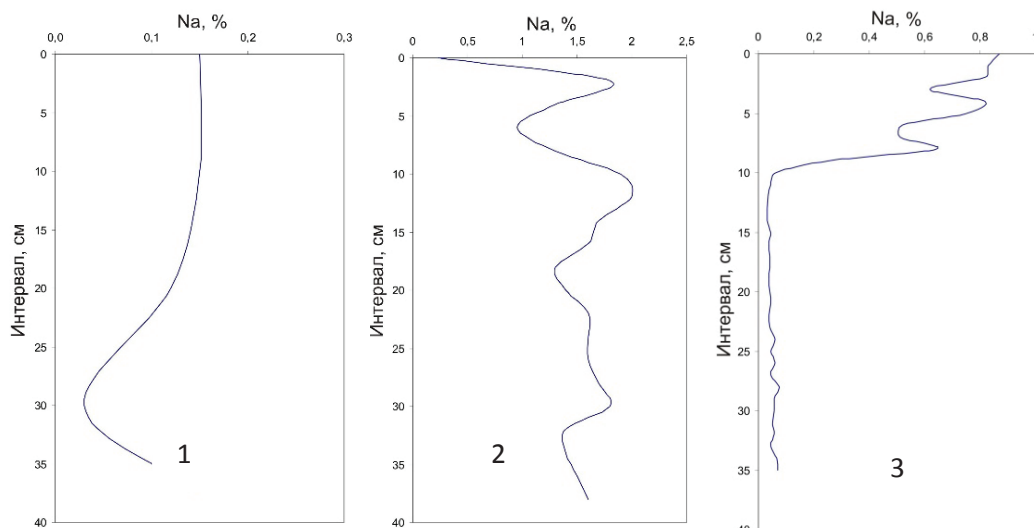
Анализ характера вертикального распределения элементов-примесей в колонке донных отложений Томского района позволил выделить три типа их распределения:

1 – тип нормального распределения, без явно выраженных локальных аномалий. Изменчивость содержания химических элементов здесь обусловлена постепенным (эволюционным) изменением состава донных отложений и преимущественно природными факторами.

2 – тип слабо дифференцированного распределения с проявлением слабовыраженных аномалий в различных частях донных отложений. Может быть обусловлен как природными, так и антропогенными факторами.

3 – тип резко дифференцированного распределения с контрастными аномалиями в верхней части разреза, сформировавшимися под воздействием интенсивного изменения окружающей среды, главным образом под влиянием техногенной нагрузки.

Поинтервальное изменение содержания некоторых микроэлементов в донных отложениях более подробно нами рассмотрено на примере озера Ларино (оз. Ум), принятого в качестве фонового [9], старичного озера в с. Тимирязевское, расположенного в черте г. Томска, и Черного озера, расположенного в зоне влияния Сибирского химического комбината.



**Рис. 2.** Основные типы распределения натрия в донных отложениях: 1 – тип равномерного распределения со слабо проявленными аномалиями (оз. Ларино (оз. Ум)); 2 – тип слабо дифференцированного распределения с проявлением слабовыраженных аномалий в верхней части (оз. в с. Тимирязевское); 3 – тип резко дифференцированного распределения с контрастными аномалиями (Черное озеро)

**Fig. 2.** The basic types of Na distribution in bottom sediments: 1 is the type of equal distribution with weakly shown abnormalities (Lake Larino (Lake Um)); 2 is the type of weakly differentiated distribution with occurrence of mild abnormalities in the upper part (the lake in the Timiryazevskoe village); 3 is the type of rapid differentiated distribution with the contrasting abnormalities (Lake Chyornoe)

Среди исследованных петрогенных химических элементов особого внимания заслуживают Na и Ca, отражающие разные условия накопления донных отложений. Натрий указывает на ведущую роль терригенно-иловых осадков, а кальций – карбонатных сапропелей. Для распределения натрия (рис. 2) в озере Ларино (оз. Ум) характерно постепенное возрастание его содержания от нижнего интервала до глубины 10 см и стабилизация на этом уровне. Так как озеро Ларино (оз. Ум) рассматривается нами как фоновое в отношении техногенного воздействия, то можно заключить, что в последние 50 лет природно-климатические условия сколько-нибудь существенно не изменялись. В озере в с. Тимирязевское отмечено достаточно неравномерное распределение Na с выделением двух пиков накопления в интервалах 3 и 12 см, что может быть обусловлено как антропогенными, так и природными факторами в связи с поступлением различного материала в этот водоем в периоды половодий. В Черном озере (СХК) отмечено ярко выраженное контрастное накопление натрия с интервала 10 см. Очевидно, что с этого времени произошло резкое изменение состава донных отложений.

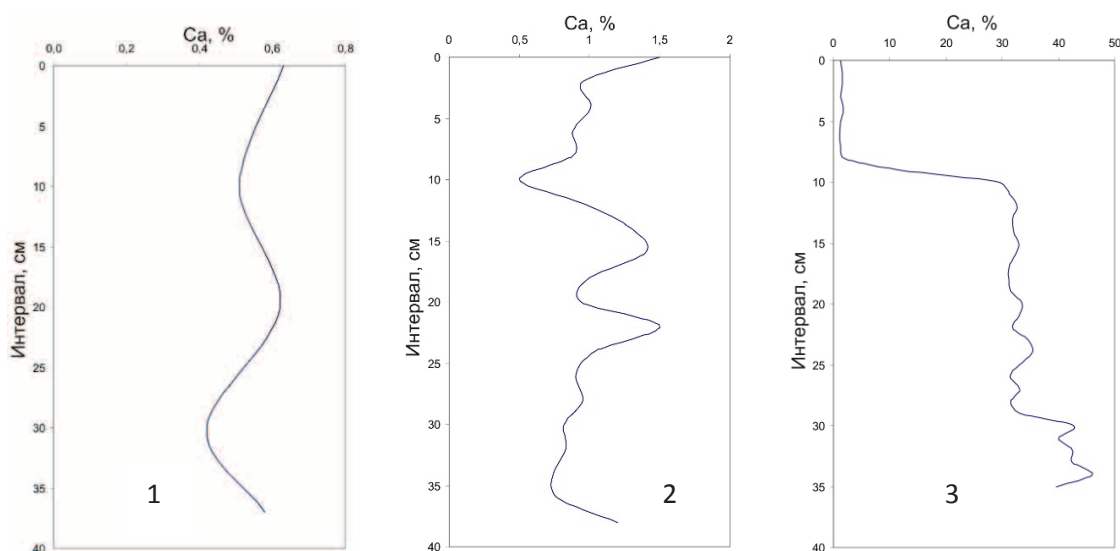
Распределение кальция в разрезе донных отложений отличается от натрия и характеризует смену карбонатных (сапропелевых) отложений иловыми и терригенными и наоборот. В озере Ларино (оз. Ум) оно довольно равномерно, в старичном озере с. Тимирязевское относительно неравномерно, а в Черном озере – резко контрастно. В последнем случае оно уменьшается с 32 % на глубине 10 см (превышение среднего значения в донных отложениях юга Томской области более чем в 17 раз) до

2 % на глубине 0–8 см (рис. 3). В оз. Ум содержание кальция хоть и неравномерное, но изменяется в небольшом пределе – от 0,4 до 0,6 %. В озере с. Тимирязевское накопление тоже неравномерное, небольшие пики приходятся на 15 и 23 см, а с 10 см происходит постепенное его увеличение.

Распределение Fe в большей степени похоже на распределение Na, чем на геохимически близкий к нему кальций, что указывает на терригенную природу его накопления в исследуемых озерах. В Черном озере содержание железа увеличивается в верхней части разреза начиная с 10-сантиметрового интервала, от предела обнаружения элемента до 6 %, при среднем содержании 4,2 %. Аналогичная ситуация и в оз. с. Тимирязевское, где один пик начинается с 10 см, а другой приходится на 17 см (рис. 4).

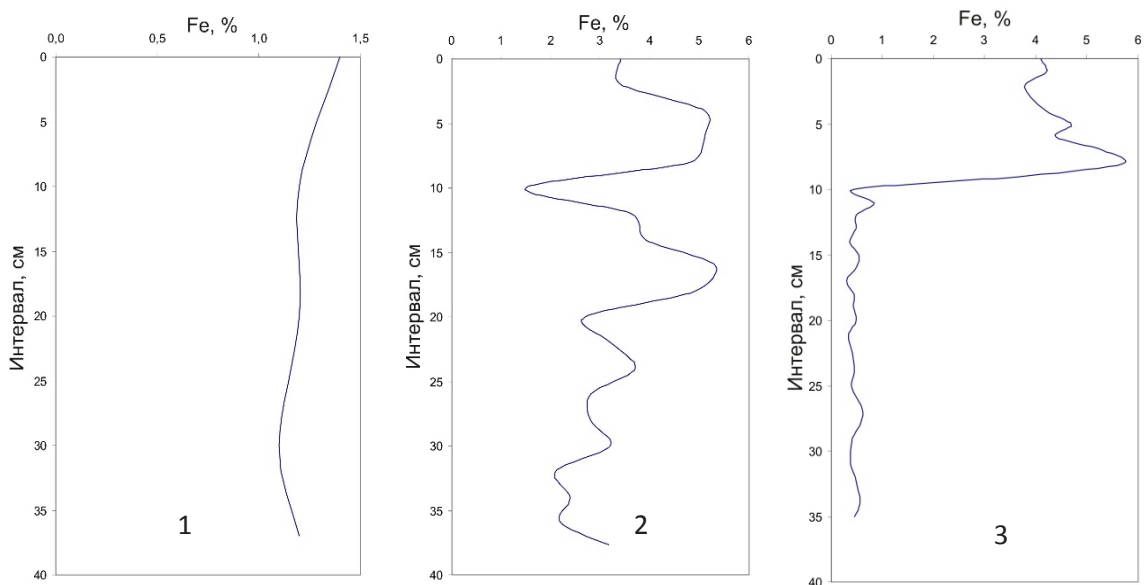
Микроэлементы часто являются более чувствительными, чем макроэлементы, к смене геохимической обстановки и могут более ярко отразить изменение условий накопления донных отложений во времени.

Наиболее близкий тип распределения во всех изученных водоемах показывают элементы-гидролизаты: лантаноиды, Hf, Sc и Th. Вертикальное распределение лантаноидов в донных отложениях озер юга Томской области имеет неравномерный характер. В Черном озере практически во всех рассматриваемых разрезах лантаноиды накапливаются с 10-сантиметрового интервала, что, скорее всего, связано с антропогенной деятельностью, обусловившей смену карбонатно-сапропелевых условий отложения на илито-терригенные (рис. 5–8). В других водоемах роль техногенного фактора отчетливо не просматривается.



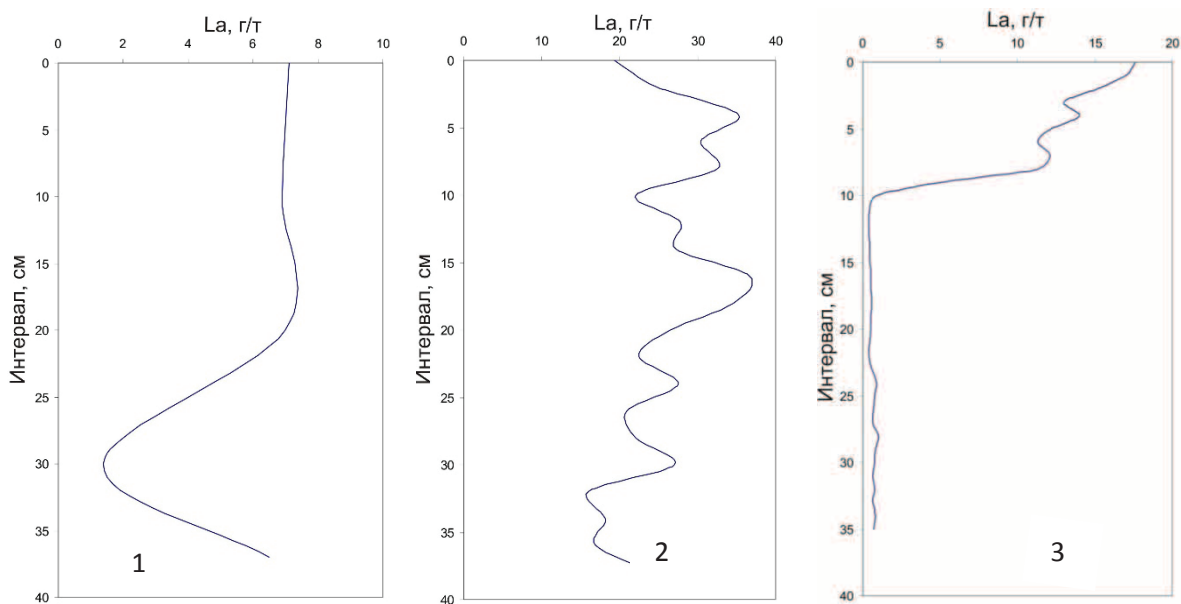
**Рис. 3.** Основные типы распределения кальция в донных отложениях (условные обозначения см. на рис. 2): 1 – оз. Ларино (оз. Ум); 2 – оз. в с. Тимирязевское; 3 – Черное озеро

**Fig. 3.** The basic types of Ca distribution in bottom sediments (see the legend of Fig. 2): 1 is Lake Larino (Lake Um); 2 is the lake in the Timiryazevskoe village; 3 is Lake Chyornoe



**Рис. 4.** Основные типы распределения железа в донных отложениях (условные обозначения см. на рис. 2): 1 – оз. Ларино (оз. Ум); 2 – оз. в с. Тимирязевское; 3 – Черное озеро

**Fig. 4.** The basic types of Fe distribution in bottom sediments (see the legend of Fig. 2): 1 is Lake Larino (Lake Um); 2 is the lake in the Timiryazevskoe village; 3 is Lake Chyornoe



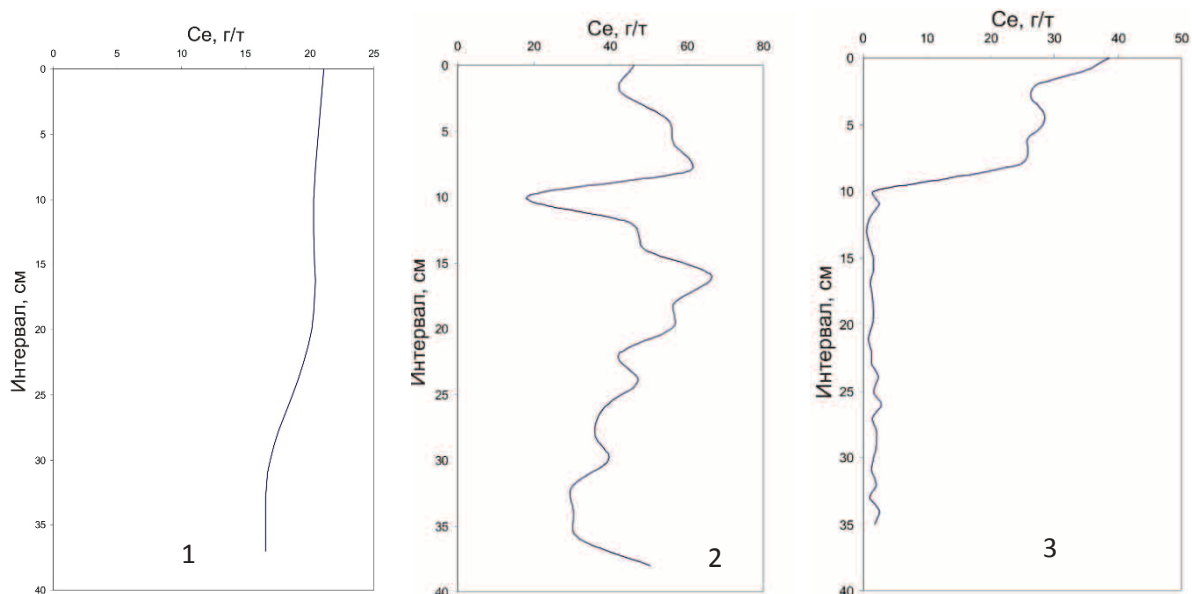
**Рис. 5.** Основные типы распределения лантана в донных отложениях (условные обозначения см. на рис. 2): 1 – оз. Ларино (оз. Ум); 2 – оз. в с. Тимирязевское; 3 – Черное озеро

**Fig. 5.** The basic types of Na distribution in bottom sediments (see the legend of Fig. 2): 1 is Lake Larino (Lake Um); 2 is the lake in the Timiryazevskoe village; 3 is Lake Chyornoe

В целом графики распределения La, Ce, Sm, Yb в каждом исследуемом слабопроточном водоеме схожи (рис. 5–8). Это сходство объясняется поведением лантаноидов в биогеохимических, геохимических и других системах [11, 13].

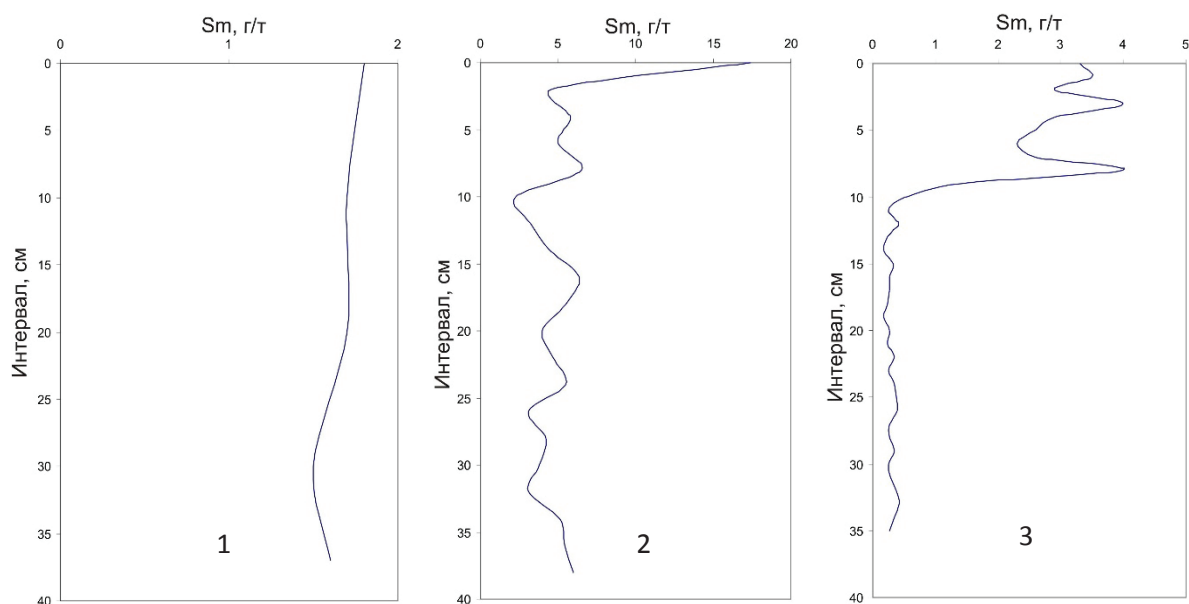
Гафний имеет идентичное распределение с такими элементами, как скандий и железо, во

всех трех изучаемых водоемах (рис. 9). В озере Ларино (оз. Ум) идет очень равномерное накопление гафния. В озере Черном и озере с. Тимирязевское пики увеличения содержания элемента начинаются с 10-сантиметрового интервала. Все содержания гафния находятся на уровне среднего.



**Рис. 6.** Основные типы распределения церия в донных отложениях (условные обозначения см. на рис. 2): 1 – оз. Ларино (оз. Ум); 2 – оз. в с. Тимирязевское; 3 – Черное озеро

**Fig. 6.** The basic types of La distribution in bottom sediments (see the legend of Fig. 2): 1 is Lake Larino (Lake Um); 2 is the lake in the Timiryazevskoe village; 3 is Lake Chyornoe

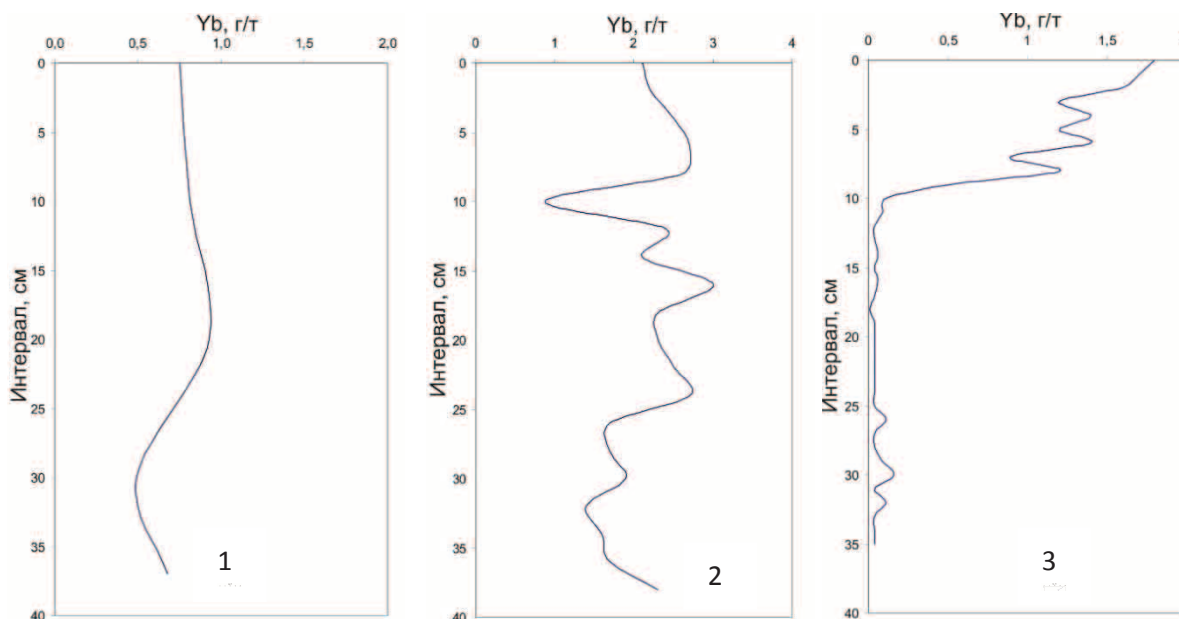


**Рис. 7.** Основные типы распределения самария в донных отложениях (условные обозначения см. на рис. 2): 1 – оз. Ларино (оз. Ум); 2 – оз. в с. Тимирязевское; 3 – Черное озеро

**Fig. 7.** The basic types of Sm distribution in bottom sediments (see the legend of Fig. 2): 1 is Lake Larino (Lake Um); 2 is the lake in the Timiryazevskoe village; 3 is Lake Chyornoe

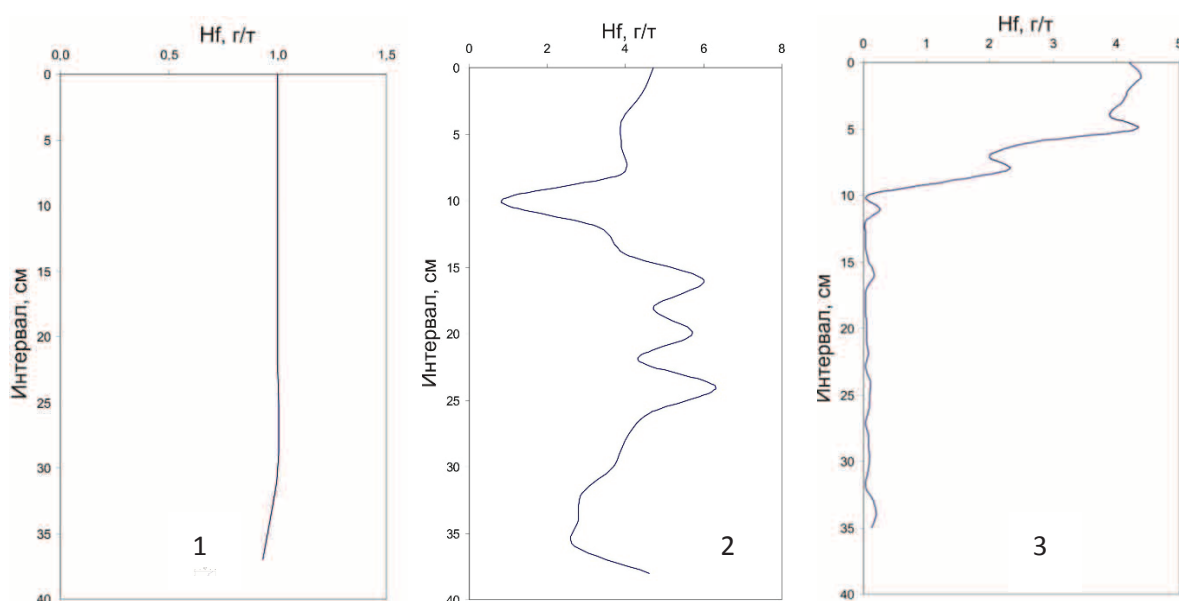
Золото в изученных озерах имеет неоднородный характер распределения, схожий по своему накоплению с основными типами распределения золота в верховых болотах [10, 14]. Самые большие пики золота в озере Черном и озере с. Тимирязевское приходится на верхнюю часть разреза, накопление происходит в 5-сантиметровой зоне. Озеро Ум отличается плавным «зигзагообразным» накоплением элемента (рис. 10).

Распределение тория в исследуемых озерах весьма схоже по структуре накопления со многими другими элементами (Na, Fe, Hf, La, Yb) (рис. 11). В озере Ларино (оз. Ум) наблюдается плавное накопление элемента. В Черном озере и озере с. Тимирязевское отмечается один и тот же интервал повышения содержания элемента, начинающийся с 10 см. А в озере с. Тимирязевское, кроме того, по многим элементам пик приходится на интервал от 15 до 20 см.



**Рис. 8.** Основные типы распределения иттербия в донных отложениях (условные обозначения см. на рис. 2): 1 – оз. Ларино (оз. Ум); 2 – оз. в с. Тимирязевское; 3 – Черное озеро

**Fig. 8.** The basic types of Yb distribution in bottom sediments (see the legend of Fig. 2): 1 is Lake Larino (Lake Um); 2 is the lake in the Timiryazevskoe village; 3 is Lake Chyornoe



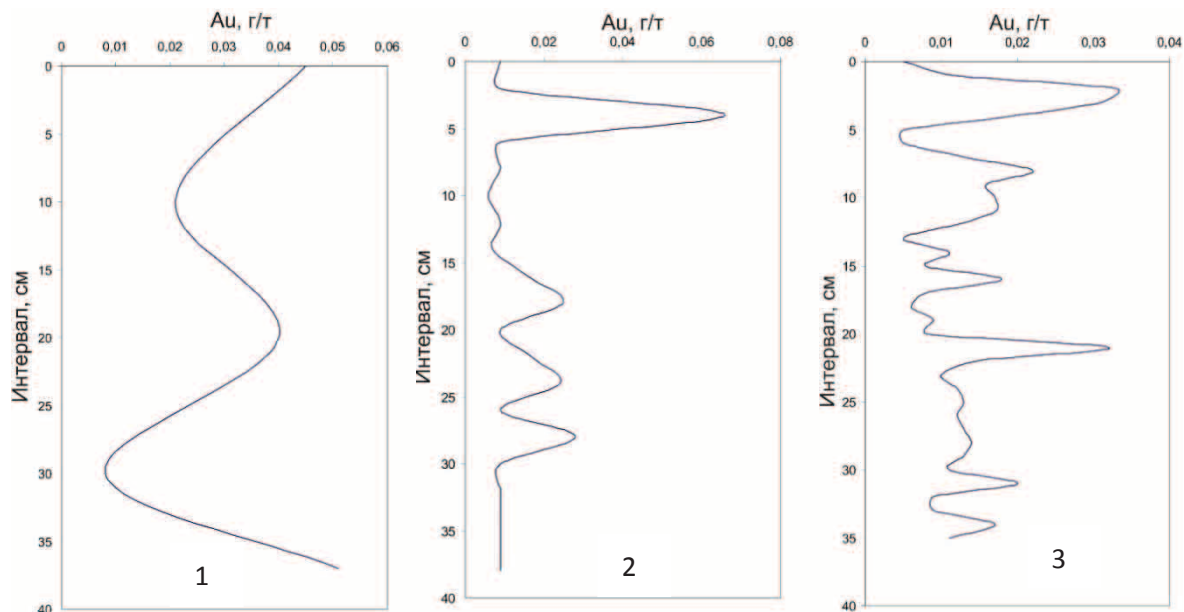
**Рис. 9.** Основные типы распределения гафния в донных отложениях (условные обозначения см. на рис. 2): 1 – оз. Ларино (оз. Ум); 2 – оз. в с. Тимирязевское; 3 – Черное озеро

**Fig. 9.** The basic types of Hf distribution in bottom sediments (see the legend of Fig. 2): 1 is Lake Larino (Lake Um); 2 is the lake in the Timiryazevskoe village; 3 is Lake Chyornoe

Содержание урана в озерах с. Тимирязевское и Черное достаточно неравномерное (рис. 12). Уран озера Черное имеет такую же тенденцию накопления, как и многие другие элементы-гидролизаты: Fe, La, Ce, Sm, Yb, Hf и Th, где пики также начнутся с 10-сантиметрового интервала. Распределение урана в разрезе озера Ум достаточно равномерное.

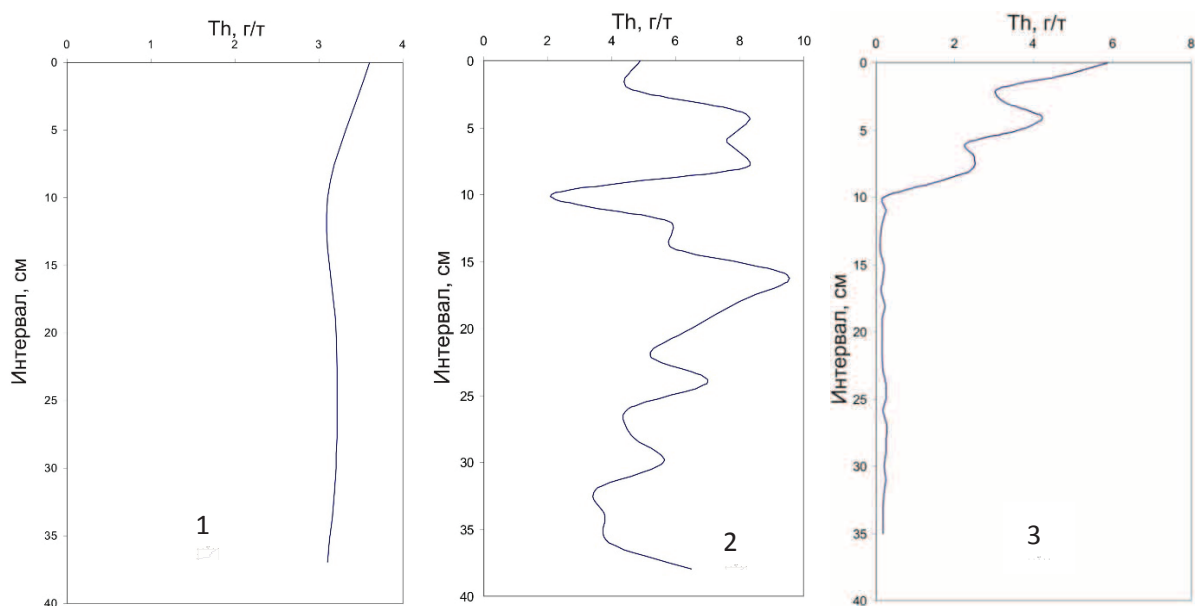
Th/U-отношение в вертикальной колонке донных отложений озера Ларино (оз. Ум) достаточно выдержанное, что указывает на его природный характер.

В озере с. Тимирязевское Th/U имеет резко дифференцированный характер распределения, что, вероятно, связано с природно-климатическими условиями исследуемого водоема, а именно с временными половодьями.



**Рис. 10.** Основные типы распределения золота в донных отложениях (условные обозначения см. на рис. 2): 1 – оз. Ларино (оз. Ум); 2 – оз. в с. Тимирязевское; 3 – Черное озеро

**Fig. 10.** The basic types of Au distribution in bottom sediments (see the legend of Fig. 2): 1 is Lake Larino (Lake Um); 2 is the lake in the Timiryazevskoe village; 3 is Lake Chyornoe



**Рис. 11.** Основные типы распределения тория в донных отложениях (условные обозначения см. на рис. 2): 1 – оз. Ларино (оз. Ум); 2 – оз. в с. Тимирязевское; 3 – Черное озеро

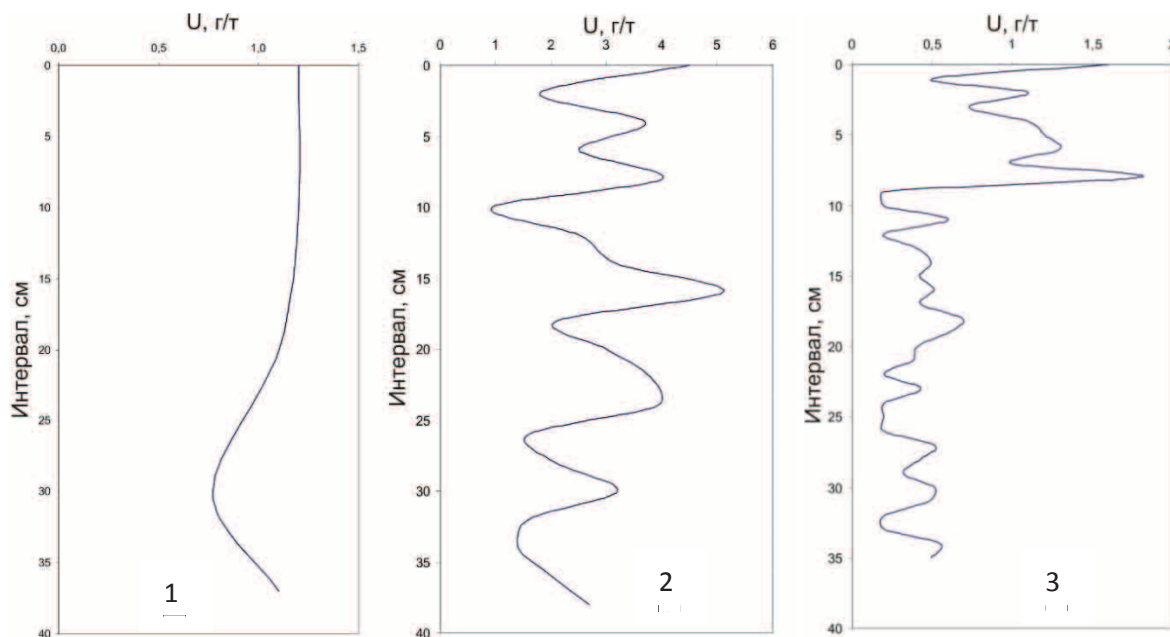
**Fig. 11.** The basic types of Th distribution in bottom sediments (see the legend of Fig. 2): 1 is Lake Larino (Lake Um); 2 is the lake in the Timiryazevskoe village; 3 is Lake Chyornoe

Донные отложения озера Черного в нижней части разреза характеризуются относительно выдержанным Th/U-отношением, а с глубины 10 см сменяются резко дифференцированным распределением (рис. 13). Этот факт согласуется с данными по другим элементам и указывает на изменение условий накопления донных отложений в этот период.

Распределение ртути в колонке донных отложений озера Ларино (оз. Ум) достаточно равномер-

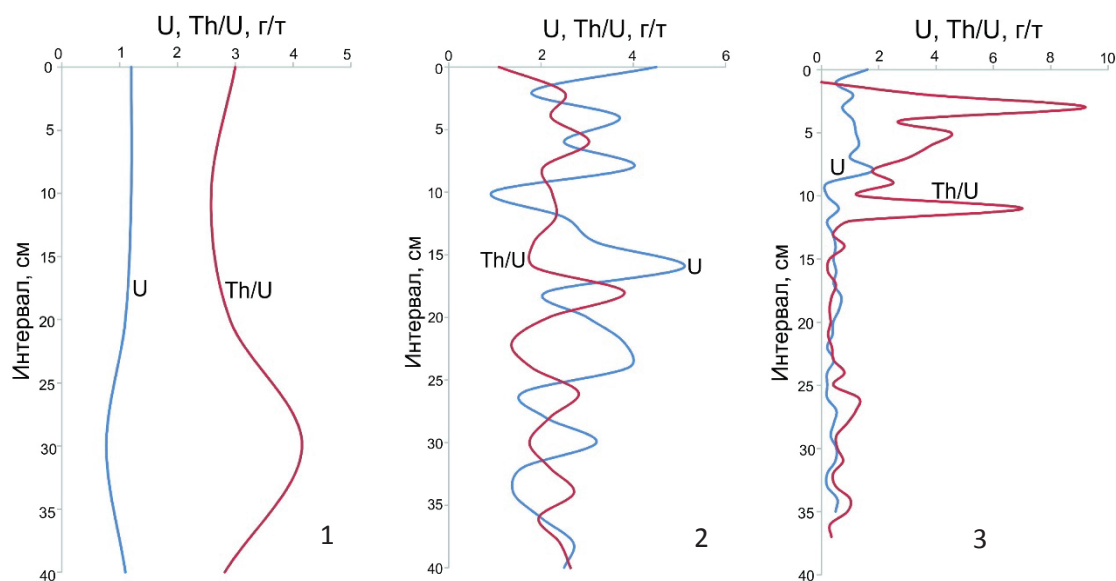
ное, ярко выраженные аномалии не наблюдаются, что указывает на региональный фон.

Озеро, расположенное в селе Тимирязевское, имеет слабовыраженные аномалии в верхней части разреза донных отложений. На появление таких аномалий может влиять как антропогенный, так и природный фактор. Показательно, что в этом интервале содержание ртути последовательно увеличивается из года в год, что отражает общую ди-



**Рис. 12.** Основные типы распределения урана в донных отложениях (условные обозначения см. на рис. 2): 1 – оз. Ларино (оз. Ум); 2 – оз. в с. Тимирязевское; 3 – Черное озеро

**Fig. 12.** The basic types of U distribution in bottom sediments (see the legend of Fig. 2): 1 is Lake Larino (Lake Um); 2 is the lake in the Timiryazevskoe village; 3 is Lake Chyornoe



**Рис. 13.** Th/U-отношение в донных отложениях (условные обозначения см. на рис. 2): 1 – оз. Ларино (оз. Ум); 2 – оз. в с. Тимирязевское; 3 – Черное озеро

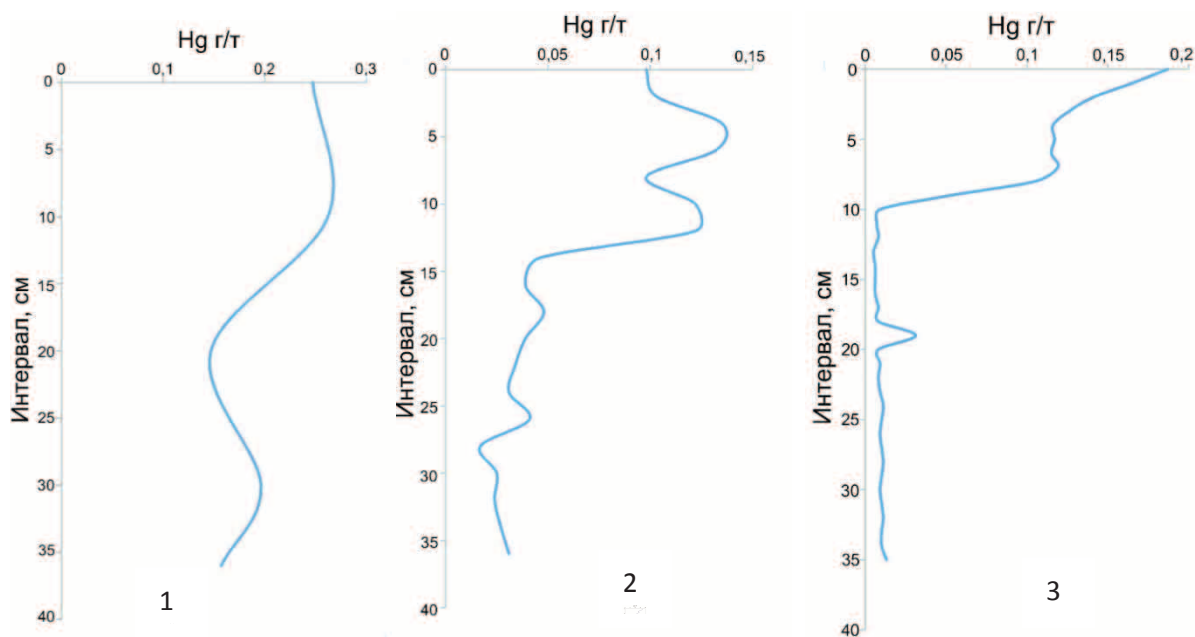
**Fig. 13.** Th/U relation in bottom sediments (see the legend of Fig. 2): 1 is Lake Larino (Lake Um); 2 is the lake in the Timiryazevskoe village; 3 is Lake Chyornoe

намику глобального накопления этого элемента в биосфере [15].

Распределение ртути в озере Черном весьма схоже по структуре накопления со многими другими элементами (Na, Fe, Hf, La, Yb, Th) (рис. 14). Отмечается один и тот же интервал устойчивого возрастания ее концентрации начиная с глубины 10 см.

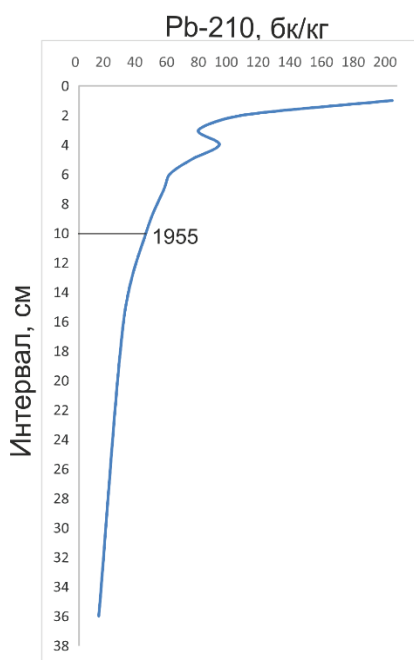
Идентичным характером распределения ртути обладают осадки озера Мичиган (США), расположенного в индустриальном районе, где содержание ртути в вертикальном профиле донных отложений увеличивается от нижнего горизонта к верхнему, от 0,03–0,06 г/т в нижних горизонтах до 0,38 г/т в поверхностном слое [16].





**Рис. 14.** Основные типы распределения ртути в донных отложениях (условные обозначения см. на рис. 2): 1 – оз. Ларино (оз. Ум); 2 – оз. в с. Тимирязевское; 3 – Черное озеро

**Fig. 14.** The basic types of Hg distribution in bottom sediments (see the legend of Fig. 2): 1 is Lake Larino (Lake Um); 2 is the lake in the Timiryazevskoe village; 3 is Lake Chyornoe



**Рис. 15.** Вертикальное распределение концентрации  $^{210}\text{Pb}$  в разрезе донных отложений озера Черное

**Fig. 15.** Vertical distribution of  $^{210}\text{Pb}$  concentration in section of bottom sediments in Lake Chyornoe

Отметим, что накопление не только ртути, но и всех других изученных микроэлементов, а также Na и Fe вверх по разрезу в колонке донных отложений озера Черное начинается с 10-сантиметровой

глубины. Методом датирования с использованием изотопа  $^{210}\text{Pb}$  [17] определен возраст донных отложений оз. Черное. Отметка в 10 сантиметров соответствует 1955 году (рис. 15).

Резкое увеличение содержания всех элементов, кроме Ca, имеющего другую тенденцию накопления, говорит о резкой смене на этом рубеже геохимической обстановки. Эта смена может быть связана с ошеломляющими темпами строительства СХК с 1951 г., с поэтапным введением ТЭЦ СХК, работающей на угольном топливе, в 1953–1961 гг., а также с запуском первого атомного реактора И-1 в 1955 г. [18], оказавших влияние на особенности водно-минерального питания, состав вод и биоту озера Черное. Такие изменения обусловили смену карбонатно-сапропелевых донных отложений терригенно-илистыми.

Аналогичное накопление элементов характерно для пресноводных озер, которые охватывают большую площадь в зоне влияния угольных электростанций в провинции Альберта (Канада). В донных отложениях изученных озер наблюдается существенное повышение содержания ряда токсичных элементов, таких как  $^{210}\text{Pb}$  и Hg, связанное с работой угольных ТЭС начиная с 1956 г. [19].

Об антропогенной природе этих изменений свидетельствует и присутствие в них  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ , накапливающихся в изученной колонке оз. Черное в этот же интервал времени (рис. 16) [20]. Это позволяет предполагать, что причиной техногенной трансформации природной среды является деятельность Сибирского химического комбината.

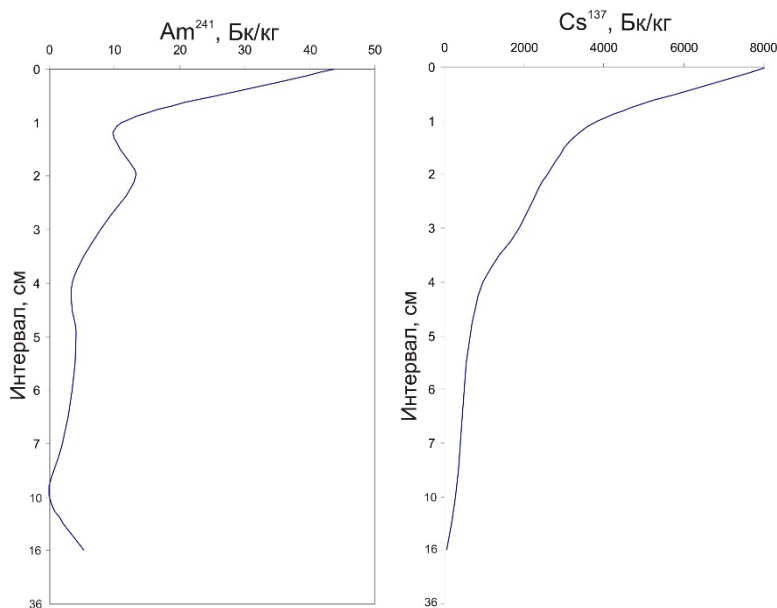


Рис. 16. Вертикальное распределение концентрации  $^{241}\text{Am}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в разрезе донных отложений озера Черное

Fig. 16. Vertical distribution of  $^{241}\text{Am}$  and  $^{137}\text{Cs}$  concentrations in section of bottom sediments in Lake Chyornoe

### Выводы

В вертикальном распределении элементов-примесей в колонке донных отложений слабопроточных водоемов юга Томской области отчетливо выделяется три типа: 1 – тип равномерного распределения со слабо проявленными аномалиями (оз. Ларино (оз. Ум)); 2 – тип слабо дифференцированного распределения с проявлением неконтрастных аномалий в верхней части (оз. в с. Тимирязевское); 3 – тип резко дифференцированного распределения с контрастными аномалиями (Черное озеро). Тип распределения зависит не только от природных условий формирования донных отложений, но и от расположения водоемов относительно источников антропогенного загрязнения.

Озеро Ларино (оз. Ум), расположенное на границе с Томским комплексным заказником республиканского значения, характеризуется минимальным техногенным воздействием, отличающимся от других выбранных озер достаточно выдержанным содержанием элементов в колонке донных отложений. Это указывает на преимущественно кластогенное поступление элементов-примесей в водоем. Причины пониженного их содер-

жания в донных отложениях могут быть связаны и с особенностями питания озерной котловины.

Слабовыраженные аномалии, приходящиеся в основном на верхнюю часть вертикальной колонки донных отложений озера, находящегося в с. Тимирязевское, могут быть связаны как с природными, так и с антропогенными факторами, или с периодическим и неравномерным привнесением загрязняющих веществ в водоем, например в результате половодья.

Озеро Черное, находящееся в непосредственной близости к г. Северску, отличается резкой сменой геохимической обстановки, соответствующей периоду 1950–1960 гг., что приходится на интервал 7–10 см в вертикальной колонке донных отложений. Смену геохимических ассоциаций можно приурочить к строительству Сибирского химического комбината и началу промышленной перестройки г. Томска. Очень схоже ведут себя практически все изученные нами элементы-примеси: As, Ba, Ce, Co, Cr, Cs, Eu, Fe, Hg, Hf, La, Lu, Na, Rb, Sb, Sc, Sm, Ta, Tb, Th, U, Yb, и только Ca имеет другую тенденцию распределения, что указывает на существенное изменение геохимической обстановки в последние полвека.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Страховенко В.Д., Щербов Б.Л., Маликова И.Н. Закономерности распределения микроэлементов в донных отложениях озер Сибири // Тяжелые металлы и радионуклиды в окружающей среде: Матер. IV Междунар. научно-практ. конф. – Семипалатинск, 19–21 октября 2006 г. – Семипалатинск, 2006. – Т. II. – С. 263–269.
2. Изотопная геохимия донных отложений озер Южного Урала для оценки масштабов горнопромышленного техногенеза /
3. В.Н. Удачин, В.В. Дерягин, Р. Китагава, П.Г. Аминов // Вестник Тюменского гос. ун-та. – 2009. – № 3. – С. 144–149.
4. Бобров В.А., Гофман А.М. Лабораторный гамма-спектрометрический анализ естественных радиоактивных элементов (методические разработки). – Новосибирск: Изд-во ИГиГ СО АН СССР, 1971. – 67 с.
5. Закономерности распределения радионуклидов и редкоземельных элементов в донных отложениях озер различных регионов Сибири / В.Д. Страховенко, Б.Л. Щербов, И.Н. Мали-

- кова, Ю.С. Восель // Геологи и геофизики. – 2010. – Т. 51. – С. 1501–1514.
5. Nriagu J.O., Kemp A.L.W., Harper N. Sedimentary record of heavy metal pollution in lake Erie // *Geochim. Cosmochim. Acta.* – 1979. – V. 43. – P. 247–258.
  6. Усенков С.М., Свешников А.Г. Динамические типы дна и загрязнение донных отложений Ладожского озера // Программа «Университеты России». Геология. Ч. 2. М.: МГУ, 1995. – С. 153–158.
  7. Современное распределение естественных радионуклидов и  $^{137}\text{Cs}$  в донных отложениях озер различных регионов Сибири / В.Д. Страховенко, Б.Л. Щербов, И.Н. Маликова, Ю.И. Маликов // Радиоактивность после ядерных взрывов и аварий: Труды Междунар. конф.; под ред. акад. Ю.А. Израэля. – Москва, 5–6 декабря 2005. – СПб.: Гидрометеиздат, 2006. – Т. 2. – С. 310–316.
  8. Рихванов Л.П. Общие и региональные проблемы радиоэкологии. – Томск: Изд-во ТПУ, 1997. – 384 с.
  9. Иванов А.Ю. Уран и торий в донных отложениях непроточных водоемов юга Томской области // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 318. – № 1. – С. 159–165.
  10. Межибор А.М. Экогеохимия элементов-примесей в верховых торфах Томской области: дис. ... канд. геол.-мин. наук. – Томск, 2009. – 153 с.
  11. Иванов В.В. Экологическая геохимия элементов: справочник. В 6 кн. Кн. 6: Редкие f-элементы / под ред. В.К. Буренкова. – М.: Экология, 1997. – 607 с.
  12. Страховенко В.Д. Геохимия донных отложений малых континентальных озер Сибири: дис. ... д-р. геол.-минерал. наук. – Новосибирск, 2011. – 307 с.
  13. Origin and fluxes of atmospheric REE entering an ombrotrophic peat bog in Black Forest (SW Germany): evidence from snow, lichens and mosses / D. Aubert, G. Le Roux, M. Krachler, A. Cheburkin, B. Kober, W. Shotyk, P. Stille // *Geochimica et Cosmochimica Acta.* – 2006. – № 70. – P. 2815–2826.
  14. Anomalous gold contents in brown coals and peat in the south-eastern region of the Western-Siberian platform / S.I. Arbutov, L.P. Rikhvanov, S.G. Maslov, V.S. Arhipov, A.M. Belyaeva // *Int. J. Coal Geol.* – 2006. – V. 68. – № 3–4. – P. 127–134.
  15. Оценка глобального и регионального вклада, а также природной и антропогенной составляющих в общее ртутное загрязнение атмосферы Алтая / С.С. Эйрих, Т.С. Папина, Н.С. Фролова, М. Швиковски // Ртуть в биосфере: эколого-геохимические аспекты: Материалы Международного симпозиума. – Москва, 7–9 сентября 2010 г. – М.: ГЕОХИ РАН, 2010 – С. 162–168.
  16. Environmental studies of mercury and other elements in coal and lake sediments as determined by neutron activation analysis / E.J. Kennedy, R.R. Ruch, H.J. Gluskoter, N.F. Shimp // *Nuclear instruments & methods in physics research section b-beam interactions with materials and atoms.* – Columbia, 1971. – P. 205–215.
  17. Титаева Н.А. Ядерная геохимия. – М.: Изд-во МГУ, 2000. – 336 с.
  18. Сибирский химический комбинат. URL: <http://atom-sib.ru/ru/история-схк> (дата обращения: 05.11.2015).
  19. Sanei H., Goodarzi F., Outridge P.M. Spatial distribution of mercury and other trace elements in recent lake sediments from central Alberta, Canada: an assessment of the regional impact of coal-fired power plants // *Int. J. Coal Geol.* – 2010. – V. 82. – № 1. – P. 105–115.
  20. Радиоактивные элементы в окружающей среде / Л.П. Рихванов, С.И. Арбузов, Н.В. Барановская, А.В. Волостнов, Т.А. Архангельская, А.М. Межибор, В.В. Берчук, Л.В. Жорняк, Ю.Л. Замятина, А.Ю. Иванов, А.В. Таловская, С.С. Шатилова, Е.Г. Язиков // Известия Томского политехнического университета, 2007. – Т. 311. – № 1. – С. 128–136.

Поступила 28.01.2016 г.

UDC 504.4:551.312:556.431(571.16)

## REGULARITIES OF CHEMICAL ELEMENTS DISTRIBUTION IN VERTICAL PROFILE OF BOTTOM SEDIMENTS IN LOW FLOW WATER RESERVOIRS IN TOMSK REGION

Andrey Yu. Ivanov,

National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: Ivanov-13@mail.ru

The relevance of the research is substantiated by the necessity to develop the assessment criteria for the environmental conditions. Bottom sediments accumulate chemical elements incoming to the water reservoirs from natural and anthropogenic sources, and can be an indicator for the anthropogenic change of environment.

**The aim** of the research is to study the change specificity of chemical element composition and to identify possible sources of chemical elements into bottom sediments of low flow water reservoirs in the southern part of Tomsk region.

**Research methods:** detailed small-section testing of bottom sediments in the low flow water reservoirs of different types, instrumental neutron activation analysis (quantitative estimation of 29 chemical elements), atomic absorption method – «cold vapor» method (Hg estimation),  $\alpha$ -spectrometry ( $^{241}\text{Am}$ ) and  $\gamma$ -spectrometry ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ).

**Research findings.** The author has pointed out three types of low flow water reservoirs by the nature of element distribution in the vertical profile of bottom sediments of low flow water reservoirs in Tomsk region. The first one is a type of equal distribution with weakly shown abnormalities (Lake Larino (Lake Um)). This indicates the essentially clastogenic impurity elements income to the waters. The second one is a type of weakly differentiated distribution with occurrence of mild abnormalities in the upper part (the lake in the Timiryazevskoe village), related to circulating and unsteady pollutants income to the water, for example, as a result of flooding. The third type is the one of rapid differentiated distribution with the contrasting abnormalities (Lake Chyornoe), which identify the sharp change of geochemical situation in the period of 1950–1960-s. It shows the 10 cm interval in the vertical core sample of bottom sediments. The geochemical association change can be associated with the development of the Siberian Chemical Combine and with the beginning of industrial restructuring of Tomsk.

### Key words:

Vertical distribution, bottom sediments, low flow waters, impurity elements, environment.

### REFERENCES

1. Strakhovenko V.D., Shcherbov B.L., Malikova I.N. Zakonomernosti raspredeleniya mikroelementov v donnykh otlozheniyakh ozer Sibiri [Laws of distribution of trace elements in sediments of lakes in Siberia]. *Tyazhelye metally i radionuklidy v okruzhayushchey srede: Mater. IV Mezhdunar. nauchno-prakt. konf.* [Heavy metals and radionuclides in the environment. Proc. IV International scientific-practical conference]. Semipalatinsk, 19–21 October 2006. Vol. II, pp. 263–269.
2. Udachin V.N., Deryagin V.V., Kitagava R., Aminov P.G. Izotopnaya geokhimiya donnykh otlozheniy ozer Yuzhnogo Urala dlya otsenki masshtabov gornopromyshlennogo tekhnogeneza [Isotope geochemistry of bottom sediments of lakes of the South Urals to assess the scope of the mining technogenesis]. *Vestn. Tyumenskogo gos. un-ta*, 2009, no. 3, pp. 144–149.
3. Bobrov V.A., Gofman A.M. *Laboratorny gamma-spektrometricheskij analiz estestvennykh radioaktivnykh elementov (metodicheskie razrabotki)* [Laboratory gamma spectrometry analysis of natural radioactive elements (methodical)]. Novosibirsk, IGI SO AN SSSR Press, 1971. 67 p.
4. Strakhovenko V.D., Shcherbov B.L., Malikova I.N., Vosel Yu.S. Zakonomernosti raspredeleniya radionuklidov i redkozemelnykh elementov v donnykh otlozheniyakh ozer razlichnykh regionov Sibiri [Laws of distribution of radionuclides and rare earth elements in sediments of lakes in different regions of Siberia]. *Russian Geology and Geophysics*, 2010, vol. 51, pp. 1501–1514.
5. Nriagu J.O., Kemp A.L.W., Harper N. Sedimentary record of heavy metal pollution in lake Erie. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1979, no. 43, pp. 247–258.
6. Usenkov S.M., Sveshnikov A.G. Dinamicheskie tipy dna i zagryaznenie donnykh otlozheniy Ladozhskogo ozera [Dynamic types of bottom sediments and pollution of Lake Ladoga]. *Programme «Universitety Rossii». Geologiya* [Program «Russian Universities». Geology]. Moscow, MSU Press, 1995. P. 2, pp. 153–158.
7. Strakhovenko V.D., Shcherbov B.L., Malikova I.N., Malikov Yu.I. Sovremennoe raspredelenie estestvennykh radionuklidov i  $^{137}\text{Cs}$  v donnykh otlozheniyakh ozer razlichnykh regionov Sibiri [The current distribution of natural radionuclides and  $^{137}\text{Cs}$  in bottom sediments of lakes in different regions of Siberia]. *Radioaktivnost posle yadernykh vzryvov i avariy. Trudy Mezhdunarodnoy konferentsii* [Radioactivity after Nuclear Explosions and Accidents: Proc. of the Intern. conf.]. Ed. By Yu.A. Izrael. Moscow, 5–6 December 2005. St.-Petersburg, Gidrometeoizdat Publ., 2006. Vol. 2, pp. 310–316.
8. Rikhvanov L.P. *Obschie i regionalnye problemy radioekologii* [General and regional problems of radioecology]. Tomsk, TPU Publ. house, 1997. 384 p.
9. Ivanov A.Yu. Uran i toriy v donnykh otlozheniyakh neprotochnykh vodoemov yuga tomskoy oblasti [Uranium and tory in the sediments of stagnant waters in the south of Tomsk region]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2011, vol. 318, no. 1, pp. 159–165.
10. Mezhibor A. M. *Ekogeokhimiya elementov-primesy v verkhovnykh torfakh Tomskoy oblasti. Dis. Kand. nauk* [Ecogeochemistry of trace elements in peats of Tomsk region. Cand. Diss.]. Tomsk, 2009. 153 p.
11. Ivanov V.V. *Ekologicheskaya geokhimiya elementov. Spravochnik. Kn. 6. Redkie f-elementy* [Environmental Geochemistry of elements. Reference book. B. 6. Rare f-elements]. Ed. by V.K. Burenkov. Moscow, Ekologiya Publ., 1997. 607 p.
12. Strakhovenko V.D. *Geokhimiya donnykh otlozheniy malykh kontinentalnykh ozer Sibiri. Dis. Dokt. nauk* [Geochemistry of sediment in small inland lakes in Siberia. Dr. Diss.]. Novosibirsk, 2011. 307 p.
13. Aubert D., Le Roux G., Krachler M., Cheburkin A., Kober B., Shotyk W., Stille P. Origin and fluxes of atmospheric REE entering an ombrotrophic peat bog in Black Forest (SW Germany): Evidence from snow, lichens and mosses. *Geochimica et Cosmochimica Acta.*, 2006, no. 70, pp. 2815–2826.

14. Arbuzov S.I., Rikhvanov L.P., Maslov S.G., Arkhipov V.S., Belyaeva A.M. Anomalous gold contents in brown coals and peat in the south-eastern region of the Western-Siberian platform. *Int. J. Coal Geol.*, 2006, vol. 68, no. 3–4, pp. 127–134.
15. Eyrikh S.S., Papina T.S., Frolova N.S., Shvikovski M. Otsenka globalnogo i regionalnogo vklada, a takzhe prirodnoy i antropogennoy sostavlyayushchikh v obshchee rtutnoe zagryaznenie atmosfery Altaya [Evaluation of global and regional input, as well as natural and man-made components into overall mercury pollution of Altai atmosphere]. *Rtut v biosfere: ekologo-geokhimicheskie aspekty. Materialy Mezhdunarodnogo simpoziuma* [Mercury in the biosphere: ecological-geochemical aspects. Proce. of the International Symposium]. Moscow, 7–9 September, 2010. Moscow, GEOHI RAN Publ., 2010. pp. 162–168.
16. Kennedy E.J., Ruch R.R., Gluskoter H.J., Shimp N.F. Environmental studies of mercury and other elements in coal and lake sediments as determined by neutron activation analysis. *Nuclear instruments & methods in physics research section b-beam interactions with materials and atoms*. Columbia, 1971. pp. 205–215.
17. Titaeva N.A. *Yadernaya geokhimiya* [Nuclear geochemistry]. Moscow, MSU Press, 2000. 336 p.
18. *Sibirskiy khimicheskiy kombinat* [Siberian Chemical Combine]. Available at: <http://atomsib.ru/ru/istoriya-shk> (accessed 05 November 2015).
19. Sanei H., Goodarzi F., Outridge P.M. Spatial distribution of mercury and other trace elements in recent lake sediments from central Alberta, Canada: an assessment of the regional impact of coal-fired power plants. *Int. J. Coal Geol.*, 2010, vol. 82, no. 1, pp. 105–115.
20. Rikhvanov L.P., Arbuzov S.I., Baranovskaya N.V., Volostnov A.V., Arkhangelskaya T.A., Mezhibor A.M., Berchuk V.V., Zhornyak L.V., Zamyatina Yu.L., Ivanov A.Yu., Talovskaya A.V., Shatilova S.S., Yazikov E.G. Radioaktivnyye elementy v okruzhayushey srede [Radioactive elements in the environment]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2007, vol. 311, no. 1, p. 128–136.

Received: 28 January 2016.

УДК 658.382.3

## ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТОК ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ГОРНОШАХТНОГО И НЕФТЕПРОМЫСЛОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ

**Смирнов Геннадий Васильевич,**

доктор технических наук, профессор, директор Научно-исследовательского института электронного технологического оборудования и средств связи Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, Россия, 634045, г. Томск пр. Ленина, 40.  
E-mail: smirnov@main.tusur.ru

**Смирнов Дмитрий Геннадьевич,**

кандидат технических наук, старший научный сотрудник Научно-исследовательского института электронного технологического оборудования и средств связи Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, Россия, 634045, г. Томск пр. Ленина, 40. E-mail: smirnov@main.tusur.ru

**Актуальность работы** связана с тем, что в настоящее время технологические процессы разведки, добычи, транспортировки георесурсов в нефтедобывающей, горнорудной, угольной, химической и других отраслях промышленности подвержены высокому уровню механизации и автоматизации с участием электрических машин. Надежность и безотказность работы этих машин зависят от состояния витковой изоляции, роль которой играет эмалевая изоляция обмоточных проводов, поэтому совершенствование контроля эмалевой изоляции обмоточных проводов, повышение их качества и надежности является весьма актуальным.

**Цель работы:** изучение физических процессов в первичном преобразователе дефектов в эмалевой изоляции для обоснования выбора конструкции указанного преобразователя, оценки и оптимизации его метрологических характеристик.

**Методы исследования:** осциллографический – для исследования характеристик зажигающегося между датчиком и проводом в месте дефекта разряда в воздухе; микрометры – для определения геометрических размеров дефектов в эмалевой изоляции и расстояния от датчика до границы дефектного участка; высоковольтные – для исследования характеристик разряда и его вида в промежутке между датчиком и жилой провода в дефектных местах эмаль-изоляции.

**Результаты.** Несмотря на значительный прогресс развития электромашиностроения в области совершенствования изоляции обмоток электрических машин, контроль дефектности изоляции на всех стадиях жизненного цикла по-прежнему остаётся актуальной научно-технической проблемой. Исследованы особенности разряда в первичном преобразователе дефектов при подходе к нему дефектного участка провода, при нахождении дефектного участка в зоне датчика и при выходе указанного участка из датчика. Приведены типичные осциллограммы тока и напряжения с первичного преобразователя дефектов при прохождении через него дефектного участка изоляции провода. Проведен анализ структуры сигналов, и рассмотрен возможный механизм и вид разряда в датчике. Выделены информационные зоны из структуры сигнала с первичного преобразователя. Рассмотрены варианты и способы снижения погрешности при контроле количества и протяженности дефектов. Разработан способ контроля дефектности эмалевой изоляции проводов, позволяющий определять количество и протяженность дефектных участков в эмаль-изоляции движущегося с любыми переменными скоростями провода. Предложена схема измерителя дефектности, рассмотрен принцип его работы, и проведена оценка его метрологических характеристик.

### **Ключевые слова:**

Эмалевая изоляция, дефект, датчик дефектов, коронный разряд, искровой разряд, напряжение, ток разряда, импульс с дефекта, осциллограмма.

### **Введение**

Эмалированные провода находят широкое применение в изделиях горнодобывающей, нефтедобывающей, электротехнической и электронной промышленности, для изготовления обмоток электрических машин, трансформаторов, драйверов жёстких дисков компьютеров, в современных источниках питания, коммутирующих элементах и источниках электрического тока [1].

Готовые эмалированные провода проходят многочисленные лабораторные испытания [2]. Слой изоляции на проводах не является идеально однородным. Существуют небольшие дефекты, трещины и микроотверстия, которые делают возможным

контакт окружающей атмосферы и металлической жилы. Дефектность изоляции обмоточных проводов является основной причиной отказа обмоток электрических машин [3], поэтому необходимо осуществлять контроль дефектности проводов не только на стадии их производства, но и в процессе изготовления из них намоточных изделий [4].

В настоящее время для контроля дефектности эмалевой изоляции проводов используют ГОСТ ИЕС 60851–5–2011 [5]. Указанный ГОСТ полностью идентичен международному стандарту [6] с учетом внесённых в него изменений Amd1:1997 и Amd 2:2004. В соответствии с этим документом целостность изоляции выражается числом точечных

повреждений на проводе определенной длины, зафиксированных с помощью электрического испытательного устройства. Для контроля точечных повреждений изоляции проводов используют датчик с высоким напряжением.

Недостатком является, во-первых, малая универсальность датчика, так как для проводов с диаметром жилы, лежащим в диапазоне от 0,050 до 0,25 мм, используют электрод-датчик, выполненный в виде двух роликов, и контролируемый провод протягивается через 4 ролика, два из которых являются направляющими, а два других – электродами датчика. Для проводов с диаметром, лежащим в диапазоне от 0,25 до 1,600 мм, этот датчик уже не применим, и взамен него используют один высоковольтный электрод большего диаметра.

Во-вторых, как при контроле проводов с диаметром жил, лежащим в диапазоне от 0,050 до 0,25 мм, так и при контроле проводов с диаметром 0,25 до 1,600 мм провод многократно перегибается. Это приводит к высокому механическому нагружению на изоляцию провода со стороны роликов, что вызывает не только ослабление механической и электрической прочности изоляции контролируемого провода, но и приводит к появлению в изоляции дополнительных дефектов. Поэтому при помощи датчика, используемого в [5], осуществляют только выборочный контроль при постоянной и относительно малой скорости протягивания провода, равной  $(275 \pm 25)$  мм/с.

В-третьих, рассмотренные выше способы контроля дефектности не позволяют определять протяженность дефектов, которая является не менее важной характеристикой поврежденности изоляции, чем количество дефектов [7].

Указанные недостатки стимулировали поиск более универсальных и точных способов и устройств контроля дефектности изоляции проводов.

#### Экспериментальная часть

Для того чтобы разработать способ, который бы позволял в широком диапазоне скоростей движения провода через первичный преобразователь определять не только количество дефектов на изоляции провода, но и их протяженность, необходимо выбрать приемлемый для этих целей малоинерционный чувствительный датчик дефектов.

Для решения стоящей задачи в качестве датчика дефектов целесообразно было выбрать датчик, основанный на зажигании газового разряда, возникающего между датчиком и жилой провода в дефектном участке изоляции [8].

При приближении к датчику дефектного участка эмалевого изоляции, расположенного на движущемся проводе, условия в области, расположенной между дефектом и датчиком, могут динамически изменяться. Эти изменения могут быть обусловлены многими разнообразными факторами: переменными скоростями сближения дефекта с датчиком, непрерывно изменяющимся расстоянием между

датчиком и жилой провода в дефектном участке эмаль-изоляции, поперечными колебаниями провода относительно датчика, изменениями температуры, влажности и состава атмосферы вокруг движущегося датчика и т. д. Все это может приводить к тому, что между дефектом и датчиком может загораться тот или иной вид разряда из тех видов разрядов, которые могут быть реализованы в воздухе при атмосферном давлении. Такими разрядами могут быть коронный, кистевой, искровой, тлеющий и дуговой [9, 10].

Одной из разновидностей газового разряда, который может загораться между жилой провода в месте дефекта и датчиком дефектов, является коронный разряд [11]. Коронный разряд может развиваться только в случае резко неоднородного поля в области одного или обоих электродов воздушного промежутка. От остальных видов самостоятельных разрядов коронный разряд существенно отличается тем, что сила тока в нём обусловлена не сопротивлением внешней цепи, а ограниченной проводимостью внешней области разряда [12]. Ток коронного разряда имеет импульсный характер, частота импульсов зависит от внешних условий и от распределения напряженности электрического поля в разрядном промежутке. Следует ожидать, что по мере приближения и удаления дефектного участка из зоны действия первичного преобразователя дефектов ввиду неизбежных поперечных колебаний провода и иных причин, указанных выше, коронный разряд может оказаться нестабильным. В зоне нестабильности разряд может погасать на некоторое время, а затем загораться вновь. Коронный разряд появляется при определенном «начальном напряжении» между электродами. Дальнейшее увеличение разности потенциалов между электродами приводит к увеличению области коронирования, к нарастанию силы тока и яркости свечения коронного разряда. Затем, при определенной разности потенциалов, иногда значительно превышающей начальное напряжение, коронный разряд переходит в искровой. При уменьшении расстояния воздушного промежутка между коронирующим и не коронирующим электродами напряжение короны уменьшается, при этом уменьшается и напряжение зажигания искрового разряда. Однако напряжение зажигания искрового разряда уменьшается значительно быстрее, чем напряжение зажигания короны. При некотором критическом расстоянии между электродами корона не появляется, а сразу происходит искровой пробой воздушного промежутка [12], который, так же как и коронный разряд, носит импульсный характер.

При перемещении дефекта в сторону датчика дефектов расстояние между ними уменьшается и за счёт этого напряженность поля в месте дефекта нарастает. При некотором критическом расстоянии между датчиком и дефектом и равенстве контрольного напряжения на датчике начальному напряжению зажигания короны, в области дефекта

происходит заметное искажение электрического поля и зажигается коронный разряд. Напряжение зажигания разряда в воздухе можно рассчитать, используя таунсендовский критерий перехода несамоостоятельного разряда в самостоятельный [12]:

$$v(E) \left\{ \exp \left[ \int_0^x \alpha_{эфф}(x) dx \right] - 1 \right\} \geq 1, \quad (1)$$

где  $v(E)$  – коэффициент вторичной ионизации, учитывающий все возможные процессы образования вторичных электронов, каким бы механизмом они не вызывались;  $E$  – напряженность электрического поля вдоль силовых линий;  $\alpha_{эфф}(x) = \alpha(x) - \eta(x)$  – эффективный коэффициент ударной ионизации;  $\alpha(x)$  – коэффициент ударной ионизации, характеризующий число новых электронов, создаваемых первичным электроном при прохождении 1 см пути в направлении поля;  $\eta(x)$  – коэффициент прилипания, зависящий от напряженности электрического поля, сорта и давления газа.

Критерий (1) позволяет определять начальное напряжение зажигания разряда вне зависимости от того, по какому механизму разряд будет развиваться: лавинному или стримерному.

Для определения начального напряжения зажигания разряда, кроме значений параметров, входящих в критерий (1), необходимо знать распределение напряженности электрического поля вдоль силовых линий. В большинстве случаев указанная напряженность не выражается аналитическими функциями и может быть определена только с помощью численных методов [13]. В нашем случае расчет распределения напряженности электрического поля вдоль силовых линий, при постоянно изменяющихся расстояниях между дефектом и датчиком, вызывает значительные трудности. Поэтому для решения указанной задачи на-

иболее приемлемым является путь эмпирического исследования влияния различных факторов на характеристики и стабильность разряда в области дефекта.

При проведении исследования характеристик информационного сигнала с первичного преобразователя применялся осциллографический метод с использованием двухканального цифрового осциллографа С9–8. При этом на одном канале снимались осциллограммы напряжения на датчике, а на другом – осциллограммы тока разряда. Схема экспериментальной установки по исследованию характеристик разряда в области датчика дефектов, при прохождении через него дефектного участка эмалированной изоляции, приведена на рис. 1.

Все сопротивления внешней цепи разрядного промежутка сосредоточены в сопротивлении  $R1$ . В емкости  $C$  сосредоточена емкость соединительных кабелей и дополнительная емкость, которую можно было изменять в экспериментах. Напряжение  $U$  из высоковольтного источника 1 через сопротивление  $R1$  подается на ролик датчика (рис. 1). Через сопротивления делителя  $R2$  и  $R3$  напряжение с ролика подается на вход 1-го канала осциллографа. На вход 2-го канала подается сигнал разрядного тока, снимаемого с сопротивления  $R4$ .

В данной схеме величина зарядного сопротивления  $R_{зар} = R1 + R2 + R3$ , а величина разрядного сопротивления  $R_{раз} = r(t) + R4$ , где  $r(t)$  – непрерывно изменяющееся сопротивление промежутка между датчиком и дефектом.

Методика определения напряжения зажигания разряда в зависимости от расстояния между дефектом и точкой соприкосновения датчика с эмалированной изоляцией заключалась в следующем. Через датчик, представляющий собой сменный ролик, протягивали заземленный эмалированный провод с нанесенным по окружности дефектом протяжен-

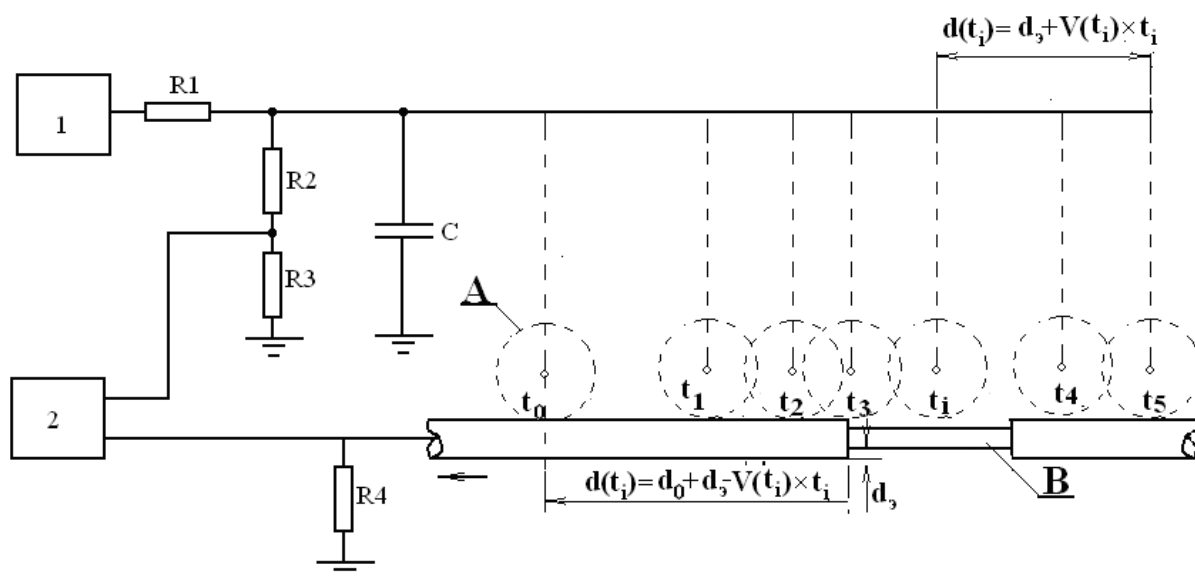
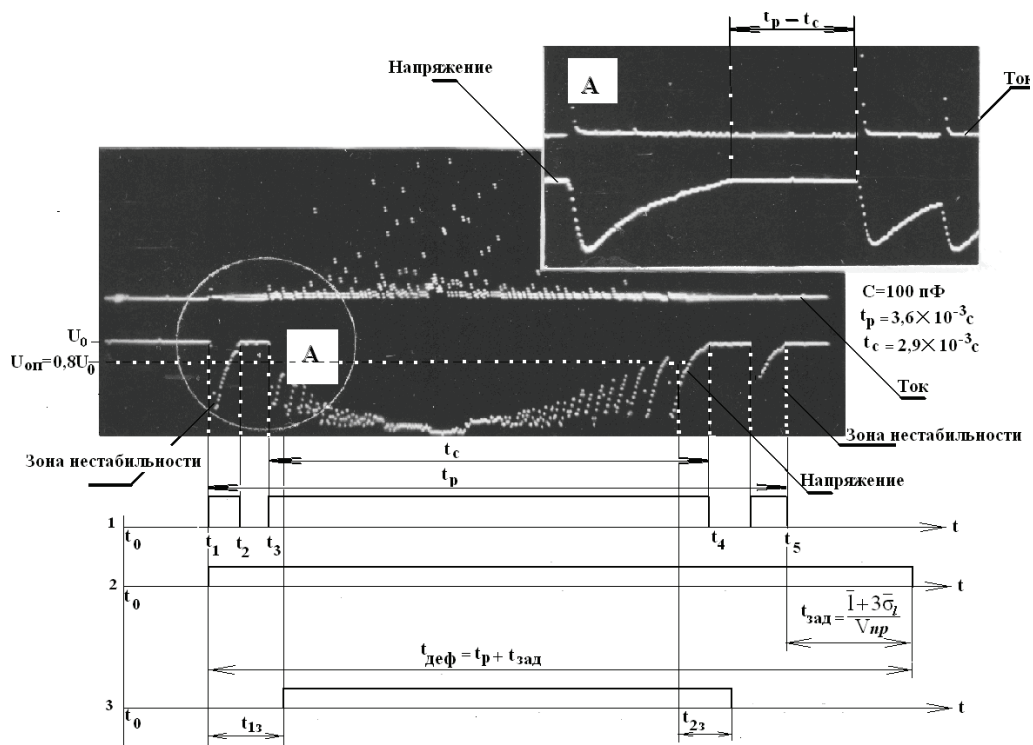


Рис. 1. Схема экспериментальной установки по исследованию характеристик разряда в области датчика дефектов

Fig. 1. Scheme of the experimental setup for studying discharge characteristics in the area of a defect sensor





**Рис. 2.** Осциллограмма и эпюры сигнала с первичного преобразователя:  $t_p$  – время горения разряда при прохождении в зоне действия первичного преобразователя одного дефекта от момента зажигания разряда до момента его погасания;  $t_c$  – время стабильного горения разряда при прохождении через первичный преобразователь одного дефекта

**Fig. 2.** Oscillograms and diagrams of the signal from a primary converter:  $t_p$  is the time of discharge burning when passing within the range of activity of one defect primary converter from the moment of the discharge ignition until its extinction;  $t_c$  is the time of discharge stable burning when passing through the primary converter of one defect

ностью 0,5 мм. Диаметры роликов в экспериментах можно было изменять. Переднюю границу дефекта устанавливали на расстоянии 10 мм от оси датчика и с шагом 0,5 мм перемещали провод под датчиком с помощью микрометра. После каждого перемещения провода на величину 0,5 мм на датчик с высоковольтного источника через токоограничивающее сопротивление  $R1$  подавалось линейно возрастающее со скоростью 500 В/с напряжение и фиксировались значения напряжений, при которых происходил разряд между датчиком и жилой провода в дефектном участке изоляции. После каждого передвижения производилось по 40 измерений при положительной и отрицательной полярностей напряжений на ролике датчика.

Процесс формирования информационного сигнала с первичного преобразователя при прохождении дефектного участка изоляции в зоне датчика дефектов можно пояснить с помощью осциллограммы и эпюр, представленных на рис. 2.

Величина  $t_p$  характеризует длительность времени между фронтами сигнала на уровне  $(0,7-0,9)U_0$ ;  $U_0$  – амплитудное значение сигнала.

Время  $t_p$  включает в себя время перехода коронного разряда в искровой при приближении дефекта к первичному преобразователю, и искрового в коронный – при удалении дефекта от первичного преобразователя, а также время  $t_c$  стационарного горения искрового разряда.

При движении дефекта, имеющегося в изоляции обмоточного провода, происходит непрерывное изменение расстояния между дефектом и первичным преобразователем дефектов. Если это расстояние между точкой соприкосновения датчика с поверхностью контролируемого провода и передней границей движущегося вместе с проводом дефекта в некоторый момент времени  $t_0$  обозначить через  $d_0$ , то при сближении дефекта с датчиком указанное расстояние будет изменяться по закону

$$d(t) = d_0 + d_0 - v_l(t)t,$$

где  $d(t)$  – расстояние между дефектом и датчиком точечных повреждений в любой момент времени их сближения;  $d_0$  – толщина эмалевой изоляции;  $v_l(t)$  – скорость движения провода;  $t$  – время.

Расстояние  $d(t)$  в пределе стремится к некоторому минимальному значению  $d_{\min} \leq d_0$ . После достижения между дефектом и датчиком минимального расстояния  $d_{\min}$  дефект начинает выходить из зоны датчика и расстояние между ними увеличивается по закону

$$d(t) = d_{\min} + v_l(t)t.$$

В общем случае при подаче напряжения  $U_0$  на датчик точечных повреждений относительно заземленного провода поле в промежутке между дефектом А и датчиком В (рис. 1) будет неоднородным. Поэтому зазор между дефектом А и датчиком В можно представить в виде изменяющегося во

времени воздушного промежутка, образованного между двумя криволинейными электродами, одним из которых является жила провода в дефектном участке эмалевой изоляции (электрод А на рис. 1), а другим – датчик (электрод В на рис. 1).

При достаточно большом расстоянии между электродами (рис. 1, интервал времени  $t_0-t_1$ ) на выходе датчика точечных повреждений находится постоянное напряжение  $U_0$ . По мере приближения электрода А к электроду В напряженность электрического поля на электродах А и В и в промежутке между ними возрастает. При некотором положении электрода А напряженность поля в зазоре и на электродах становится достаточно высокой и начинают образовываться электронные лавины, приводящие к протеканию в указанном промежутке тока. Величину этого тока, в общем случае, можно определить, используя введенные Таунсендом коэффициенты  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$ , по выражению [12]

$$i = i_0 \frac{(\alpha - \beta) \exp(\alpha - \beta)d(t)}{\alpha(1 + \gamma) - (\alpha + \beta) \exp(\alpha - \beta)d(t)},$$

где  $i_0 = ln_0$  – начальный ток в промежутке;  $l$  – заряд электрона;  $n_0$  – исходное количество электронов в области катода, вызванное внешним ионизатором;  $\alpha$  – коэффициент объемной ионизации газа электронами;  $\beta$  – коэффициент ионизации положительными ионами;  $\gamma$  – коэффициент поверхностной ионизации на катоде.

Протекание через зазор АВ тока эквивалентно тому, что внутреннее сопротивление этого зазора  $r(t)$  изменяется. По мере дальнейшего сближения электродов А и В происходит дальнейшее возрастание напряженности электрического поля в зазоре, а следовательно, и коэффициентов  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$ , которые от нее зависят. Это приводит к еще большему падению сопротивления  $r(t)$ . Пусть в некоторый момент времени  $t_1$  сопротивление зазора достигло такого значения  $r(t_1)$ , при котором выполняется неравенство

$$R_4 + r(t_1) < R_{\text{зар}}. \quad (2)$$

При выполнении неравенства (2) емкость  $C$  начинает разряжаться через разрядный промежуток, что приводит к изменению напряжения на выходе датчика точечных повреждений по закону, определяемому из выражения

$$\frac{dU}{dt} = \left( - \frac{U}{[R_4 + r(t)]C} \right), \quad (3)$$

где  $C$  – емкость, через которую осуществляется питание датчика.

Решив уравнение (3), получим

$$U = U_0 \exp\left( - \frac{t - t_1}{[R_4 + r(t)]C} \right).$$

По мере разрядки емкости  $C$  напряжение на промежутке падает, следовательно, в нем снижается и напряженность поля. При достижении в момент времени  $t_1$  некоторого значения напряжения  $U_1$  (рис. 2) процесс лавинообразования в промежут-

ке АВ прекращается и сопротивление  $r(t)$  разрядного промежутка резко увеличивается. Это приводит к зарядке емкости  $C$  и к нарастанию на выходе датчика напряжения по закону

$$U = U_0(1 - e^{-t/R_{\text{зар}}}).$$

Процесс нарастания напряжения на датчике точечных повреждений может оборваться в некоторый момент времени  $t_2$ , а затем в момент времени  $t_3$  зажегся снова. Такой колебательный процесс будет продолжаться в течение некоторого времени ( $t_1-t_3$ ).

Образование лавин в интервале времен ( $t_0-t_3$ ) носит неустойчивый характер, что зависит от множества разнообразных факторов (наличия свободных электронов в промежутке, созданных радиационным излучением, поперечных колебаний провода относительно датчика, наличия загрязнений на дефекте и т. д.). В силу этих факторов колебательный процесс в датчике может в любой момент времени оборваться, а затем, спустя некоторое время, начаться снова. Таких колебательных неустойчивых зон при перемещении дефекта к датчику может быть несколько. Их количество статистически изменяется от дефекта к дефекту и зависит, помимо прочих факторов, от скорости движения провода. При медленном движении провода таких зон обычно больше, чем при его более быстром движении. При достаточно высоких скоростях движения провода неустойчивый процесс может плавно, без разрывов во времени, перейти в более устойчивый колебательный процесс, а разряд – в самостоятельный. Назовем зону несамостоятельного разряда «зоной нестабильности» и поведение сигнала с датчика в этой зоне проанализируем ниже.

Рассмотрим переход несамостоятельного разряда в самостоятельный разряд.

При дальнейшем движении электрода А (рис. 1) в некоторый момент времени  $t_3$  напряженность поля в зазоре достигнет некоторого критического значения и зажжется самостоятельный разряд. Условия самостоятельности разряда, в соответствии с [12], можно записать в виде

$$\mu = \gamma[\exp(\alpha d(t)) - 1] = 1,$$

где  $d(t)$  – расстояние между дефектом и датчиком в момент времени  $t_i$ .

При зажигании в промежутке самостоятельного разряда сигнал на выходе датчика точечных повреждений вновь будет носить колебательный характер, причем амплитуда, до которой будет периодически заряжаться конденсатор  $C$ , со временем будет снижаться.

Снижение амплитуды сигнала обусловлено непрерывным уменьшением зазора между электродами А и В и, следовательно, непрерывным возрастанием напряженности электрического поля на электродах и в разрядном промежутке. По мере протекания самостоятельного разряда в зазоре накапливается объемный заряд ионов. Поэтому коронный разряд переходит в кистевой, а затем в искровой разряд. Переход разряда в искровую форму с позиции стримерной теории осуществляется в со-

ответствии с [14] при выполнении следующих условий:

- должно существовать определенное соотношение между полем лавины и полем разряда, созданным электродами;
- головка лавины должна излучать количество фотонов, достаточное для поддержания и распространения стримера.

В математической форме эти условия принимают вид

$$E = E_1, N_i \geq N_{i0} = 7 \cdot 10^{11} \text{ ион/см}^3,$$

где  $E$  – напряженность поля между электродами;  $E_1$  – напряженность поля, созданного положительными ионами в головке лавины;  $N_i$  – концентрация ионов в головке лавины;  $N_{i0}$  – предельное значение концентрации ионов в головке лавины.

Пусть указанные выше условия выполняются в момент времени  $t_3$  (рис. 2). Начиная с этого момента времени коронный разряд переходит в искровой, который характеризуется относительно высокой стабильностью процессов. Однако амплитуда заряда емкости  $C$  в период дальнейшего приближения дефекта к датчику непрерывно и монотонно снижается.

Процесс монотонного снижения амплитудного значения сигнала (рис. 2), заключенного между временами  $(t_3 - t_i)$ , можно объяснить на основе закона Пашена [15], отражающего зависимость напряжения искрового разряда в воздухе от произведения межэлектродного расстояния  $d$  на давление газов  $p$ .

При движении дефекта к датчику точечных повреждений величина указанного произведения соответствует напряжению зажигания разряда правой ветви кривой Пашена. Снижение амплитудного значения напряжения зажигания искро-

вого разряда будет происходить до тех пор, пока произведение  $Pd(t)$  не достигнет значений, лежащих в диапазоне  $(0,3 - 2,0)$  см·мм рт. ст. В соответствии с рис. 1 и 2 указанное значение произведения давления на расстояние между первичным преобразователем и дефектом достигается в интервале времен  $(t_3 - t_i)$ . В данном интервале величина напряжения зажигания разряда, в соответствии с кривой Пашена, достигнет своего минимума [15].

С момента времени  $t_i$  дефект начинает удаляться от датчика, зазор между ними возрастает и напряжение зажигания разряда повышается в соответствии с правой ветвью кривой Пашена. Разряд в интервале времен  $(t_i - t_5)$  из искрового разряда переходит в кистевой, коронный, а затем в самостоятельный разряд [16–20].

При смене полярности потенциала на первичном преобразователе характер сигнала с первичного преобразователя не изменяется. Однако при отрицательной полярности сигнала передний и задний фронты становятся более выраженными, амплитуда колебаний на плато сигнала уменьшается. Это можно объяснить тем, что при отрицательной полярности датчика дефектов наиболее искаженное поле наблюдается в области дефекта, который исполняет роль анода. Поэтому процесс образования электронных лавин и объемного заряда в этом случае происходит более интенсивно, чем при обратной полярности на электродах.

На рис. 3 приведены снятые зависимости разрядного напряжения промежутка между границей дефекта и точкой соприкосновения ролика с проводом для различных диаметров ролика при положительной (А) и отрицательной (В) полярности напряжения на ролике.

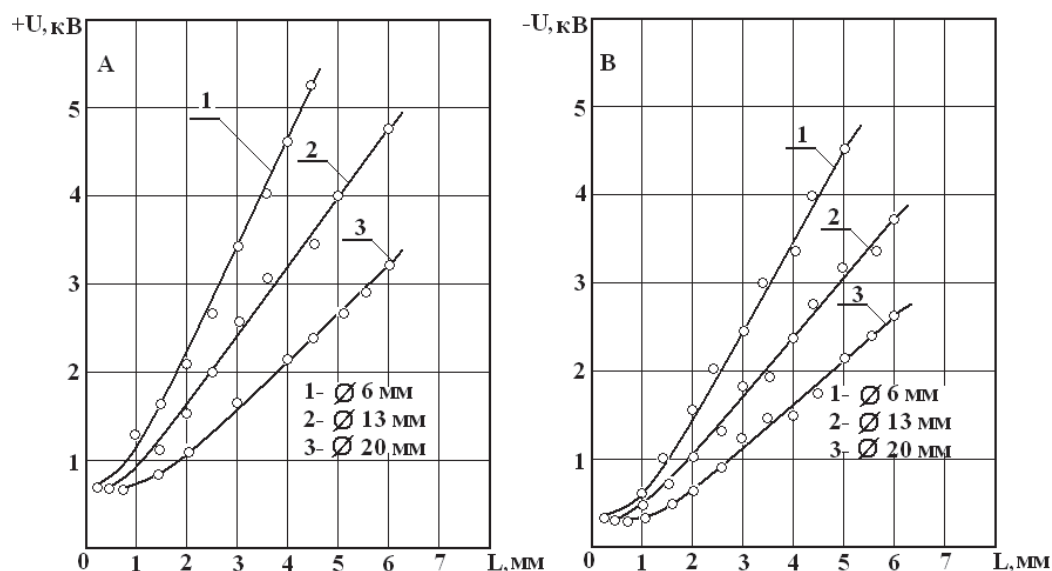


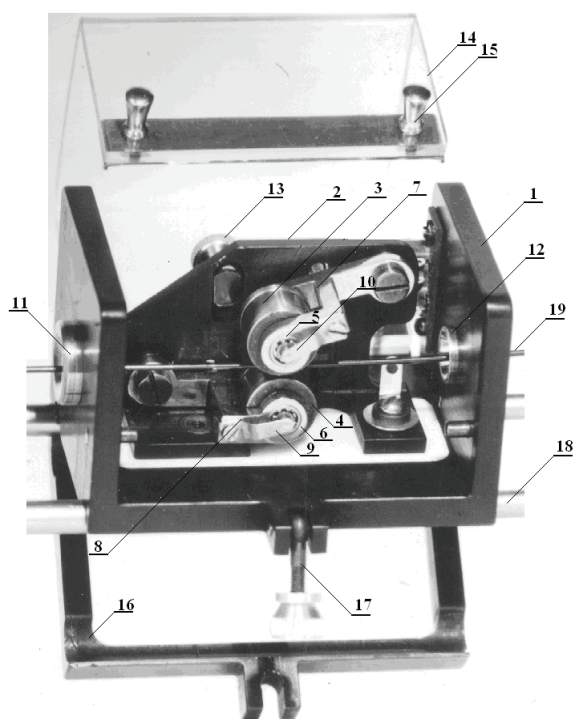
Рис. 3. Графики зависимости разрядных напряжений от расстояния между границей дефекта и точкой соприкосновения ролика с проводом для различных диаметров ролика при положительной (А) и отрицательной (В) полярности напряжения на ролике. Диаметр ролика: 1) 6; 2) 13; 3) 16 мм

Fig. 3. Diagram of discharge voltage dependence on the distance between the defect border and a contact point of the roller with the wire for different diameters of the roller with positive (A) and negative (B) voltage polarity on the roller. Roller diameter: 1) 6; 2) 13; 3) 16 mm

На рис. 3 видно, что указанные выше зависимости носят нелинейный характер, а крутизна характеристики зависит от диаметра провода. Исследования показали, что для контроля дефектности предпочтительнее выбрать отрицательную полярность напряжения на датчике дефектов, так как сигнал дефекта в этом случае четче, а напряжение контроля ниже, чем при обратной полярности напряжения на датчике.

#### Практическая реализация экспериментальных результатов

С учетом проведенного выше анализа процессов, происходящих в первичном преобразователе, была разработана его конструкция, приведенная на рис. 4.



**Рис. 4.** Первичный преобразователь дефектов: 1 – корпус датчика; 2 – основа для крепления рабочих элементов датчика; 3 и 4 – два свободно вращающихся ролика, выполненных из нержавеющей стали; 5 и 6 – подшипники; 7 и 8 – коромысла; 9 и 10 – скользящие контакты; 11 и 12 – направляющие втулки; 13 – концевой выключатель; 14 – изоляционная крышка; 15 – фиксаторы крышки; 16 – платформа датчика; 17 – элемент крепления датчика; 18 – рама для крепления датчика; 19 – контролируемый провод

**Fig. 4.** The primary defect converter: 1 is the sensor case; 2 is the base for fixing the working elements of the sensor; 3, 4 are two freely rotating rollers made of stainless steel; 5, 6 are the bearings; 7, 8 are the rocker arms; 9, 10 are the sliding contacts; 11, 12 are the guide bushes; 13 is the switch; 14 is the insulator cover; 15 is the cover locks; 16 is the sensor platform; 17 is the sensor mounting block; 18 is the frame for mounting the sensor; 19 is the controlled wire

Датчик представляет собой два цилиндрических электрода 3 и 4. Electroды через подшипники 5 и 6 размещаются на осях, которые закреплены на подвижных рычагах (коромыслах) 7 и 8, позволяющих электродам-роликам совершать вертикальные перемещения синхронно с колебаниями провода. Electroды поджимаются друг к другу при помощи пластинчатых пружин, действующих на коромысла. Напряжение к электродам подводится через скользящие контакты 9 и 10. Источник питания к датчикам подключается через контакты концевой выключателя 13, которые замыкаются при закрытии изоляционной крышки 14 и размыкаются при её открывании. Крышка 14 прикрепляется к основанию корпуса 1 шарнирами, расположенными вблизи торцов одной из её стенок, а при закрывании крышки – фиксируется в закрытом положении зажимом 17.

Для обеспечения метрологических характеристик создаваемых способов и средств контроля дефектов и их геометрических размеров в изоляции обмоточных проводов необходимо учесть все выявленные и перечисленные выше положения.

Рабочими элементами датчика являются два свободно вращающихся ролика 3 и 4. Питательное напряжение  $U_0$  подается на оси роликов при помощи скользящих контактов 9 и 10, которые через токоограничительное сопротивление подключаются к источнику высокого напряжения (ИВН) и к делителю напряжения. При входе дефекта в зону датчика дефектов между жилой провода в месте дефекта изоляции и рабочими элементами датчика (роликками 3 и 4) загорается тот или иной вид разряда, приводящий к падению напряжения на датчике. Полученный импульсный сигнал снимается с низковольтного плеча делителя и подается в измерительную схему.

Для регистрации количества дефектов на изоляции контролируемого провода необходимо, чтобы на каждый дефект с выхода первичного преобразователя был сформирован один импульс. Если сигнал с первичного преобразователя оставить в неизменном виде, то, в силу импульсной формы искрового разряда, счетчик дефектов регистрирует вместо одного дефекта  $n$  ложных дефектов, равных количеству импульсов искрового разряда в сигнале. Чтобы этого не происходило, нужно сформировать огибающую сигнала. Это можно было бы сделать путем установления на выходе первичного преобразователя фильтра с постоянной времени интегрирования  $\tau$  [15]. Однако в силу присутствия нестабильных зон искрового разряда в сигнале с датчика дефектов при низких скоростях движения провода с одного дефекта может быть сформировано такое количество импульсов  $n_1$ , сколько раз пауза между импульсами искрового разряда превышает постоянную времени  $\tau$  фильтра (см. рис. 2, эпюра 1). Величина погрешности в подсчете дефектов в этом случае может составлять 300, 400 и более %. При высоких скоростях движения провода  $V_{пр}$  ухудшается разрешающая способность контро-



Как следует из выражения (5), время задержки не остается постоянной величиной от дефекта к дефекту, а изменяется обратно пропорционально скорости провода. Однако длина отрезка провода, прошедшего через датчик дефектов за время  $t_3$ , остается неизменной, независимо от того, с какой скоростью перемещается провод.

Таким образом, задний фронт импульса дефекта формируется в том случае, если после окончания последнего импульса на входе ДУ на управляющий вход ФФ пришло  $m$  импульсов скорости, количество которых определяет время задержки. Сформированный импульс регистрируется в СД. Так как величина  $ml_3$  больше или равна максимально возможной длине провода  $l+3\sigma_1$ , проходящей за время паузы между импульсами искрового разряда в зоне нестабильности, то это исключает ложный подсчет количества дефектов.

Геометрические размеры дефектов в эмалевой изоляции проводов дают не менее важную информацию о состоянии изоляции провода, чем количество дефектов.

Как показал анализ особенностей сигнала с первичного преобразователя, при прохождении через него дефектного участка изоляции провода, протяженность дефекта оказывает влияние только на длительность зоны самостоятельного разряда. Поэтому её нужно выделить из сигнала с первичного преобразователя и извлечь количественную информацию о протяженности дефекта. Для того чтобы выделить указанную зону самостоятельного разряда, задаются определенной величиной опорного сигнала  $U_{оп}$  из условия:  $U_{оп}=(0,7-0,9)U_0$ , где  $U_0$  – исходное напряжение на датчике дефектов при отсутствии в зоне его действия дефектов.

При подходе дефекта к датчику дефектов зажигается искровой разряд, и рабочее напряжение  $U_p$  на датчике начинает снижаться. Выбранное из указанного выше соотношения опорное напряжение  $U_{оп}$  постоянно сравнивается со значением рабочего напряжения  $U_p$ . Выполнение неравенства  $U_{оп} \geq U_p$  свидетельствует о том, что дефект находится в зоне датчика. Однако для исключения зоны нестабильности передний фронт импульса дефекта формируется не сразу, в момент  $U_{оп}=U_p$ , а с некоторой задержкой во времени  $t_{13}$  (рис. 2, эпюра 3). Время  $t_{13}$  выбирается несколько большим длительности одного импульса искрового разряда. Это позволяет исключить зоны нестабильности искрового разряда. Выполнение неравенства  $U_{оп} \geq U_p$  по истечении времени  $t_{13}$  свидетельствует о том, что между датчиком и дефектом зажегся самостоятельный разряд. При выходе задней границы из зоны датчика дефектов неравенство принимает вид  $U_{оп} \leq U_p$ . Однако момент нового выполнения равенства  $U_{оп}=U_p$  после сформированного переднего фронта импульса дефекта ещё не является свидетельством тому, что стабильное горение искрового разряда закончено. Такое равенство может возникнуть и в зоне стабильности разряда на плато в центральной части сигнала с первичного преобразователя. Поэ-

тому задний фронт импульса дефекта формируется с некоторой задержкой  $t_{23}$  (рис. 2, эпюра 3) относительно момента выполнения равенства  $U_{оп}=U_p$ . Выражение для определения времени задержки  $t_{23}$  аналогично формуле (5), только в него вместо величин  $l$  и  $3\sigma_1$  необходимо подставить  $l_{ст}$  и  $3\sigma_{ст}$ , характеризующие параметры нормального закона распределения участка провода, проходящего через датчик за время  $t=t_p-t_c$  (см. рис. 2). Введение времени задержки  $t_{23}$  позволяет исключить ложное формирование заднего фронта на участке возможных флуктуаций сигнала, иногда возникающих при входе и выходе дефекта из зоны датчика, и правильно сформировать задний фронт импульса протяженности дефекта по окончании зоны стабильности.

Рассмотрим, как реализуется в измерителе контроль протяженности дефектов. Сигнал с ДД поступает на вход К, где его амплитуда сравнивается с  $U_{оп}$  на ДН. На выходе К появляется положительный потенциал, если  $U_{оп} \leq U_p$ . Использование ДН и К позволяет разделить сигнал с ДД: уровень «1» на входе К соответствует отсутствию сигнала дефекта; импульсный сигнал – приближению или удалению дефекта от ДД; уровень «0» – прохождению дефекта через ДД. Формирователи ФП позволяют исключить зоны отсутствия дефектов из нестабильной зоны сигнала при приближении дефекта к ДД. ФЗ дает возможность исключить из импульса дефекта зону нестабильности при удалении дефекта от ДД, а также отдельные участки в зоне стабильности, на которых амплитуда импульсов с ДД превышает  $U_{оп}$  на ДН.

Рассмотрим, как получают количественную информацию из сформированного импульса о протяженности дефекта. С выхода ДС генерируются импульсы скорости. Генерация импульсов скорости осуществляется следующим образом. На боковой поверхности дискообразного датчика скорости нанесены прорези с равномерным шагом, равным размеру прорези. При движении провода диск начинает вращаться и с помощью фотодиодов, установленных на уровне отверстий, происходит формирование импульсов. За длительность одного импульса под датчиком проходит постоянный отрезок провода, равный  $l_c = \frac{\pi D}{2M}$ , где  $D$  – диаметр блока скорости;  $M$  – количество отверстий на его боковой поверхности. Так как протяженность дефектов мала, то точность её измерения с помощью импульсов скорости будет тем выше, чем меньше длина  $l_c$ . Уменьшения величины  $l_c$  можно добиться снижением диаметра  $D$  или увеличением количества отверстий  $M$ . В связи с тем, что как при снижении  $D$ , так и при увеличении  $M$  размеры прорезей на боковой поверхности датчика должны снижаться, то возможность уменьшения  $l_c$  весьма ограничена. С помощью фотолитографии нам удалось при диаметре диска 19,1 мм выполнить 170 прорезей на боковой поверхности диска, что позволило получить  $l_c=0,25$  мм. При такой вели-

чине  $l_c$  может быть измерена протяженность только таких дефектов, размеры которых больше  $l_c$ , и то с очень большой погрешностью. Поэтому для уменьшения  $l_c$  в измеритель введен умножитель частоты, принцип работы которого заключается в следующем. При приходе на вход счетчика, расположенного в блоке формирования импульсов скорости, переднего фронта импульса с датчика скорости импульс начинает заполняться  $N_1$  импульсами с частотой  $f_1=1$  МГц. По приходу переднего фронта импульса с датчика скорости счетчик обнуляется. Одновременно эти  $N_1$  импульсов поступают в схему формирования импульсов скорости, где начинают вычитаться с частотой  $f_2$ . Эта процедура повторяется до тех пор, пока со счетчика не придут новые  $N_1^*$  импульсов, заполнивших следующий импульс с датчика скорости. Таким образом, на один импульс с датчика скорости появляется

$$K_y = \frac{f_2}{f_1} \text{ импульсов с формирователя импульсов}$$

скорости. При этом за длительность одного сформированного импульса скорости под датчиком пройдет элементарный отрезок провода  $l_3$ :

$$l_3 = \frac{\pi D}{K_y M} = 0,25 / 10 = 0,025 \text{ мм}$$

В силу пропорциональной зависимости частоты импульсов с УЧ от скорости провода величина  $l_3$  остается неизменной, независимо от того, с какой скоростью движется провод. Протяженность  $l_3$  принята за единицу измерения протяженности дефекта. Подсчет количества импульсов скорости  $n$  в СП за период сформированного импульса дефекта позволяет определить протяженность дефекта  $l_i$  по формуле

$$l_i = l_3 n. \quad (6)$$

#### Расчетная часть

Результирующая погрешность определения количества дефектов на контролируемом проводе включает в себя погрешность, обусловленную нестабильностью искрового разряда при подходе и выходе дефекта из зоны первичного преобразователя, погрешность из-за наличия пауз между импульсами коронного или искрового разряда в зоне его нестабильного горения, погрешность, определяемую разрешающей способностью датчика дефектов.

Методическая погрешность контроля количества дефектов из-за нестабильности искрового разряда устраняется принципом формирования импульса дефекта, по которому передний фронт этого импульса формируется по первому импульсу искрового разряда, а задний – с задержкой на время  $t_3$  после последнего импульса искрового разряда.

Погрешность определения количества дефектов из-за наличия пауз между импульсами искрового разряда является мультипликативной случайной методической погрешностью и может быть очень высокой, если для её уменьшения не при-

нять соответствующих мер. Появление этой ошибки происходит из-за того, что серии импульсов искрового разряда в зоне его нестабильного горения разделены паузами, поэтому с каждой серии может быть ложно сформирован один импульс дефекта. При среднестатистическом количестве пауз  $m=3$  в сигнале одного дефекта будет сформировано 4 импульса дефекта, которые будут зарегистрированы в счетчике. Относительная погрешность при этом составит 300 %. Эта погрешность уменьшена путем введения в прибор времени задержки формирования заднего фронта импульса дефекта на время  $t_3$ .

При введении времени  $t_3$  возможны два вида ошибок. Первая ошибка может возникнуть в том случае, если длительность паузы окажется больше времени задержки. Статистические исследования показали, что длина отрезка провода, проходящего через датчик дефектов за паузу между сериями импульсов искрового разряда, распределяется по нормальному закону с параметрами  $\bar{l}=0,5$  мм,  $\sigma=0,1$  мм. Если выбрать время задержки из условия (4), то при достаточно большой выборке при определении  $l$  и  $3\sigma$  вероятность того, что время задержки окажется меньше длительности паузы, будет пренебрежительно мала, следовательно, ложное формирование импульса дефекта можно исключить. При объеме выборки  $N=300$  измерений, используемой нами при определении величин  $l$  и

$3\sigma$ , установление времени задержки  $t_3 = \frac{\bar{l} + 6\sigma}{v(t)}$  де-

лает вероятность  $P_1$  ложного счета импульсов, обусловленную указанной выше причиной, равной нулю. При этом абсолютная погрешность  $\Delta_1 n$  ложного счета дефектов, обусловленная указанной причиной, также будет равна нулю.

Вторая ошибка обусловлена тем, что расстояние между двумя соседними дефектами окажется меньше, чем  $l = \bar{l}_3 + 6\sigma$ , и эти два дефекта будут засчитаны как один дефект. Поскольку распределение расстояний между дефектами может быть описано стационарным пуассоновским потоком [22], то вероятность  $P_2$  того, что расстояние между дефектами окажется меньше величины  $l = \bar{l}_3 + 6\sigma$ , будет равна:

$$P_2 = 1 - \exp[-\lambda(\bar{l}_3 + 6\sigma)], \quad (7)$$

где  $\lambda = \frac{n}{l_{np}}$  – плотность потока, равная отношению

количества дефектов  $n$ , находящихся на контролируемом проводе, к длине  $l_{np}$  этого провода.

Абсолютная погрешность в определении количества дефектов  $\Delta_2 n$ , обусловленная второй ошибкой, будет равна:

$$\Delta_2 n = P_2(n-1). \quad (8)$$

Погрешность в определении количества дефектов  $\Delta_3 n$ , обусловленная разрешающей способностью датчика дефектов, находится аналогично, только для определения вероятности  $P_3$  того, что

расстояние между дефектами окажется меньше зоны разрешения датчика дефектов, в формулу (7) нужно поставить вместо  $l=l_3+6\sigma$  величину  $l_{\min}=8$  мм.

Для определения результирующей погрешности применим энтропийный подход, предложенный К. Шенноном [23]. Для этого установим взаимосвязь между энтропийным интервалом  $\Delta_3$  неопределенности и среднестатистическим отклонением энтропийной погрешности  $\sigma_3$ .

Согласно Шеннону, количество информации  $I$  определяется как разность энтропий:  $I=H(n)-H(n/n_n)$ , где  $H(n)$  – энтропия (мера неопределенности) измеряемой величины количества дефектов  $n$  до её измерения, а  $H(n/n_n)$  – энтропия действительного значения  $n$  вокруг полученного после измерения  $n_n$ , т. е. энтропия погрешности измерения.

Энтропия погрешности для закона Пуассона  $H(n/n_n)$  равна:

$$\begin{aligned} H(n/n_n) &= \int_{-\infty}^{\infty} (\ln \lambda - \lambda l) \lambda l^{-\lambda} dl = \\ &= -\ln \lambda \int_{-\infty}^{\infty} \lambda l^{-\lambda} dl + \lambda \int_{-\infty}^{\infty} l \lambda l^{-\lambda} dl. \end{aligned} \quad (9)$$

Первый интеграл, стоящий в правой части (9), равен 1, а второй – математическому ожиданию  $m_n$ . Так как для показательного закона  $m_n = \frac{1}{\lambda}$ , а дисперсия  $D^2 = \frac{1}{\lambda^2}$ , то можно записать:

$$H(n/n_n) = l \ln \sigma = 2\Delta_3. \quad (10)$$

Из (10) следует, что энтропийная погрешность  $\Delta_3 = 1,2\sigma_3$ . Среднестатистические отклонения погрешностей  $\sigma_2 = \frac{\Delta_2 n}{1,2}$ . Ошибки  $\Delta_2 n$  и  $\Delta_3 n$  не коррелируют между собой, так как они вызваны разными причинами. Поэтому среднестатистическое отклонение результирующей погрешности будет определяться выражением

$$\sigma = \sqrt{\sigma_2^2 + \sigma_3^2}.$$

Примем, что результирующая погрешность распределена по закону Пуассона. Поскольку она является мультипликативной, то погрешность чувствительности  $\gamma_2$  является постоянной величиной и её можно определить при любом значении  $N$ . Среднестатистическое количество дефектов на проводе  $l_{\text{пр}}=60$  м, зарегистрированное в процессе намотки обмоток, составляло  $N_{\text{ср}}=80$  дефектов, при этом  $\lambda_{\text{ср}}=1,33 \cdot 10^{-3}$  деф/мм,  $F_2=1,33 \cdot 10^{-3}$ ,  $\Delta_2 N=0,1$ ,  $F_3=1,06 \cdot 10^{-2}$ ;  $\Delta_2 N=0,85$ ,  $\sigma=0,1$ ,  $\gamma_s=1,06$ . Таким образом, класс точности созданного измерителя дефектности – 1,0.

Проведем анализ и оценку погрешностей, возникающих при контроле протяженности дефектов. Интегральная протяженность дефекта на контролируемом проводе по принципу, заложенному в основу её регистрации, определяется выражением (6).

Результирующая погрешность определения протяженности дефектов складывается из ошибки, обусловленной принципом определения  $l_{\text{дл}}$ , ошибки, связанной с присутствием зоны нестабильности коронного разряда и зоны реакции датчика на дефект, а также ошибки схемы обработки сигнала дефекта.

Ошибка, связанная с принципом определения  $l_{\text{дл}}$ , является аддитивной случайной погрешностью квантования. При подсчете количества импульсов  $n_i$  в счетчике протяженности дефектов может возникнуть ошибка на  $\pm 1$  импульс в начале и в конце импульса протяженности дефектов. Этому количеству импульсов соответствует интервал неопределенности  $\Delta_1 l_{\text{дл}} = \pm l_3 = \pm 0,025$  мм. Так как дефекты могут иметь любые протяженности, то ошибка, обусловленная указанной причиной, распределена внутри интервала от 0 до  $\pm l_3$  по равномерному за-

$$\text{кону и поэтому } \sigma_{l_i} = \frac{\Delta_1 l_i}{\sqrt{3}} = \frac{0,025}{1,73} = 1,44 \cdot 10^{-2} \text{ мм.}$$

При подсчете количества импульсов скорости  $n_i$  в счетчике протяженности дефектов СП присутствуют систематические ошибки, связанные с временами  $t_{13}$  и  $t_{23}$ , а также с разрешающей способностью ДД. Систематические ошибки, обусловленные временами  $t_{13}$  и  $t_{23}$ , устраняются путем прибавления к  $n$  импульсов  $m_1$  и вычитания импульсов  $m_2$ , опре-

$$\text{деляемых из выражений: } m_1 = \frac{l_1}{l_3}, \quad m_2 = \frac{l_{\text{ст}} + 3\sigma_{\text{ст}}}{l_3},$$

где  $l_{\text{ст}}$  – длина участка провода, прошедшего при максимальной скорости провода через ДД за период одного импульса искрового разряда.

Систематическая ошибка, связанная с разрешающей способностью ДД, вскрыта в [9]. Сущность её появления обусловлена следующим. Допустим, через датчик ДД проходит точечный дефект пренебрежительно малой протяженности. За время сформированного импульса дефекта в счетчик протяженности дефекта СП пройдет  $m_3$  импульсов скорости с УЧ. Этот счет дает ложное представление о протяженности бесконечно малого дефекта и его нужно исключить. Величина  $m_3$  определяется экспериментально и вычитается наряду с  $m_1$  и  $m_2$  в блоке вычитания БВ. На выходе БВ появляется импульс только после прихода в него после сформированного переднего фронта импульса дефекта количества импульсов скорости  $m = -m_1 + m_2 + m_3$ . Импульс на выходе БВ открывает СП и разрешает подсчет импульсов скорости. За счёт этого из  $n$  импульсов скорости, укладываемых в длительность сформированного импульса дефекта, в счетчик СП проходит только  $n_i = n - m$  импульсов, по количеству которых и определяется протяженность  $l$ -го дефекта.

Погрешность, связанная с присутствием зоны нестабильности коронного разряда и зоны реакции датчика на дефект, относится к методической аддитивной погрешности. Она устранена введением задержки времени формирования переднего и за-



днего фронтов импульса протяженности дефекта и схемы обработки сигнала протяженности дефекта.

Ошибка схемы обработки сигнала протяженности дефекта является аддитивной погрешностью квантования. Она обусловлена тем, что в схеме вычитания, введенной в измеритель протяженности дефекта, возможна ошибка вычитания 1 импульс.

Абсолютная величина  $\Delta_3 l_i$  закона распределения и среднеквадратическая величина  $\sigma_3$  этой погрешности полностью аналогичны закону и величинам  $\Delta_1 l_i$ , однако их нельзя считать коррелированными ошибками, так как их источником являются разные причины.

Таким образом, результирующая погрешность определения протяженности дефектов  $\Delta l_p$  является аддитивной и равной 0,035 мм. Так как счетчик протяженности дефектов способен зарегистрировать 999 импульсов с умножителя частоты, что соответствует пределу шкалы  $l_n=24,9$  мм, то приведенная погрешность в определении протяженности дефектов  $\gamma_n=0,14$  %. По правилу округления погрешности и определению класса точности прибора, он (класс точности) может быть принят равным 0,15.

#### Заключение

Дефектность изоляции обмоточных проводов является очень важной характеристикой, определяющей

показатели надежности и долговечности обмоток электрических машин [24], поэтому разработка измерителей дефектности, позволяющих контролировать дефектность в широком диапазоне скоростей движения проводов, например при намотке обмоток, имеет важное практическое значение.

В статье рассмотрены особенности характеристик первичного преобразователя дефектов в изоляции обмоточных проводов, основанного на заيجании разряда в воздухе. Показано, что информационный сигнал первичного преобразователя, при прохождении через него дефектного участка изоляции провода, носит сложный характер. Проведен анализ структуры указанного сигнала и сделана попытка объяснить физические процессы, обуславливающие возникновение различных зон указанного сигнала. Установлено влияние отдельных зон сигнала на точность контроля количества дефектов и их протяженность, и указаны пути снижения влияния нестабильностей сигнала на точностные характеристики измерителя дефектности. Приведена конструкция первичного преобразователя и структурная схема измерителя дефектов, в которых реализованы полученные экспериментальные результаты. Проведена оценка возможных погрешностей и показано, что по контролю количества дефектов созданный прибор имеет класс точности 1,0, а по контролю протяженности класс точности измерителя может быть оценён величиной 0,15.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Курбатова О.А., Павлюченко В.М. Монтаж и ремонт горных машин и электрооборудования: учебное пособие. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2004. – 286 с.
2. PDIV characteristics of twisted-pair of magnet wires with repetitive impulse voltage / K. Kimura, S. Ushirone, T. Koyanagi, M. Nikita // IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Ins. – June 2007. – V. 14. – № 3. – P. 744–750.
3. Knich A. Mama la, Jablonski M., Uliasz P. A new generation of aluminum enameled winding wires // Wire Journal International. – 2012. – V. 45. – № 1. – P. 55–61.
4. Применение магнитодieleктрического композита на основе ультрадисперсного порошка никель-цинковых частиц для ресурсосберегающей технологии пропитки обмоток электрических машин / Г.В. Смирнов, О.Л. Хасанов, Д.Г. Смирнов, В.В. Полисадова, М.С. Петюкевич, З.Г. Бикбаева // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2015. – Т. 326. – № 11. – С. 106–117.5.
5. ГОСТ ИЕС 60851–5:2011. Провода обмоточные. Методы испытаний. Ч. 5. Электрические свойства. – М.: Стандартинформ, 2014. – 19 с.
6. ИЕС 60851–5:1996 «Windingwires-Test methods-Part 5: Electrical properties».
7. Смирнов Г.В. Надежность изоляции обмоток электротехнических изделий. – Томск: Изд-во Томского государственного университета, 1990. – 192 с.
8. Способ определения коэффициента пропитки отверждаемым полимерным составом обмоток электрических машин: пат. Рос. Федерация № 2521439; заявл. 25.10.12; опубл. 27.06.2014, Бюл. № 18. – 22 с.
9. Способ контроля и ремонта изоляции проводов: пат. Рос. Федерации № 2506601; заявл. 18.06.12; опубл. 10.02.2014, Бюл. № 4. – 16 с.
10. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. – М.: Интеллект, 2009. – 736 с.
11. Некоторые особенности коронного разряда в воздухе / С.Б. Афанасьев, Д.С. Лавренко, И.Н. Петрушенко, Ю.К. Стишков // Журнал технической физики. – 2008. – Т. 78. – Вып. 7. – С. 30–31.
12. Ховатсон А.М. Введение в теорию газового разряда. – М.: Атомиздат, 1980. – 182 с.
13. Козлов Б.А., Соловьев В.И. Численное моделирование стационарной отрицательной короны в воздухе // Журнал технической физики. – 2009. – Т. 79. – № 5. – С. 18–28.
14. Разевиг Д.В., Соколова М.В. Расчет начальных и разрядных напряжений газовых промежутков. – М.: Энергия, 1977. – 200 с.
15. Лёб Л. Основные процессы электрических разрядов в газах. – М.: Гостехиздат, 1950. – 470 с.
16. Омаров О.А., Рахадзе А.А. Физические основы плазменного пробоя газов высокого давления. Ч. 1 // Инженерная физика. – 2014. – № 12. – С. 5–26.
17. Омаров О.А., Рахадзе А.А. Физические основы плазменного пробоя газов высокого давления. Ч. 2 // Инженерная физика. – 2014. – № 12. – С. 36–56.
18. Роль термоэлектронной эмиссии в формировании и развитии искрового канала в газах / Ф.М.А. Аль-Харти, О.А. Омаров, Н.О. Омарова, П.Х. Омарова, М.Б. Хачалов // Прикладная физика. – 2015. – № 3. – С. 52–56.
19. The role of high-energy electrons during the formation of nonstationary optical emission and transmission spectra of plasma behind the edge of high-velocity ionization waves / N.A. Ashurbekov, K.O. Iminov, G.Sh. Shkhsinov, A.R. Ramasanov // High Temperature. – 2015. – V. 53. – Iss 5. – P. 627–637.
20. Ashurbekov N.A., Iminov K.O. Stratification of the plasma column in transverse nanosecond gas discharges with a hollow

- cathode // *Technical Physics*. – 2015. – V. 60. – № 10. – P. 1456–1463.
21. Смирнов Г.В. Измеритель дефектности изоляции обмоточных проводов // *Дефектоскопия*. – 1989. – № 5. – С. 93–94.
22. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1985. – 248 с.
23. Шеннон К. Математическая теория связи // *Работы по теории информации и кибернетике*. – М.: Изд-во иностр. лит., 1963. – С. 243–332.
24. Похолков Ю.П., Бесперстов П.П., Пыхтин В.В. Исследование влияния технологического процесса изготовления обмоток на дефектность витковой изоляции асинхронных двигателей // *Известия Томского политехнического института*. – 1975. – Т. 222. – С. 52–65.

*Поступила 19.12.2015 г.*

UDC 658.382.3

## PHYSICAL BASIS OF NON-DESTRUCTIVE TESTING OF WINDING INSULATION IN ELECTRIC DRIVES OF MINING AND OILFIELD EQUIPMENT

Gennadiy V. Smirnov,

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics,  
40, Lenin Avenue, Tomsk, 634045, Russia. E-mail: smirnov@main.tusur.ru

Dmitriy G. Smirnov,

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics,  
40, Lenin Avenue, Tomsk, 634045, Russia. E-mail: smirnov@main.tusur.ru

**The relevance** of the research is related to the fact that at the present time geo asset exploration, extraction, transportation in oil, mining, coal, chemical and other industries are subjected to a high level of mechanization and automation involving electrical machines. The reliability and availability of these machines operation depends on condition of turn insulation (the enamel insulation of winding wires plays its role), therefore it is a critical issue to improve the control of enamel insulation of winding wires, increasing their quality and reliability.

**The aim** of the research is to study the physical processes in a primary converter of defects in enamel insulation for justifying the selection of the mentioned converter design, evaluating and optimizing its metrological characteristics.

**Methods.** The oscillographic method is used to study the characteristics of the discharge in the air ignited between the sensor and the wire at the place of a defect. The micrometers are applied to determine the defect geometry in the enamel insulation and the distance from the sensor to the border of the defective area. The high-voltage technique is used to study the characteristics of nature and type of the discharge in the gap between the sensor and the wire strand in defective areas of enamel insulation.

**Result.** The authors have studied the features of the discharge in the primary defect converter when the defective section of wire approaches to it, when the defective section is located in the area of the sensor and at the exit of the section out of the sensor. The paper introduces the typical oscillograms of current and voltage from the primary defect converter when the defective section of wire insulation passes through it. The authors analyzed the signal structure and considered a possible mechanism and type of the discharge in the sensor; selected the information zones from the signal structure of the primary converter; considered the options and ways of decreasing an error when controlling the quantity and the extent of defects; developed the way of testing for defects of wire enamel insulation which allows defining the quantity and the extent of defective sections in the enamel insulation of the wire moving with any variable speed; proposed the schematic diagram of the measuring instrument of deficiency, examined the principle of its work and estimated its metrological characteristics.

### Key words:

Enamel insulation, defect, defect detector, corona discharge, spark discharge, voltage, discharge current, pulse with a defect waveform, oscillogram.

### REFERENCES

1. Kurbatov O.A., Pavlyuchenko V.M. *Montazh i remont gornyykh mashin i elektrooborudovaniya* [Installation and repairing of mining machinery and electrical equipment]. Vladivostok, FESTU Publ. house, 2004. 286 p.
2. Kimura K., Ushirone S., Koyanagi T., Hikita M. PDIV characteristics of twisted-pair of magnet wires with repetitive impulse voltage. *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Ins.*, June 2007, vol. 14, no. 3, pp. 744–750.
3. Knich A. Mama la, Jablonski M., Uliasz P. A new generation of aluminum enameled winding wires. *Wire Journal International*, 2012, vol. 45, no. 1, pp. 55–61.
4. Smirnov G.V., Khasanov O.L., Smirnov D.G., Polissadov V.I., Petukovich M.S., Bikbaeva Z.G. Primenenie magnitotelluricheskogo kompozita na osnove ultradispersnogo poroshka nikel-tsinkovykh chastits dlya resursosberegayushchey tekhnologii propitki obmotok elektricheskikh mashin [Application of magneto-electric composite based on ultrafine powder of nickel-zinc particles for resource-saving technology of winding impregnation in electrical machines]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2015, vol. 326, no. 11, pp. 106–117.
5. *GOST IEC 60851-5-2011. Provoda obmotochnye. Metody ispytaniy. Ch. 5. Elektricheskie svoystva* [State Standard 60851-5-2011. Winding wires. Test methods. P. 5. Electrical properties. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 19 p.
6. *IEC 60851-5: 1996. Methods of test for Winding Wires-Part 5: Electrical properties.*
7. Smirnov G.V. *Nadezhnost izolyatsii obmotok elektrotekhnicheskikh izdeliy* [Reliability of winding insulation in electrical products]. Tomsk, Tomsk State University Press, 1990. 192 p.
8. *Sposob opredeleniya koeffitsienta propitki otverzhaemym polimernym sostavom obmotok elektricheskikh mashin* [Method of determining the coefficient of winding impregnation with curable polymer composition in electrical machines]. Patent RF, no. 2521439, 2014.
9. *Sposob kontrolya i remonta izolyatsii provodov* [Method of controlling and repairing wire insulation]. Patent RF, no. 2506601, 2014.
10. Raizer Yu.P. *Fizika gazovogo razryada* [Physics of gas discharge]. Moscow, Intellect Publ., 2009. 736 p.
11. Afanasyev S.B., Lavrenyuk D.S., Petrushenko I.N., Stishkov Yu.K. Nekotorye osobennosti koronnogo razryada v vozdukh [Some features of corona discharge in the air]. *Technical physics*, 2008, vol. 78, Iss. 7, pp. 30–31.
12. Howatson A.M. *Vvedenie v teoriyu gazovogo razryada* [Introduction into the gas discharge theory]. Moscow, Atomizdat Publ., 1980. 182 p.
13. Kozlov B.A., Solovyov V.I. Chislennoe modelirovanie stacionarnoy otritsatelnoy korony v vozdukh [Numerical simulation of stationary negative corona in the air]. *Technical physics*, 2009, vol. 79, no. 5, pp. 18–28.
14. Razevig D.V., Sokolova M.V. *Raschet nachalnykh i razryadnykh napryazheniy gazovykh promezhutkov* [Calculation of initial and discharge voltage of gas gaps]. Moscow, Energiya Publ., 1977. 200 p.

15. Loeb L. *Osnovnye protsessy elektricheskikh razryadov v gazakh* [Basic processes of electrical discharges in gases]. Moscow, Gos-tekhnizdat Publ., 1950. 470 p.
16. Omarov O.A., Rakhadze A.A. Fizicheskie osnovy plazmennogo proboya gazov vysokogo davleniya [Physical bases of plasma breakdown of high-pressure gases]. *Engineering physics*, 2014, P. 1, no. 12, pp. 5–26.
17. Omarov O.A., Rakhadze A.A. Fizicheskie osnovy plazmennogo proboya gazov vysokogo davleniya [Physical bases of plasma breakdown of high-pressure gases]. *Engineering physics*, 2014, P. 2, no. 12, pp. 36–56.
18. Al-Harti F.M.A., Omarov O.A., Omarova N.A., Omarova P.Kh., Kachalov M.B. Rol termoelektronnoy emissii v formirovani i razviti iskovogo kanala v gazakh [The role of thermionic emission in formation and development of spark channel in gases]. *Journal of applied physics*, 2015, no. 3, pp. 52–56.
19. Ashurbekov N.A., Iminov K.O., Shakhsinov G.Sh., Ramazanov A.R. The role of high-energy electrons during the formation of nonstationary optical emission and transmission spectra of plasma behind the edge of high-velocity ionization waves. *High Temperature*, 2015, vol. 53, Iss. 5, pp. 627–637.
20. Ashurbekov N.A., Iminov K.O. Stratification of the plasma column in transverse nanosecond gas discharges with a hollow cathode. *Technical Physics*, 2015, vol. 60, no. 10, pp. 1456–1463.
21. Smirnov G.V. Izmeritel defektnosti izolyatsii obmotochnykh provodov [Measuring the defects in insulation of winding wires]. *Defectoscopy*, 1989, no. 5, pp. 93–94.
22. Novitskiy P.V., Zograf I.A. *Otsenka pogreshnostey rezultatov izmereniy* [Estimation of errors of measurement results]. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1985. 248 p.
23. Shannon C. *Matematicheskaya teoriya svyazi* [Mathematical theory of communication]. *Raboty po teorii informatsii i kibernetike* [Works on information theory and cybernetics]. Moscow, Inostrannaya literatura Publ., 1963. pp. 243–332.
24. Pokholkov Yu.P., Besperstov P.P., Pykhtin V.V. Issledovanie vliyaniya tekhnologicheskogo protsessa izgotovleniya obmotok na defektnost vitkovoy izolyatsii asinkhronnykh dvigateley [Study of the influence of technological process of manufacturing the windings on the deficiency of turn insulation of induction motors]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic Institute*, 1975, vol. 222, pp. 52–65.

Received: 19 December 2015.

УДК 553.984;552.54

## ЛОКАЛИЗАЦИЯ КАРБОНАТНЫХ ПЛАТФОРМ В ОРДОВИКСКИХ ОБРАЗОВАНИЯХ ЗАПАДНО-СИБИРСКОЙ ГЕОСИНЕКЛИЗЫ

**Ковешников Александр Евгеньевич,**

кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры геологии и разведки полезных ископаемых Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; старший научный сотрудник Томского филиала Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 4. E-mail: Kovesha@mail.ru

**Конторович Владимир Алексеевич,**

доктор геолого-минералогических наук, член-корреспондент РАН, профессор кафедры геофизики Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; заместитель директора, заведующий лабораторией сейсмогеологического и математического моделирования природных нефтяных систем Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3. E-mail: KontorovichVA@ipgg.sbras.ru

**Макаренко Светлана Николаевна,**

кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Сибирского палеонтологического научного центра Национального исследовательского Томского государственного университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36. E-mail: s.makarenko@ggf.tsu.ru

**Татьянин Геннадий Михайлович,**

кандидат геолого-минералогических наук, декан геолого-географического факультета, доцент кафедры палеонтологии и исторической геологии Национального исследовательского Томского государственного университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36. E-mail: gmt@mail.tsu.ru

**Актуальность исследования** заключается в необходимости увеличения объектов для поиска месторождений нефти и газа, одним из которых являются карбонатные платформы в доюрских образованиях Западной Сибири. С карбонатными платформами на территории Западно-Сибирской геосинеклизы (ЗСГ) связано открытие ряда месторождений нефти и газа: Урманского, Арчинского и ряда других.

**Цель работы:** рассмотрение условий формирования ордовикских образований Западно-Сибирской геосинеклизы с целью установления на ее территории участков формирования карбонатных пород (карбонатных платформ), которые при соответствующей проработке процессами гидротермального выщелачивания и гидротермальной доломитизации преобразуются в породы-коллекторы. В результате формируются трещинно-метасоматические зоны гидротермальной проработки карбонатных пород, которые подстилают площадные зоны формирования пород-коллекторов по участкам выхода палеозойских образований на доюрскую поверхность или нефтегазозонного горизонта зоны контакта палеозойских (доюрских) и мезозойских отложений.

**Методы исследований:** литологический, палеонтологический, палеогеографический, тектонический. На основе комплексации методов исследований предыдущими исследователями, территория ЗСГ подразделена на 23 структурно-фациальных района, с характерным набором литостратиграфических подразделений (свит, толщ) и палеонтологическим обоснованием возраста. По результатам изучения реконструированы палеогеографические обстановки, условия накопления и распространения осадков в раннем и средне-позднеордовикском времени. Наибольшее внимание при этом уделено установлению зон формирования карбонатных пород, перспективных для формирования по ним пород-коллекторов. Тектонический анализ позволил провести сравнение участков развития карбонатных платформ раннеордовикского и средне-позднеордовикского возраста с целью выявления тектонических движений, способствующих увеличению или сокращению карбонатных платформ.

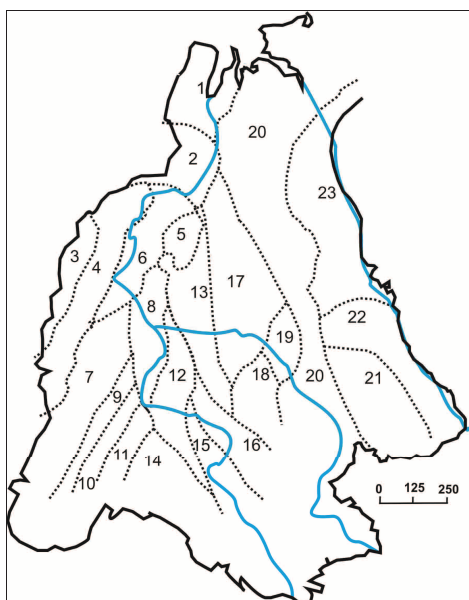
**Результаты.** Приведены сведения о распространении нижне-, средне-верхних отложений ордовика на территории ЗСГ, реконструированы условия осадконакопления в ордовикском периоде, построены схематические палеогеографические карты нижнеордовикских и средне-верхнеордовикских образований, а также совмещенная карта распространения выявленных карбонатных платформ раннеордовикского и средне-позднеордовикского возраста, и сделаны выводы о тектонической истории развития ЗСГ в течение ордовика, в частности о проявлении трансгрессивных фаз в зоне формирования карбонатных платформ ордовикского возраста.

**Ключевые слова:**

Ордовикские отложения, карбонатная платформа, Западно-Сибирская геосинеклиза, структурно-фациальный район, свита, толща, особенности осадконакопления.

## Введение

В отложениях палеозоя Западно-Сибирской геосинеклизы (ЗСГ) установлен целый ряд месторождений нефти и газа, приуроченных к трещинным зонам гидротермально-метасоматической проработки карбонатных образований (карбонатная платформа). Менее распространены аналогичные зоны на участках развития кремнисто-глинистых и кремнисто-карбонатных пород, подстилающих нефтегазоносный горизонт зоны контакта (НГГЗК), с которыми в палеозойских отложениях связано открытие значительной части месторождений нефти и газа, приуроченных к палеозойским образованиям с пустотным пространством, сформированным в зоне НГГЗК [1]. При наложении на породы-коллекторы, сформированные в зоне НГГЗК описанных трещинно-метасоматических зон, формируется единая гидродинамическая система. В связи с этим особую актуальность приобретает прослеживание зон формирования карбонатных платформ в различные периоды палеозоя.



**Рис. 1.** Схема структурно-фациального районирования палеозойских отложений Западно-Сибирской геосинеклизы [5–7]. Структурно-фациальные районы (СФР): 1 – Бованенковский; 2 – Новопортовский; 3 – Тагильский; 4 – Березово-Сартыньинский; 5 – Ярудейский; 6 – Шеркалинский; 7 – Шаимский; 8 – Красноленинский; 9 – Тюменский; 10 – Косолаповский; 11 – Уватский; 12 – Салымский; 13 – Усть-Балыкский; 14 – Ишимский; 15 – Тевризский; 16 – Туйско-Барабинский; 17 – Варьеганский; 18 – Нурольский; 19 – Никольский; 20 – Колпашевский; 21 – Вездеходный; 22 – Тыйский; 23 – Ермаковский

**Fig. 1.** The map of structure-facies zoning of Paleozoic deposits of the West Siberian geosyncline (WSG) [5–7]. Structural-facial areas (SFA): 1 – Bovanenkovsky; 2 – Novoportovskiy; 3 – Tagilskiy; 4 – Berezovo-Sartyninsky; 5 – Yarudeyskiy; 6 – Sherkalinskiy; 7 – Shaimskiy; 8 – Krasnoleninskiy; 9 – Tyumenskii; 10 – Kosolapovskiy; 11 – Uvatskiy; 12 – Salymskiy; 13 – Ust-Balykskiy; 14 – Ishimskiy; 15 – Tevrizskiy; 16 – Tuisk-Barabinskii; 17 – Varioganskii; 18 – Nurolskiy; 19 – Nikolskiy; 20 – Kolpashevskiy; 21 – Vezdekhodny; 22 – Tyiskiy; 23 – Ermakovskiy

Карбонатные платформы на территории ЗСГ выявлены на разных стратиграфических уровнях. Ранее авторами установлено распространение перспективных пород-коллекторов карбонатных платформ в венде и кембрии [2, 3]. Большой интерес представляют участки локализации подобных объектов в образованиях более молодого возраста.

Вся территория ЗСГ подразделена на 23 структурно-фациальных района [4, 5] со своим характерным комплексом доюрских образований, их локализацией на территории ЗСГ, мощностью и рядом других особенностей (рис. 1). В настоящей статье рассмотрены условия формирования карбонатных платформ в ордовикском периоде.

Породы данного возраста в пределах ЗСГ установлены бурением и являются фрагментами неполных разрезов ордовика, прослеженных на территории некоторых структурно-фациальных районов (СФР). Взаимоотношения их с перекрывающими и подстилающими породами условны, палеонтологическое обоснование слабое. Все имеющиеся материалы по ордовика ЗСГ достаточно полно представлены в работах [4–8].

## Распространение ордовикских образований на территории ЗСГ

Ниже приведена краткая литологическая и палеонтологическая характеристика толщ, отнесенных к ордовика условно, палеонтологически обоснованные толщ описаны более полно.

В Новопортовском СФР к ордовика отнесена яротинская толща темно-серых филлитовидных глинистых сланцев с линзами известняков и фауной *Scolopodus* sp., *Drepanodusoriginalis* Serp., «*Oistodus*» *pseudoramis* Serp.

В пределах Березово-Сартыньинского СФР (Березовский газоносный район, скважина 201-Р) к ордовика отнесена нижняя часть ахтынтурской толщи яшм, кремнисто-глинистых сланцев с фауной радиолярий *Cenosphaera* sp., *Carposphaera* sp., *Druppula* sp., *Stylosphaera* sp. и др. мощностью 150 м [5, 6].

На территории Шеркалинского СФР к ордовика отнесена нижняя часть филипповской толщи, сложенная серыми, зеленовато-серыми серицитовыми, глинистыми, кремнисто-углистыми сланцами с рассланцованными и метаморфизованными конгломерато-гравелитами, кварцитовидными олигомиктовыми песчаниками. Мощность филипповской толщи более 500 м.

В пределах Красноленинского СФР предположительно ордовикские отложения представлены нижней частью толщи эпидотизированных, амфиболитизированных, альбитизированных андезитов и метабазальтами (мощность всей толщи более 50 м).

В Уватском СФР предположительно к нижне-среднему ордовика отнесена мощная, около 2000 м, толща терригенных пород, включающая сланцы, аргиллиты, алевролиты, песчаники, кварциты известняки, прослой эффузивов основ-

ного и среднего составов. Позднеордовикскими считаются перекрывающие их лавы базальтового, андезибазальтового, дацитового составов и их туфы (мощностью от 0 до 375 м).

Известковистые песчаники и кремнисто-глинистые сланцы Ишимского СФР в стратиграфической схеме сопоставлены условно со средним-верхним ордовиком [5].

В пределах Тевризского СФР метаморфизованные глинистые породы объединены в калачинскую толщу мощностью около 50 м, верхняя часть которой сопоставлена с нижним ордовиком.

В пределах Варьганского СФР ордовикской системе соответствует полуденная толща. Нижнюю часть толщи слагают красноцветные конгломераты, песчаники, реже линзы черных илистых известняков с фауной, верхнюю – темные глинистые комковатые известняки с фауной. Из нижней части полуденной толщи (скважина Полуденная-322, интервал глубин 2874–2883 м) были изучены комплекс трилобитов добринского уровня, считавшийся раннеордовикским (тремадокским), а также безрамковые брахиоподы и конодонты [5].

Пересмотр геологического и палеонтологического материалов показал, что низы полуденной толщи по современному уровню исследования следует относить к самым верхам верхнего кембрия [8]. Таким образом, граница между кембрием и ордовиком проходит внутри полуденной толщи. Кроме того, авторами предлагается выделить в самостоятельную толщу известняки и аргиллиты в скважине Западно-Новогодняя-210, содержащие брахиоподы, трилобиты и остракоды верхнего ордовика (ранее они были отнесены к верхней части полуденной толщи) [8].

В пределах Нюрольского СФР скважинами на Соболиной площади установлены предположительно нижнепалеозойские (кембро-ордовикские) отложения. Толща сложена сильно дислоцированными вишневыми глинистыми сланцами, зелено-серыми метапесчаниками, пестроцветными филлитами и алевролитами, а также серицит-альбит-кварцевыми и кварц-альбит-хлоритовыми сланцами. Фауна не обнаружена. Стратиграфическое положение толщи определяется по аналогии с фациально близкой горно-алтайской серией Алтае-Саянской области [9, 10]. Возраст соболиной толщи может быть принят как позднекембрийский – раннеордовикский. Выше залегает павловская толща, представленная известняками тонкозернистыми, рассланцованными зеленоцветными, алевролитами известковистыми, аргиллитами, песчаниками (мощность более 250 м).

В Ермаковском СФР в скважине 11 Малохетской площади в интервале глубин 1143–1800 м пройдена карбонатная толща с фауной мшанок ордовика, а также с обломками створок брахиопод, остракод и водорослей [6, 11].

В пределах Вездеходного СФР нижнеордовикские отложения представлены няргинской тол-

щей. Стратотип толщи установлен в разрезе скважины Няргинская 1 (интервал 2948,7–2756,4 м, мощность 193 м). Породообразующие водоросли *Nuiasibirica* Masl., обнаруженные в известняках, позволяют сопоставить отложения няргинской толщи с нижнеордовикской усть-кутской свитой Сибирской платформы [12]. Толща с *Nuiasibirica* несогласно перекрыта туфами и эффузивными породами дунаевской толщи девона (интервал 2756,4–2714,3 м, мощность 42,4 м) [5, 10]. Усть-кутская свита Средней Сибири, слабо охарактеризованная палеонтологически, отвечает мансийскому, лопарскому и няйскому горизонтам тремадока нижнего отдела ордовика [12].

Верхняя часть ордовика прослежена в Нюрольской впадине и характеризуется в разрезе разнообразными литологическими типами пород – от органогенных до микросгустковых. В стратотипе павловской свиты (Мыльджинская площадь, скважина 56), охарактеризованной фауной ордовика, песчаники известковистые зеленовато-серые чередуются в разрезе с известняками серыми лито-биокластическими, иногда сильно «опесчаненными», алевролитами и аргиллитами известковистыми. Угол слоистости меняется от 30 до 70 градусов. Найденные остатки скелетной фауны мшанок, табулят, строматопороидей, а также брахиопод и конодонтов указывает на карадок-ашгилский возраст толщи [5, 9]. В шлифах в известняках отмечается обилие биокластического материала, погруженного в микросгустковую основную массу, на некоторых участках – пелмикритовую [10].

#### Особенности осадконакопления в ордовике

На смену водорослевой доминанте в карбонатных постройках венда и кембрия с середины ордовика пришли скелетные организмы – каркасостроители, которые сильно повлияли на осаждение карбонатного материала на мелководном шельфе. Особенности биогенного карбонатонакопления в раннем палеозое посвящены многочисленные публикации [13–22].

Карбонатонакопление в венде и кембрии лишь в некоторой степени предопределило распространение карбонатных отложений в ордовике ЗСГ [2, 3, 13–15, 18].

Вышеизложенный материал о распространении ордовикских отложений на территории ЗСГ показывает, что в центральной и западной частях осадочного бассейна в ордовикский период происходило излияние эффузивных пород: базальтов (Тагильский СФР), андезитов и метабазальтов, эффузивов основного и среднего состава (Красноленинский, Уватский СФР).

Унаследованное накопление осадков на протяжении ордовикского периода происходило на территории Тагильского, Березово-Сартыньинского, Шеркалинского, Красноленинского, Вездеходного и Ермаковского СФР. Отличительные особенности осадконакопления в разные эпохи периода прослежены в пределах пяти СФР: Уватского, Ишимско-

го, Варьеганского, Нюрольского и Новопортовского СФР.

Территорию Ишимского и Уватского СФР можно рассматривать совместно. В пределах Уватского СФР в раннем и большей части среднего ордовика накапливались мощные (до 2000 м) осадки, литологически выраженные сланцами, аргиллитами, алевролитами, песчаниками, кварцитами, известняками с телами эффузивов основного и среднего состава, и только в конце среднего и весь поздний ордовик изливались лавы базальтового, андезитобазальтового и дацитового состава (добавились кислые эффузивы дацитового состава) и их туфы, что указывает на присутствие в ордовикском периоде на территории Уватского СФР участков суши. На территории сопредельного Ишимского СФР в это время накапливались известковистые песчаники, кремнисто-глинистые сланцы.

Изменения в составе отложений среднего и верхнего ордовика установлены для территорий Нюрольского и Варьеганского СФР. Окружающие их территории выглядят относительно стабильными. В пределах Уватского СФР наблюдалось изменение состава изливающихся магм.

По результатам изучения и обобщения геологических данных территорию осадконакопления ЗСГ в раннем ордовике можно четко подразделить на четыре зоны (рис. 1). В западной части ЗСГ выделена зона I, характеризующаяся наличием излияний лав основного и среднего состава, их туфов, накоплением терригенных, кремнистых и кремнисто-глинистых осадков, установленных бурением в пределах Тагильского, Березово-Сартыньинского, Шеркалинского, Красноленинского и Уватского СФР.

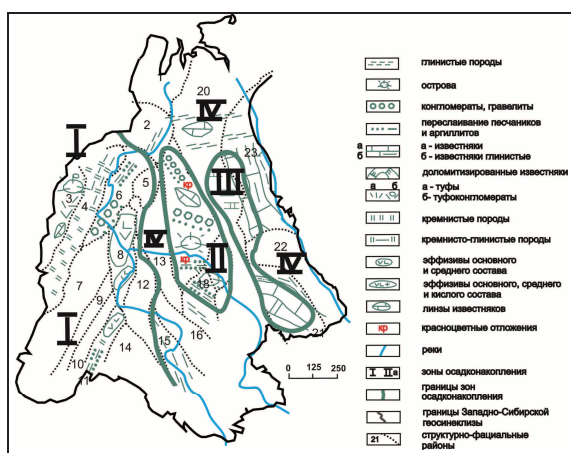


Рис. 2. Палеогеографическая карта распространения нижнеордовикских отложений на территории Западно-Сибирской геосинеклизы: наименование структурно-фациальных районов (СФР) см. на рис. 1

Fig. 2. Paleogeographic distribution map of the Lower Ordovician deposits in the territory of the West Siberian geosyncline: names of structure-facies areas are in Fig. 1

Зона II (Варьеганский и, частично, Нюрольский СФР) представлена участком суши или архи-

пелагом островов, с накоплением терригенных, участками красноцветных осадков с небольшими участками накопления известняков.

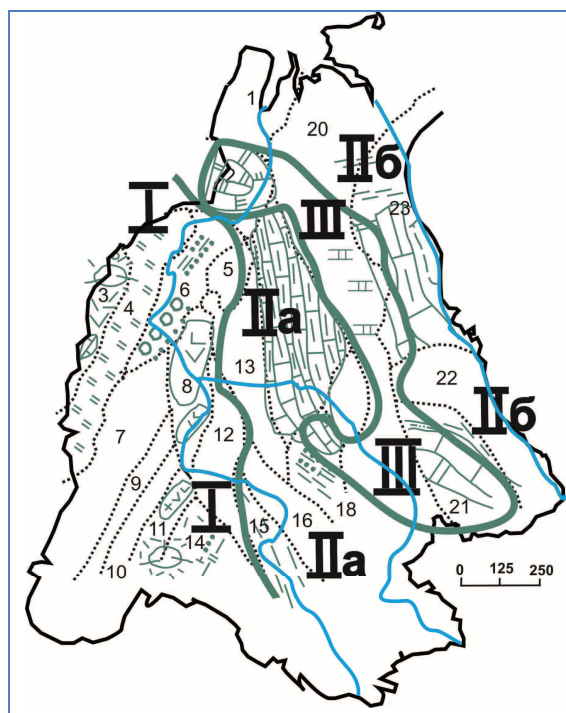


Рис. 3. Палеогеографическая карта распространения средне-верхнеордовикских отложений на территории Западно-Сибирской геосинеклизы. Условные обозначения и наименование СФР см. на рис. 1

Fig. 3. Paleogeographic distribution map of the middle-upper Ordovician deposits in the territory of the West Siberian geosyncline. Symbols and names are the same as in Fig. 1

Зона III охватывает территорию формирования карбонатной платформы. В неё входят части Вездоходного, Ермаковского, предположительно продолжающиеся в пределах Колпашевского СФР. Карбонатная платформа в восточном и северном направлениях сменяется зоной осадконакопления глинистых карбонатных илов, иногда фиксируется переслаивание карбонатных и глинистых осадков (зона IV). Появление глин может указывать на погружение в раннем ордовике дна палеобассейна на территории Новопортовского, части Нюрольского и части Ермаковского СФР. В пределах Тевризского СФР в раннем ордовике формировались глинистые осадки (зона IV) (рис. 2).

Для среднего и позднего ордовика (рис. 2) отмечено изменение структурного плана. Зона I сохраняется унаследовано: к установленным для нижнего ордовика отложениям добавляются известковистые песчаники и кремнисто-глинистые сланцы (Ишимский СФР); к основным и средним эффузивам, выявленным для нижнего ордовика в пределах Уватского СФР, в верхнем ордовике добавляются кислые дациты.

В среднем и позднем ордовике площадь карбонатной платформы (зона III) в западном направле-



нии увеличивается за счет развития карбонатных фаций на участках Нюрольского СФР, а в конце среднего и весь поздний ордовик карбонатная платформа формируется и в пределах Новопортовского СФР.

Зона III оконтурена осадками зоны II, которую можно подразделить на подзоны Па и Пб. Подзона Па в значительной степени соответствует западному участку зоны II нижнего ордовика. Здесь установлено развитие глинистых известняков (Варьганский СФР). В самом начале среднего ордовика в пределах Тевризского СФР еще продолжалось формирование глинистых осадков (калачинская толща), что позволяет предположить накопление глинистых и терригенно-глинистых осадков и на части территории Нюрольского СФР.

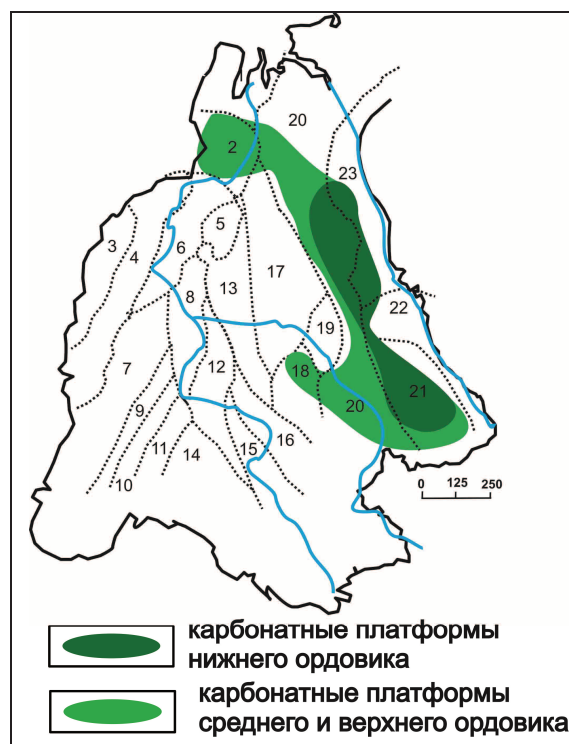
#### Трансгрессия в ордовике

Можно предположить, что в течение ордовикского периода территория центральной и восточной частей ЗСГ подверглась длительной трансгрессии, сопровождаемой углублением дна бассейна. Особенно отчетливое прогибание отмечено в районе формирования в раннем ордовике красноцветных осадков (Варьганский СФР, зона II), которые в среднем и позднем ордовике сменяются относительно глубоководными глинистыми карбонатными илами. Площадь карбонатной платформы (рис. 3) в раннем ордовике весьма незначительная, в среднем и позднем ордовике заметно наращивается в западном направлении.

Западная часть территории ЗСГ в течение всего ордовика представляла собой приподнятую зону, в пределах которой существовали острова, изливались лавы, в относительно погруженных участках накапливались кремнистые и кремнисто-глинистые осадки.

#### Выводы

1. В раннем ордовике в центральной части ЗСГ существовали островки суши (архипелаг островов). С востока к ним примыкали фации формирующейся карбонатной платформы, проявленные в виде узкой зоны северо-западного простирания. Эти образования были окружены участками относительно глубоководного моря, где накапливались глинистые известняки и аргиллиты. В западной части ЗСГ существовала зона с островами, вулканами, происходило изливание лав основного и среднего состава, кремне-накопление.



**Рис. 4.** Развитие карбонатных платформ в ордовикских образованиях на территории Западно-Сибирской геосинеклизы

**Fig. 4.** The development of carbonate platforms during the Ordovician formations in the territory of West Siberian geosyncline

2. В среднем и позднем ордовике в результате осуществления трансгрессии произошло углубление морского бассейна, в результате чего зона карбонатонакопления увеличилась по площади. Существовавший ранее участок суши (архипелаг островов) прекратил свое существование. Зона формирования карбонатной платформы окружена относительно глубоководным морем, в пределах которого накапливались глинистые карбонатные илы и глины. Зона проявления вулканизма, размываемых островов и кремне-накопления, находящаяся в западной части ЗСГ, в течение всего ордовика значительных изменений не претерпела.
3. В течение ордовика в зоне формирования карбонатных платформ осуществлялась фаза трансгрессии, что привело к некоторому увеличению площади их накопления от раннего к позднему ордовика.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Конторович В.А. Сейсмогеологические критерии нефтегазоносности зоны контакта палеозойских и мезозойских отложений Западной Сибири (на примере Чузикско-Чижаской зоны нефтегазоаккумуляции) // Геология и геофизика. – 2007. – Т. 48. – № 5. – С. 538–547.
2. Литология и особенности формирования вендских отложений в юго-восточной части Западно-Сибирской геосинеклизы / А.Е. Ковешников, В.А. Конторович, С.Н. Макаренко, Г.М. Татьяна, А.А. Терлеев, Д.А. Токарев // Известия Томского политехнического ун-та. – 2014. – Т. 324. – № 1. – С. 23–31.
3. Особенности формирования кембрийских отложений юго-восточной части Западно-Сибирской геосинеклизы / А.Е. Ковешников, В.А. Конторович, С.Н. Макаренко, Г.М. Татьяна, А.А. Терлеев, Д.А. Токарев // Известия Томского политехнического ун-та. – 2014. – Т. 325. – № 1. – С. 16–27.
4. Стратиграфия нефтегазоносных бассейнов Сибири. Палеозой Западной Сибири / Е.А. Елкин, В.И. Краснов, Н.К. Бахарев, Е.В. Белова, В.Н. Дубатовол, Н.Г. Изох, А.Г. Клец, А.Э. Конторович, Л.Г. Перегудов, Н.В. Сенников, И.Г. Тимохина, В.Г. Хромых. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «ГЕО», 2001. – 163 с.
5. Решения межведомственного стратиграфического совещания по рассмотрению и принятию региональной стратиграфической схемы палеозойских образований Западно-Сибирской равнины / под ред. В.И. Краснова. – Новосибирск: СНИИГ-ГИМС, 1999. – 80 с.
6. Богущ О.И., Бочкарев В.С., Юферев О.В. Палеозой юга Западно-Сибирской равнины. – Новосибирск: СО «Наука», 1975. – 44 с.
7. Стратиграфия и литология палеозойских отложений центральных районов Западно-Сибирского НГБ / Н.В. Сенников, Е.А. Елкин, В.И. Краснов, Н.К. Бахарев, Н.Г. Изох, А.Е. Ковешников, А.В. Каныгин, А.Г. Клец, О.Т. Обут // Материалы I Всероссийской научной конференции с участием иностранных ученых «Фундамент, структуры обрамления Западно-Сибирского мезозойско-кайнозойского осадочного бассейна, их геодинамическая эволюция и проблемы нефтегазоносности. – Тюмень; Новосибирск, 2008. – С. 187–189.
8. Бочкарев В.С., Брехунцов А.М. Схема тектоники Урало-Сибирского региона // Горные ведомости. – 2015. – № 10. – С. 6–39.
9. Исаев Г.Д. Кораллы, биостратиграфия и геологические модели палеозоя Западной Сибири. – Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2007. – 247 с.
10. Макаренко С.Н., Савина Н.И., Татьяна Г.М. Стратиграфия кембрия и ордовика юго-востока Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции // Горные ведомости. – 2014. – № 3. – С. 44–55.
11. Бочкарев В.С., Шнип О.А. Стратиграфия и фашии палеозойских образований центральных и южных районов Западной Сибири // Стратиграфия и фашии фанерозоя Западной Сибири: труды ЗапСибНИГНИ, 1982. – Вып. 169. – С. 67–85.
12. Решения всесоюзного стратиграфического совещания по докембрию, палеозою и четвертичной системе Средней Сибири. Ч. I (верхний докембрий и нижний палеозой). – Новосибирск: Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья, 1983. – 215 с.
13. Геологическое строение доюрского основания Западно-Сибирской плиты в пределах Кеть-Тымского междуречья / Г.Д. Исаев, С.Н. Макаренко, М.Е. Раабен, В.И. Биджаков, И.И. Коптев. – Новосибирск: Новосибирский государственный университет, 2003. – 34 с.
14. Разрез переходных венд-кембрийских отложений восточной части Западно-Сибирской геосинеклизы (по результатам бурения параметрической скважины Восток-3) / А.Э. Конторович, А.И. Варламов, Д.В. Гражданкин, Г.А. Карлова, А.Г. Клец, В.А. Конторович, С.В. Сараев, А.А. Терлеев, С.Ю. Беляев, И.В. Варакина, А.С. Ефимов, Б.Б. Кочнев, К.Е. Наговицин, А.А. Постников, Ю.Ф. Филиппов // Геология и геофизика. – 2008. – № 12. – С. 1238–1247.
15. Новые биостратиграфические данные по осадочным образованиям «домезозойского» фундамента Западно-Сибирской геосинеклизы в северо-западной части Томской области (материалы параметрической скважины Чкаловская-501) / А.А. Терлеев, Д.А. Токарев, Н.В. Сенников, А.Е. Ковешников, С.Н. Макаренко // Материалы II Всероссийской научной конференции с участием иностранных ученых «Фундамент, структуры обрамления Западно-Сибирского мезозойско-кайнозойского осадочного бассейна, их геодинамическая эволюция и проблемы нефтегазоносности. – Тюмень; Новосибирск, 2010. – С. 159–161.
16. Уилсон Дж.Л. Карбонатные фашии в геологической истории. – М.: Недра, 1980. – 463 с.
17. Обстановки осадконакопления и фашии / под ред. Х. Рединга. Т. 1. – М.: Мир, 1990. – 381 с.
18. New paleontological data from the Upper Vendian of the Chkalovskoe Territory of the Fore-Yenisei segment of the West Siberian Megabasin (boreholes 10, 17, 26, 501) / A.A. Terleev, D.A. Tokarev, V.A. Kontorovich, S.N. Makarenko, A.E. Koveshnikov, N.V. Sennikov, G.M. Tatianin // Neoproterozoic sedimentary basins: stratigraphy, geodynamics and petroleum potential: Proc. of the International conference. – Novosibirsk, 30 July – 02 August, 2011. – P. 100–102.
19. Wilson J.L. Carbonate Facies in Geologic History. – Berlin: Springer, 1975. – 471 p.
20. Loydell D.K. Graptolite biozone correlation chart // Geological Magazine. – 2011. – V. 149. – P. 129–132.
21. Alberstadt L.P., Walker K.R. Stages of ecological succession in lower Paleozoic reefs of North America. Geol. Soc. America, Inter. Sediment. Congress. – Boulder, Colorado, 1973. – V. 5. – № 7. – P. 530–532.
22. Alberstadt L.P., Walker K.R., Zurawski R.P. Patch reefs in the Carters Limestone (Middle Ordovician) in Tennessee and vertical zonation in Ordovician reefs // Geol. Soc. Am. Bull. – 1974. – № 85. – P. 1171–1182.

Поступила 03.12.2015 г.

UDC 553.984;552.54

## LOCALIZATION OF CARBONATE PLATFORMS IN ORDOVICIAN FORMATIONS OF WEST-SIBERIAN GEOSYNECLISE

**Aleksandr E. Koveshnikov,**

Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia; Tomsk branch of the Institute of petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 4, Akademicheskoy avenue, Tomsk, 634021, Russia. E-mail: Koveshnikov@mail.ru

**Vladimir A. Kontorovich,**

Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia; Tomsk branch of the Institute of petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Akademika Kaptyuga avenue, Novosibirsk, 630090, Russia. E-mail: KontorovichVA@ipgg.sbras.ru

**Svetlana N. Makarenko,**

National Research Tomsk State University, 36, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: s.makarenko@ggf.tsu.ru

**Gennady M. Tatyagin,**

National Research Tomsk State University, 36, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: gmt@mail.tsu.ru

*The relevance of the research lies in the need to increase facilities for searching oil and gas fields, one of which is a carbonate platform in the pre-Jurassic formation of West Siberia. The discovery of a number of oil and gas fields: Urmanskoye, Archinskoye and several others, are related to carbonate platforms in the territory of West Siberian geosyncline (WSG).*

**The aim** of the research is to consider the conditions of formation of the Ordovician depositions of West Siberian geosyncline for establishing in its territory the sites for the formation of carbonate rocks (carbonate platforms), which are transformed into rock-collectors at the appropriate studying by hydrothermal leaching and hydrothermal dolomitization. The fissure-metasomatic zones of hydrothermal study of carbonate rocks are formed. They underlie the area zones of formation of reservoir rocks in the regions of the Paleozoic formations discharge on the pre-Jurassic surface, or zones of oil and gas horizon of the contact zone, contact areas of Paleozoic (pre-Jurassic) and Mesozoic deposits.

**Research methods:** lithological, paleontological, paleogeographic, tectonic. On the basis of complexity of the research methods by the previous researchers, the WSG territory is divided into 23 structural-facial districts (SFD), with a characteristic set of lithostratigraphic units (sweet, thick) and paleontological substantiation of the age. By the results of the study the authors have reconstructed the paleogeographic conditions, conditions of accumulation and distribution of precipitation in the early and middle-late Ordovician time. The greatest attention is paid to the establishment of formation areas of carbonate rocks prospective for forming reservoir rocks. The tectonic analysis allowed comparing the phases of development of carbonate platforms of early and middle-late Ordovician age for determining the tectonic movements that promote the increase or reduction of carbonate platforms.

**Results.** The paper introduces the information on distribution of lower-, middle-upper Ordovician deposits in the territory of WSG. The authors reconstructed the conditions of sedimentation during the Ordovician period, built schematic paleogeographic maps of early and middle-late Ordovician age, and a complex map of distribution of the identified carbonate platforms of early and middle-late Ordovician age. The conclusions were made on the tectonic history of WSG during the Ordovician, in particular the manifestation of the transgressive phases in the zone of formation the carbonate platforms of the Ordovician age.

### Key words:

Ordovician sediments, carbonate platform, West Siberian geosyncline (WSG), structural-facies district (SFD), suite formation, strata, depositional features.

### REFERENCES

1. Kontorovich V.A. Seismogeologicheskie kriterii neftegazonosnosti zony kontakta paleozoyskikh i mezozoyskikh otlozheniy Zapadnoy Sibiri (na primere Chuziksko-Chizhapskoy zony neftegazonakoplniya) [Seismological criteria of oil-and-gas content of contact zone of Paleozoic and Mesozoic sediments in Western Siberia (by the example of Chuziksky-Chizhapsky zone of oil and gas accumulation)]. *Geology and Geophysics*, 2007, vol. 48, no. 5, pp. 538–547.
2. Koveshnikov A.E., Kontorovich V.A., Makarenko S.N., Tatyagin G.M., Terleev A.A., Tokarev D.A. Litologiya i osobennosti formirovaniya vendskikh otlozheniy Zapadno-Sibirskoy geosineklizy [Lithology and features of formation of Vendian deposits in the south-eastern part of West-Siberian geosyncline]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 324, no. 1, pp. 23–31.
3. Koveshnikov A.E., Kontorovich V.A., Makarenko S.N., Tatyagin G.M., Terleev A.A., Tokarev D.A. Osobennosti formirovaniya kembriyskikh otlozheniy yugo-vostochnoy chasti Zapadno-Sibirskoy geosineklizy [Features of formation of Cambrian sediments in south-eastern part of West-Siberian geosyncline]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 325, no. 1, pp. 16–27.
4. Elkin E.A., Krasnov V.I., Bakharev N.K., Belova E.B., Dubatolov V.N., Izokh N.G., Klets A.G., Kontorovich A.E., Peregodov L.G., Sennikov N.V., Timokhina N.G., Khromykh V.G. *Strata-*

- tigrafiya neftegazonosnykh basseynov Sibiri. Paleozoy Zapadnoy Sibiri* [The stratigraphy of oil and gas basins of Siberia. Paleozoic of Western Siberia]. Novosibirsk, SB RAS Publ. house, 2001. 163 p.
5. *Resheniya mezhdovedstvennogo stratigraficheskogo soveshchaniya po rassmotreniyu i prinyatiyu regionalnoy stratigraficheskoy skhemy paleozoiskikh obrazovaniy Zapadno-Sibirskoy ravniny* [The decision of Interdepartmental Stratigraphic Meeting on the consideration and adoption of regional stratigraphic schemes of Paleozoic of West-Siberian Plain]. Ed. by V.I. Krasnov. Novosibirsk, Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources, 1999. 80 p.
  6. Bogush O.I., Bochkarev V.S., Yuferev O.V. *Paleozoy uga Zapadno-Sibirskoy ravniny* [Paleozoic of south of the West-Siberian Plain]. Novosibirsk, Nauka Siberian branch, 1975. 44 p.
  7. Sennikov N.V., Elkin E.A., Krasnov V.I., Bakharev N.K., Izokh N.G., Koveshnikov A.E., Kanygin A.V., Klets A.G., Obut O.T. *Stratigrafiya i litologiya paleozoiskikh otlozheniy tsentralnykh rayonov Zapadno-Sibirskogo Neftegazonosnogo basseyna* [Stratigraphy and lithology of Paleozoic sediments of the central areas of the West Siberian OGB]. *Fundament, struktury obramleniya Zapadno-Sibirskogo mezozoysko-kaynozoysskogo osadochnogo basseyna, ikh geodinamicheskaya evolyutsiya i problemy neftegazonosnosti. Trudy I Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii s uchastiem inostrannykh uchenykh* [Foundation, framing the structure of the West-Siberian Mesozoic and Cenozoic sedimentary basin, their geodynamic evolution and problems of oil and gas potential. Proc. I All-Russian scientific conference with participation of foreign scientists]. Tyumen, Novosibirsk, 2008. pp. 187–189.
  8. Bochkarev V.S., Brekhuntsov A.M. *Skhema tektoniki Uralo-Sibirskogo regiona* [Diagram of tectonics of Ural-Siberian region]. *Gornye Vedomosti*, 2015, no. 10, pp. 6–39.
  9. Isaev G.D. *Korally, biostratigrafiya i geologicheskie modeli paleozoiya Zapadnoy Sibiri* [Corals, biostratigraphy and geological models of Paleozoic of Western Siberia]. Novosibirsk, Geo Academic Publ., 2007. 247 p.
  10. Makarenko S.N., Savina M.I., Tatyannin G.M. *Stratigrafiya kembriya i ordovika yugo-vostoka Zapadno-Sibirskoy neftegazonosnoy provinttsii* [Stratigraphy of Cambrian and Ordovician of south-east of the West-Siberian oil and gas province]. *Gornye vedomosti*, 2014, no. 3, pp. 44–55.
  11. Bochkarev V.S., Shnip O.A. *Stratigrafiya i fatsii paleozoiskikh obrazovaniy tsentralnykh i yuzhnykh rayonov Zapadnoy Sibiri* [Stratigraphy and facies of Paleozoic of central and southern regions in Western Siberia]. *Stratigrafiya i fatsii fanerozoia Zapadnoy Sibiri* [Stratigraphy and facies of Phanerozoic of Western Siberia]. Tyumen, 1982. Iss. 169, pp. 67–85.
  12. *Resheniya vsesoyuznogo stratigraficheskogo soveshchaniya po dokembriyu, paleozoyu i chetvertichnoy sisteme Sredney Sibiri. Ch. 1. Verkhniy dokembriy i Nizhniy paleozoy*. [Solutions of the stratigraphic meeting on the Precambrian, Paleozoic and Quaternary System of Central Siberia. Vol. 1. Upper Precambrian and Lower Paleozoic]. Novosibirsk, Novosibirsk Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources, 1983. 215 p.
  13. Isaev G.D., Makarenko S.N., Raaben M.E., Bidzhakov V.I., Koptev I.I. *Geologicheskoe stroenie doyrskogo osnovaniya Zapadno-Sibirskoy plity v predelakh Ket-Tymskogo mezhdurechya* [The geological structure of pre-Jurassic basement of the West Siberian plate within the Ket-Tymsky interfluves]. Novosibirsk, Novosibirsk State University, 2003. 34 p.
  14. Kontorovich A.E., Varlamov A.I., Grazhdankin D.V., Karlova G.A., Klets A.G., Kontorovich V.A., Saraev S.V., Terleev A.A., Belyaev S.Yu., Varaksina I.V., Efimov A.S., Kochnev B.B., Nagovitsyn K.E., Postnikov A.A., Filippov Yu.F. *Razrez perekhodnykh vend-kembriyskikh otlozheniy vostochnoy chasti Zapadno-Sibirskoy geosineklizy (po rezultatam bureniya parametricheskoy skvazhiny Vostok-3)* [Cut transient of Vendian-Cambrian deposits of the eastern part of the West Siberian geosyncline (based on parametric drilling wells Vostok-3)]. *Geology and Geophysics*, 2008, no. 12, pp. 1238–1247.
  15. Terleev A.A., Tokarev D.A., Sennikov N.V., Koveshnikov A.E., Makarenko S.N. *Novye biostratigraficheskie dannye po osadochnym obrazovaniyam «domezozoyskogo» fundamenta Zapadno-Sibirskoy geosineklizy v severo-zapadnoy chasti Tomskoy oblasti (materialy parametricheskoy skvazheny Chkalovskaya-501)* [New biostratigraphic data on sedimentary formations of «pre-Mesozoic» basement of the West Siberian geosyncline in north-western part of the Tomsk region (materials of parametric well Chkalovskaya-501)]. *Trudy II Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii s uchastiem inostrannykh uchenykh «Fundament, struktury obramleniya Zapadno-Sibirskogo mezozoysko-kaynozoysskogo osadochnogo basseyna, ikh geodinamicheskaya evolyutsiya i problemy neftegazonosnosti»* [Foundation, framing the structure of the West Siberian Mesozoic and Cenozoic sedimentary basin, their geodynamic evolution and problems of oil and gas potential. Proc. All-Russian scientific conference with participation of foreign scientists]. Tyumen, Novosibirsk, 2010. pp. 159–161.
  16. Wilson J.L. *Karbonatnye fatsii v geologicheskoy istorii* [Carbonate facies in geological history]. Moscow, Nedra Publ., 1980. 463 p.
  17. *Obstanovki osadkonakopleniya i fatsii* [Depositional of environment and facies]. Ed. by H. Reading. Moscow, Mir Publ., 1990. Vol. 1, 381 p.
  18. Terleev A.A., Tokarev D.A., Kontorovich V.A., Makarenko S.N., Koveshnikov A.E., Sennikov N.V., Tatyannin G.M. *New paleontological data from the Upper Vendian of the Chkalovskoe Territory of the Fore-Yenisei segment of the West Siberian Megabasin (boreholes 10, 17, 26, 501). Neoproterozoic sedimentary basins: stratigraphy, geodynamics and petroleum potential: Proc. of the International conference*. Novosibirsk, 30 July – 02 August, 2011. pp. 100–102.
  19. Wilson J.L. *Carbonate Facies in Geologic History*. Berlin, Springer, 1975. 471 p.
  20. Loydell D.K. *Graptolite biozone correlation char. Geological Magazine*, 2011, vol. 149, pp. 129–132.
  21. Alberstadt L.P., Walker K.R. *Stages of ecological succession in lower Paleozoic reefs of North America. Geol. Soc. America, Inter. Sediment. Congress*. Boulder, Colorado, 1973. Vol. 5, no. 7, pp. 530–532.
  22. Alberstadt L.P., Walker K.R., Zurawski R.P. *Patch reefs in the Carters Limestone (Middle Ordovician) in Tennessee and vertical zonation in Ordovician reefs. Geol. Soc. Am. Bull.*, 1974, no. 85, pp. 1171–1182.

Received: 3 December 2015.

УДК 51-73

## РАЗРЕШИМОСТЬ КРАЕВЫХ ЗАДАЧ, ОПИСЫВАЮЩИХ ДИФФУЗИЮ АТОМОВ ПЛЕНКИ В ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ОБРАЗОВАНИИ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУР

**Тарасенко Елена Олеговна,**

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры прикладной математики и математического моделирования Института естественных наук и математики Северо-Кавказского федерального университета, Россия, 355000, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1, корп. 2. E-mail: galail@mail.ru

**Гладков Андрей Владимирович,**

старший преподаватель кафедры прикладной математики и математического моделирования Института естественных наук и математики Северо-Кавказского федерального университета, Россия, 355000, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1, корп. 2. E-mail: gavandrew@mail.ru

**Маликова Наталья Владимировна,**

учитель математики и информатики средней общеобразовательной школы № 1, Россия, 356250, Ставропольский край, с. Грачевка, ул. Советская, 47. E-mail: nmalik\_@mail.ru

**Актуальность работы.** Добыча георесурсов требует создания новых технологических решений их производства, например, покрытие буровых шнеков средствами для защиты от коррозии. Решение указанной задачи возможно при использовании диффузионного нанесения тонкой пленки (антикоррозийное вещество) на подстилающую поверхность (шнек). Математизация такого физического процесса, как диффузионный рост тонких пленок на подстилающей поверхности, в настоящее время является малоисследованной. При математическом моделировании часто возникает вопрос о существовании и единственности решения краевых задач, описывающих указанный физический процесс. Многие отечественные и зарубежные ученые проводили исследования по решению аналитическими и численными методами начально-граничных задач, в которых изначально явно или неявно допускается, что решение рассматриваемой задачи существует и единственно. Как правило, авторы публикаций, посвященных различным проблемам математического моделирования диффузии, либо вообще не затрагивают этот вопрос (о существовании и единственности решения), либо без должного на то основания ссылаются на классические работы. Поэтому исследования на разрешимость краевых задач, проводимые в данной работе, являются актуальными.

**Цель исследования.** Разработать критерии разрешимости (существование и единственность) краевых задач, возникающих при математическом моделировании роста тонкопленочных структур на подстилающей поверхности, в различных пространствах.

**Методы исследования.** Достижение поставленной цели основывается на корректном использовании результатов и методов уравнений математической физики, интегральных уравнений, математического анализа, уравнений в частных производных, физики твердого тела, кристаллографии.

**Результаты.** Проведено исследование на разрешимость краевых задач, описывающих диффузионный рост тонких пленок на подложках; разработаны критерии существования и единственности решения указанных задач в различных пространствах.

**Выводы.** В ходе проведения исследований при математическом моделировании диффузионного роста тонкой пленки на подстилающей поверхности были разработаны теоремы (критерии), обеспечивающие разрешимость (существование и единственность решения) начально-граничных задач. Рассмотрены краевые задачи для случаев полного отражения и поглощения атомов пленки подстилающей поверхностью. Настоящая статья представляет значительный интерес в прикладных исследованиях, позволяет ответить на вопрос: можно ли сразу приступить к численному (или, возможно, аналитическому) решению конкретно рассматриваемой краевой задачи, описывающей диффузионный рост тонкопленочных структур на подложках, или дополнительно проводить исследования по ее регуляризации.

### **Ключевые слова:**

Разрешимость, краевая задача, тонкая пленка, подстилающая поверхность, подложка, диффузионный рост.

Необходимость обработки больших массивов информации в реальном масштабе времени ставит задачу создания устройств функциональной электроники, объединяющих функции ввода, преобразования и вывода информации для последующей её обработки в цифровом коде с помощью традиционных принципов. Создание таких устройств упирается в изучение физического процесса – диффузии, возникающей в процессе роста тонких пленок на подложках. Исследованию такого процесса

посвящено значительное число работ [1–13], как отечественных, так и зарубежных исследователей. Задача диффузионного роста тонких пленок на подложках имеет широкое практическое применение в опто- и микроэлектронике, является прикладной задачей технологией георесурсов.

При математическом моделировании процесса диффузионного роста тонкой пленки на подстилающей поверхности возникает вопрос о разрешимости таких моделей.

В теории и практике современных исследований процесса диффузии, возникающей при образовании тонкопленочных структур, используются две начально-граничные задачи [3, 5, 14]. Одна из которых в самой общей постановке имеет вид:

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \sum_{i=1}^3 u_i \frac{\partial q}{\partial x_i} + \alpha q = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i} K_{ij} \frac{\partial q}{\partial x_j} + f, \quad (1)$$

$$K_{ij} = K_{ji}, \quad i, j = 1, 2, 3,$$

$$\sum_{i=1}^3 u_i \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0, \quad (2)$$

$$t \in [0, T], \quad 0 < T < +\infty, \quad (x_1, x_2, x_3) \in G, \\ q(t, x_1, x_2, x_3) \geq 0, \quad t \in [0, T], \quad (x_1, x_2, x_3) \in G, \quad (3)$$

$$q(0, x_1, x_2, x_3) = \varphi(x_1, x_2, x_3), \quad (4)$$

$$q(t, x_1, x_2, x_3)|_{\partial G} = \psi(x_1, x_2, x_3). \quad (5)$$

Вторая начально-граничная задача представляется в виде (1)–(4) и граничного условия

$$\left. \left\{ \frac{\partial q}{\partial \nu} + \beta q \right\} \right|_{\partial G_0} = V, \quad (6)$$

где  $q(t, x_1, x_2, x_3)$  – функция, значения которой в каждый момент времени  $t \in [0, T]$  совпадает со средним значением концентрации атомов пленки в связанной области  $G$ ,  $\partial G = \partial G_0 \cup \partial G_1 \cup \partial G_2$ ,  $\partial G_0$  – нижняя,  $\partial G_1$  – боковая,  $\partial G_2$  – верхняя части границы  $\partial G$ ,  $G = G \cup \partial G$ ;  $u_i = u_i(t, x_1, x_2, x_3)$ ,  $i = 1, 2, 3$  – функции, значения которых совпадают со значениями средней скорости горизонтального переноса в момент  $t$  в точке  $(x_1, x_2, x_3)$  соответственно вдоль осей  $Ox_1$ ,  $Ox_2$ ,  $Ox_3$  (рассматривается декартова прямоугольная система координат);  $\alpha = \alpha(t, x_1, x_2, x_3)$  – функция, характеризующая взаимодействие атомов пленки с окружающей средой (или их радиоактивный распад) в момент  $t$  в точке  $(x_1, x_2, x_3)$ ;  $K_{ij} = K_{ij}(t, x_1, x_2, x_3)$ ,  $i, j = 1, 2, 3$  – элементы матрицы коэффициентов диффузии атомов пленки в подстилающей поверхности;  $f = f(t, x_1, x_2, x_3)$  – функция, моделирующая источник атомов пленки (функция источника);  $\varphi = \varphi(t, x_1, x_2, x_3)$  – функция, значения которой в точке  $(x_1, x_2, x_3) \in G$  в момент времени  $t_0$  совпадает со значениями концентрации атомов пленки (функция, описывающая фоновую концентрацию);  $\frac{\partial q}{\partial \nu}$  – производная по внутренней нормали  $\partial G_0$ :

$$\frac{\partial q(t, x)}{\partial \nu(t, x)} = \lim_{y \rightarrow x} \sum_{j=1}^3 K_{ij}(t, x) \cos(N, x) \frac{\partial q(t, x)}{\partial y_j}, \quad (7)$$

$$x = x(x_1, x_2, x_3), \quad y = y(y_1, y_2, y_3),$$

где  $N$  – внутренняя нормаль к  $\partial G_0$  в точке  $x \in \partial G_0$ ;  $K$  – конечный, замкнутый конус с вершиной  $x \in \partial G_0$ , который содержится в  $G + \{x\}$ ;  $\beta(t, x_1, x_2, x_3)$  – функция, характеризующая гравитационное осаждение атомов пленки на  $\partial G_0$ ;  $V(t, x_1, x_2, x_3)$  – скорость осаждения атомов пленки на  $\partial G_0$ ,  $t \in [0, T]$ ,  $(x_1, x_2, x_3) \in G_0$ .

Функция источника атомов пленки  $f$  задается в виде [14, 15]:

$$f(t, x_1, x_2, x_3) = Q(t, x_1, x_2, x_3) \delta(t, x_1, x_2, x_3), \quad (8)$$

где  $Q(t, x)$  – мощность источника атомов пленки (масса атомов пленки, выбрасываемых в области  $G$  в момент  $t$  в точке  $x \in G$ ),  $\delta(t, x)$  – дельта-функция Дирака. При этом, если источник является ( $t_0$  – момент начала действия источника):

1) точечным, сосредоточенным в точке  $x^0 = (x_1^0, x_2^0, x_3^0) \in \bar{G}$ ,  
1.1) мгновенного действия, то  $Q(t, x) = Q = \text{const}$ ,

$$f(t, x_1, x_2, x_3) = Q \delta(t) \delta(x_1 - x_1^0) \delta(x_2 - x_2^0) \delta(x_3 - x_3^0);$$

1.2) непрерывного действия, то

$$Q(t, x) = Q(t),$$

$$f(t, x_1, x_2, x_3) =$$

$$= Q(t) \delta(t) \delta(x_1 - x_1^0) \delta(x_2 - x_2^0) \delta(x_3 - x_3^0);$$

2) линейным, сосредоточенным на интервале  $[a, b]$  числовой прямой, параллельной оси  $Ox_2$  и пересекающей ось  $Ox_3$  в точке  $(0, 0, x_3^0)$ ,

2.1) мгновенного действия, то

$$Q(t, x_1, x_2, x_3) = \begin{cases} Q(x_2), & x_2 \in [a, b], \\ 0, & x_2 \notin [a, b], \end{cases}$$

$$f(t, x_1, x_2, x_3) = Q(x_2) \delta(t) \delta(x_1 - x_1^0) \delta(x_3 - x_3^0);$$

2.2) непрерывного действия, то

$$Q(t, x_1, x_2, x_3) = \begin{cases} Q(t, x_2), & t \in [0, T], x_2 \in [a, b], \\ 0, & x_2 \notin [a, b], \end{cases}$$

$$f(t, x_1, x_2, x_3) = Q(t, x_2) \delta(t) \delta(x_1 - x_1^0) \delta(x_3 - x_3^0);$$

3) площадным, сосредоточенным на площадке  $S$ , лежащей на плоскости  $x_1 O x_2$  и пересекающей ось  $Ox_3$  в точке  $(0, 0, x_3^0)$ ,

3.1) мгновенного действия, то

$$Q(t, x_1, x_2, x_3) = \begin{cases} Q(x_1, x_2), & x_1, x_2 \in S, \\ 0, & x_1, x_2 \notin S, \end{cases}$$

$$f(t, x_1, x_2, x_3) = Q(x_1, x_2) \delta(t) \delta(x_3 - x_3^0);$$

3.2) непрерывного действия, то

$$Q(t, x_1, x_2, x_3) = \begin{cases} Q(t, x_1, x_2), & t \in [0, T], x_1, x_2 \in S, \\ 0, & x_1, x_2 \notin S, \end{cases}$$

$$f(t, x_1, x_2, x_3) = Q(t, x_1, x_2) \delta(t) \delta(x_3 - x_3^0);$$

4) поверхностным, сосредоточенным на поверхности  $S_{\Pi}$  тела  $\Pi$ ,

4.1) мгновенного действия, то

$$Q(t, x_1, x_2, x_3) = \begin{cases} Q(x_1, x_2, x_3), & (x_1, x_2, x_3) \in S_{\Pi}, \\ 0, & (x_1, x_2, x_3) \notin S_{\Pi}, \end{cases}$$

$$f(t, x_1, x_2, x_3) = Q(x_1, x_2, x_3) \delta(t);$$

4.2) непрерывного действия, то

$$Q(t, x_1, x_2, x_3) =$$

$$= \begin{cases} Q(t, x_1, x_2, x_3), & t \in [0, T], (x_1, x_2, x_3) \in S_{\Pi}, \\ 0, & (x_1, x_2, x_3) \notin S_{\Pi}, \end{cases}$$

$$f(t, x_1, x_2, x_3) = Q(x_1, x_2, x_3).$$

Уравнение (1) можно переписать в эквивалентном виде:

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \sum_{i=1}^3 h_i \frac{\partial q}{\partial x_i} + \alpha q = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 K_{ij} \frac{\partial^2 q}{\partial x_i \partial x_j} + f, \quad (9)$$

$$h_i = u_i - \sum_{j=1}^3 \frac{\partial K_{ij}}{\partial x_j}, \quad i = 1, 2, 3. \quad (10)$$

Следует заметить, что уравнение (9) (а значит, и (1)) совпадает с уравнением из [16]:

$$Lu = f_\Phi, \quad (11)$$

$$Lu = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} \frac{\partial^2 u}{\partial x_i \partial x_j} + \sum_{i=1}^n b_i \frac{\partial u}{\partial x_i} + cu - \frac{\partial u}{\partial t}, \quad (12)$$

при  $n=3$  с точностью до знака у  $f$  и  $f_\Phi$ :  $f$  и  $f_\Phi$  имеют противоположные знаки. Этот факт будет учитываться в приводимых ниже результатах исследования.

Уравнению (1) поставим в соответствие уравнение

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \sum_{i=1}^3 u_i \frac{\partial q}{\partial x_i} + \alpha q = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i} K_{ij} \frac{\partial q}{\partial x_j} + Q, \quad (13)$$

уравнению (9) – уравнение

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \sum_{i=1}^3 h_i \frac{\partial q}{\partial x_i} + \alpha q = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 K_{ij} \frac{\partial^2 q}{\partial x_i \partial x_j} + Q, \quad (14)$$

отличающиеся, соответственно, от (1) и (9) лишь видом функции  $f$ : вместо  $f$ , задаваемой выражением (8), здесь рассматривается мощность источника атомов пленки  $Q$ .

Рассмотрим следующую задачу: найти (указать) условия, при выполнении которых задачи (1)–(5) и (1)–(4), (6) имеют единственное решение.

Несмотря на очевидную необходимость проведения таких исследований (решению аналитическими и численными методами указанных начально-граничных задач посвящено значительное число работ, в которых изначально явно или неявно допускается, что решение рассматриваемой задачи существует и оно единственное), подобных исследований в этом направлении до настоящего времени не проводилось. Как правило, авторы публикаций, посвященных различным проблемам математического моделирования диффузии, либо вообще не затрагивают этот вопрос (о существовании и единственности решения), либо без должного на то основания ссылаются на классические работы [16–18]. Ниже можно будет убедиться: достаточно ясное и четкое освещение данного вопроса не является тривиальным и требует скрупулезного анализа результатов из [16, 17]. Исключение составляет монография [14], однако в этой работе найдены лишь достаточные условия единственности решения задач типа (1) ((9))–(5) и (1) ((9))–(4), (6). Вопрос о существовании их решения в [14] не затрагивался.

**Теорема 1.** Пусть коэффициенты  $u_i$ ,  $K_{ij}$ ,  $\alpha$ ,  $i, j=1, 2, 3$ , принадлежат классу  $H^{\beta, \frac{\beta}{2}}(\bar{D}_4^T)$  и ограничены на  $\bar{D}_4^T$ , кроме того,  $u_i$ ,  $K_{ij}$  непрерывно диффе-

ренцируемы по  $x_i$ ,  $i, j=1, 2, 3$  в  $\bar{D}_4^T$ ,  $Q \geq 0$ ,  $\varphi \geq 0$ ,  $Q$ ,  $\varphi$  ограничены,  $Q$  удовлетворяет условию Гёльдера с показателем  $\beta$ ,  $\varphi$  непрерывна в  $\bar{D}_4^T$ , удовлетворяет условиям Ляпунова. Тогда задача (1)–(5) при  $\psi=0$  имеет единственное решение, совпадающее с решением задачи (13), (2)–(5).

*Доказательство.* Так как  $u_i$ ,  $K_{ij}$ ,  $i, j=1, 2, 3$ , непрерывно дифференцируемы по  $x_i$  в  $\bar{D}_4^T$ , то уравнение (1) эквивалентно уравнению (9), уравнение (13) – уравнению (14).

Рассмотрим задачу (13), (2)–(5), которая эквивалентна задаче (14), (2)–(5). При выполнении условий данной теоремы, очевидно, выполняются условия:

- теоремы 16.2 из гл. 4 § 16 [17], а значит, решение задачи (14) ((13)), (2), (4), (5) существует;
- теоремы 5.2 из гл. 4 § 5 [17], а значит, решение задачи (14) ((13)), (2), (4), (5) единственное и оно представимо в виде

$$q(t, x_1, x_2, x_3) = \int_0^t d\tau \iiint_G q_0(t, x_1, x_2, x_3; \tau, y_1, y_2, y_3) Q dy_1 dy_2 dy_3 + \iiint_G q_0(t, x_1, x_2, x_3; \tau, y_1, y_2, y_3) \varphi(y_1, y_2, y_3) dy_1 dy_2 dy_3 \quad (15)$$

(см. соотношение (16.17) из [17]), где  $q_0(t, x_1, x_2, x_3; \tau, y_1, y_2, y_3)$  – функция Грина для задачи (14) ((13)), (2), (4), (5) в области  $\bar{D}_4^T$ , т. е.  $q_0$  удовлетворяет уравнениям:

$$\frac{\partial q_0}{\partial t} + \sum_{i=1}^3 h_i \frac{\partial q_0}{\partial x_i} + \alpha q_0 = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 K_{ij} \frac{\partial^2 q_0}{\partial x_i \partial x_j} + \delta(t - \tau) \delta(x_1 - y_1) \delta(x_2 - y_2) \delta(x_3 - y_3), \quad (16)$$

$$\left( \frac{\partial q_0}{\partial t} + \sum_{i=1}^3 u_i \frac{\partial q_0}{\partial x_i} + \alpha q_0 = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i} K_{ij} \frac{\partial q_0}{\partial x_j} + \delta(t - \tau) \delta(x_1 - y_1) \delta(x_2 - y_2) \delta(x_3 - y_3) \right) \quad (17)$$

и условиям:

$$q_0(t, x_1, x_2, x_3; \tau, y_1, y_2, y_3) = 0, \quad (18)$$

$$q_0(t, x_1, x_2, x_3; \tau, y_1, y_2, y_3) \Big|_{(x_1, x_2, x_3) \in \partial G} = 0. \quad (19)$$

Кроме того, в условиях данной теоремы выполняются условия теоремы 2.1 и следствия 2.1 из гл. 1 § 2 [17].

А тогда

$$q_0(t, x_1, x_2, x_3) \geq 0, \quad (t, x_1, x_2, x_3) \in D_4^T. \quad (20)$$

Из (20) и условий  $Q \geq 0$ ,  $\varphi \geq 0$  следует, что если выполнены условия данной теоремы, то решение задачи (14) ((13)), (2)–(5) существует и единственно.

Учитывая равенство (8) и используя свойства  $\delta$ -функции Дирака [19], соотношение (15) можно переписать в эквивалентном виде:

$$q(t, x_1, x_2, x_3) = \int_0^t d\tau \iiint_G q_0(t, x_1, x_2, x_3; \tau, y_1, y_2, y_3) f dy_1 dy_2 dy_3 + \iiint_G q_0(t, x_1, x_2, x_3; \tau, y_1, y_2, y_3) \varphi(y_1, y_2, y_3) dy_1 dy_2 dy_3. \quad (21)$$

Снова воспользовавшись свойствами  $\delta$ -функции, непосредственным подсчетом, можно убедиться, что функция (21) удовлетворяет уравнению (9), а следовательно, и уравнению (1). Учитывая, что  $q_0(t, x_1, x_2, x_3; \tau, y_1, y_2, y_3)$  является функцией Грина для задачи (13), (2)–(5) (т. е. решением задачи (17)–(19)), заключаем, что функция (21) удовлетворяет условиям (3), (4), (5). Значит, решение (1)–(5) существует и единственно. *Теорема доказана.*

**Теорема 2.** Пусть выполнены все условия теоремы 1. Тогда задача (1)–(5) при  $f=0, \varphi=0$  имеет единственное решение.

*Доказательство.* Если выполнены условия данной теоремы, то:

- 1) выполняются все условия теоремы 16.1 из гл. 4 § 16 [17], а значит, решение задачи (9), (2), (4), (5) при  $f=0, \varphi=0$  существует;
- 2) выполняются все условия теоремы 5.2 из гл. 4 § 5 [17], а значит, решение задачи (9), (2), (4), (5) при  $f=0, \varphi=0$  единственно;
- 3) выполняются все условия теоремы 2.1 из гл. 1 § 2 [17], а значит, согласно следствию 2.1 из этой теоремы, решение задачи (9), (2), (4), (5) при  $f=0, \varphi=0$  неотрицательно, т. е. выполняется условие (3).

Уравнение (9) эквивалентно уравнению (1). А тогда, согласно 1)–3), решение задачи (1)–(5) при  $f=0, \varphi=0$  существует и единственно. *Теорема доказана.*

**Теорема 3.** Пусть выполнены все условия теоремы 1. Тогда (1)–(5) имеет единственное решение, совпадающее с решением (13), (2)–(5).

*Доказательство.* Все условия теоремы 3 те же, что и условия теорем 1 и 2. Обозначим через  $q_1(t, x_1, x_2, x_3)$  решение задачи (1)–(5) при  $\psi=0$ , через  $q_2(t, x_1, x_2, x_3)$  – решение этой задачи при  $f=0, \varphi=0$ . Непосредственным подсчетом легко убедиться, что  $q(t, x_1, x_2, x_3) = q_1(t, x_1, x_2, x_3) + q_2(t, x_1, x_2, x_3)$  является решением (1)–(5). Согласно теореме 1,  $q_1(t, x_1, x_2, x_3)$  – единственное решение задачи (1)–(5) при  $\psi=0$ . Согласно теореме 2,  $q_2(t, x_1, x_2, x_3)$  – единственное решение задачи (1)–(5) при  $f=0, \varphi=0$ . Очевидно, что  $q(t, x_1, x_2, x_3)$  будет единственным решением задачи (1)–(5). *Теорема доказана.*

Перейдем к анализу задачи (1)–(4), (6).

Заметим, что уравнение (1) совпадает с уравнением из [16]:

$$Lq = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n k_{ij} \frac{\partial^2 q}{\partial x_i \partial x_j} - \sum_{i=1}^n h_i \frac{\partial q}{\partial x_i} - \alpha q - \frac{\partial q}{\partial t},$$

определенное в  $\bar{D}_4^T$ . Предположим, что  $L$  удовлетворяет следующим условиям:

- а)  $L$  – параболический коэффициент в  $\bar{D}_4^T$ , т. е. при всех  $(t, x) \in \bar{D}_4^T$  и любого вещественного вектора  $\varepsilon = (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3) \neq (0, 0, 0)$  выполняется условие

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n k_{ij}(t, x) \varepsilon_i \varepsilon_j \geq 0;$$

- б) коэффициент  $L$  непрерывен в  $\bar{D}_4^T$  и для всех  $(t, x) \in \bar{D}_4^T, (t^0, x^0) \in \bar{D}_4^T$  и некоторого  $\beta = \text{const}, 0 < \beta < 1$ , удовлетворяет условиям:

$$|K_{ij}(t, x) - K_{ij}(t^0, x^0)| \leq A(|x - x^0| + |t - t^0|),$$

$$|h_i(t, x) - h_i(t, x^0)| \leq A|x - x^0|^\beta,$$

$$|\alpha(t, x) - \alpha(t, x^0)| \leq A|x - x^0|^\beta,$$

$$i, j = 1, 2, 3, A = \text{const} > 0.$$

**Теорема 4.** Пусть выполнены условия а), б),  $u_i, K_{ij}$  непрерывно дифференцируемы по  $x_i, i=1, 2, 3$  в  $\bar{D}_4^T$ , граница  $\partial G \in C^{1+\alpha}$ ,  $\varphi$  непрерывна в  $\bar{G}$  и равна нулю в некоторой  $G$  – окрестности границы  $\partial G, \beta, \nu$  непрерывны на  $\partial G_0 \times [0, T]$ . Тогда решение задачи (1)–(4), (6) существует и единственно.

*Доказательство.* По условию,  $u_i, K_{ij}, i=1, 2, 3$  непрерывно дифференцируемы по  $x_i$  в  $\bar{D}_4^T$ . Поэтому уравнение (1) эквивалентно уравнению (9), уравнение (13) – уравнению (14).

Аналогично тому, как мы это делали при доказательстве теоремы 1, рассмотрим задачу (13), (2)–(4), (6), эквивалентную задаче (14), (2)–(4), (6).

Если выполнены условия данной теоремы, то, очевидно, выполняются условия теоремы 2 из гл. 5 § 3 [16] (случай  $n=3$ ). Откуда следует, что решение  $q$  задачи (14) ((13)), (2), (4), (6) существует, единственно и представимо в виде

$$q(t, x_1, x_2, x_3) = \int_0^t d\tau \iiint_{\partial G} \Gamma(t, x_1, x_2, x_3; \tau, \xi, \eta, \theta) r(\tau, \xi, \eta, \theta) dS + \iint_G \Gamma(t, x_1, x_2, x_3; \tau, \xi, \eta, \theta) \varphi(\tau, \xi, \eta, \theta) d\xi d\eta d\theta + \int_0^t d\tau \iiint_G \Gamma(t, x_1, x_2, x_3; \tau, \xi, \eta, \theta) Q(\tau, \xi, \eta, \theta) d\xi d\eta d\theta, \quad (22)$$

где  $r(\tau, \xi, \eta, \theta)$  непрерывная на  $\partial G \times [0, T]$  функция, являющаяся решением интегрального уравнения (22), которое представимо в виде (3.10) из гл. 5 § 3 [15],  $dS$  – элемент поверхности  $\partial G, G$  – фундаментальное решение уравнения  $Lq=0$ ,

$$L(\cdot) = \frac{\partial(\cdot)}{\partial t} + \sum_{i=1}^3 h_i \frac{\partial(\cdot)}{\partial x_i} + \alpha(\cdot) - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n K_{ij} \frac{\partial^2(\cdot)}{\partial x_i \partial x_j} = 0, \quad (23)$$

$$\left( L(\cdot) = \frac{\partial(\cdot)}{\partial t} + \sum_{i=1}^3 u_i \frac{\partial(\cdot)}{\partial x_i} + \alpha(\cdot) - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{\partial}{\partial x_i} K_{ij} \frac{\partial(\cdot)}{\partial x_j} = 0 \right).$$

Обозначим в (7) (а значит, и в (6))

$$b_i(t, x) = \sum_{j=1}^3 K_{ij}(t, x) \cos(N, x).$$

В условиях нашей теоремы выполняются (для случая  $n=3$ ) все условия теоремы 2.2 из гл. 1 § 2 [17] (принцип максимума). А тогда, согласно этой теореме,  $q(t, x)$  удовлетворяет неравенству



$$q(t_1, x) \geq \sup_{\lambda > a_0} \min \left\{ \begin{array}{l} 0, \min_{\partial D_4^t} \frac{\nu e^{\lambda(t_1 - t_0)}}{|b|}; \\ e^{\lambda t_1} \min_G u(x, 0); \\ \frac{1}{\lambda - a_0} \min(Q e^{\lambda(t_1 - t_0)}) \end{array} \right\}, \quad (25)$$

$$|b| = \sqrt{b_1^2 + b_2^2 + b_3^2},$$

$$a_0 = \max_{D_4^t} (-\|K(t, x)\|),$$

$$x = (x_1, x_2, x_3), \quad t_1 \geq t_0 \geq 0.$$

Рассмотрим выражение

$$\begin{aligned} \bar{q}(t, x_1, x_2, x_3) = & \\ = \int_0^t d\tau \iint_{\partial G} \Gamma(t, x_1, x_2, x_3; \tau, \xi, \eta, \theta) r(\tau, \xi, \eta, \theta) dS + & \\ + \iint_G \Gamma(t, x_1, x_2, x_3; \tau, \xi, \eta, \theta) \varphi(\tau, \xi, \eta, \theta) d\xi d\eta d\theta + & \\ + \int_0^t d\tau \iiint_G \Gamma(t, x_1, x_2, x_3; \tau, \xi, \eta, \theta) f(\tau, \xi, \eta, \theta) d\xi d\eta d\theta, & (26) \end{aligned}$$

полученное из (22) путем замены в последнем слагаемом (22)  $Q$  на  $f$ . Из (8) и свойств  $\delta$ -функции Дирака следует, что (26) эквивалентно (22) в  $\bar{D}_4^t$ , т. е.

$$\bar{q}(t, x_1, x_2, x_3) = q(t, x_1, x_2, x_3), \quad (t, x_1, x_2, x_3) \in D_4^t. \quad (27)$$

Из (27) вытекает, что  $\bar{q}(t, x_1, x_2, x_3)$  удовлетворяет условиям (3), (4), (6), так как этим условиям в  $D_4^t$  удовлетворяет  $q(t, x_1, x_2, x_3)$ .

Подставим формально (26) в (1), т. е. вычислим  $L\bar{q}(t, x_1, x_2, x_3)$ ,  $(t, x_1, x_2, x_3) \in D_4^t$ ,  $(t, x_1, x_2, x_3) \notin \partial G$ , где  $L(\cdot)$  имеет вид (24).

Согласно (26), (24),

$$\begin{aligned} L\bar{q}(t, x_1, x_2, x_3) = & \\ = L \int_0^t d\tau \iint_{\partial G} \Gamma(t, x_1, x_2, x_3; \tau, \xi, \eta, \theta) r(\tau, \xi, \eta, \theta) dS + & \\ + L \iint_G \Gamma(t, x_1, x_2, x_3; \tau, \xi, \eta, \theta) \varphi(\tau, \xi, \eta, \theta) d\xi d\eta d\theta + & \\ + L \int_0^t d\tau \iiint_G \Gamma(t, x_1, x_2, x_3; \tau, \xi, \eta, \theta) f(\tau, \xi, \eta, \theta) d\xi d\eta d\theta. & (28) \end{aligned}$$

Вычислим выражение в правой части (28), упростив для этого каждое слагаемое:

$$\begin{aligned} L \int_0^t d\tau \iint_{\partial G} \Gamma(t, x_1, x_2, x_3; \tau, \xi, \eta, \theta) r(\tau, \xi, \eta, \theta) dS = & \\ \iint_{\partial G} \Gamma(t, x_1, x_2, x_3; \tau, \xi, \eta, \theta) r(\tau, \xi, \eta, \theta) dS + & \\ \int_0^t d\tau \iint_{\partial G} [L\Gamma(t, x_1, x_2, x_3; \tau, \xi, \eta, \theta)] r(\tau, \xi, \eta, \theta) dS \equiv 0, & (29) \end{aligned}$$

так как по условию  $\Gamma(t, x_1, x_2, x_3; \tau, \xi, \eta, \theta)$  – фундаментальное решение уравнения  $L\bar{q} = 0$ , а согласно определению  $\Gamma$

$$\Gamma(t, x_1, x_2, x_3; \tau, \xi, \eta, \theta) \equiv 0$$

при

$$(x_1, x_2, x_3) \notin \partial G, \quad (\xi, \eta, \theta) \in \partial G,$$

и

$$L\Gamma(t, x_1, x_2, x_3; \tau, \xi, \eta, \theta) = 0. \quad (30)$$

$$\begin{aligned} L \iiint_G \Gamma(t, x_1, x_2, x_3; \tau, \xi, \eta, \theta) \varphi(\tau, \xi, \eta, \theta) d\xi d\eta d\theta = & \\ = \iiint_G \left( [L\Gamma(t, x_1, x_2, x_3; \tau, \xi, \eta, \theta)] \times \right. & \\ \left. \times \varphi(\tau, \xi, \eta, \theta) d\xi d\eta d\theta \right) = 0, & (31) \\ L \int_0^t d\tau \iiint_G \left( \Gamma(t, x_1, x_2, x_3; \tau, \xi, \eta, \theta) \times \right. & \\ \left. \times f(\tau, \xi, \eta, \theta) d\xi d\eta d\theta \right) = & \\ = \iiint_G \Gamma(t, x_1, x_2, x_3; \tau, \xi, \eta, \theta) f(\tau, \xi, \eta, \theta) d\xi d\eta d\theta + & \\ + \int_0^t d\tau \iiint_G \left( [L\Gamma(t, x_1, x_2, x_3; \tau, \xi, \eta, \theta)] \times \right. & \\ \left. \times f(\tau, \xi, \eta, \theta) d\xi d\eta d\theta \right) = & \\ = f(t, x_1, x_2, x_3). & (32) \end{aligned}$$

Равенство (32) вытекает из равенств

$$\begin{aligned} \Gamma(t, x_1, x_2, x_3; \tau, \xi, \eta, \theta) = \delta(x - \xi) \delta(y - \eta) \delta(y - \theta), & \\ \iiint_G f(\tau, \xi, \eta, \theta) \delta(x - \xi) \delta(y - \eta) \delta(y - \theta) d\xi d\eta d\theta = & \\ = f(t, x_1, x_2, x_3) & \end{aligned}$$

и равенства (30).

Из (28), (29), (31), (32) следует, что

$$L\bar{q}(t, x_1, x_2, x_3) = f(t, x_1, x_2, x_3).$$

Из (33) заключаем, что  $\bar{q}(t, x_1, x_2, x_3)$  является решением уравнения (1), из (27) – что решение единственно и оно удовлетворяет условиям (3), (4), (6) (в силу того, что этим условиям удовлетворяет  $q(t, x_1, x_2, x_3)$ ). Теорема доказана.

Полученные результаты принимаются для анализа математических моделей, используемых на практике.

Убедимся, что для основных начально-граничных задач, используемых в прикладных исследованиях диффузионного роста тонкопленочных структур на подложках, выполняются все условия теорем 1–4. В этих задачах обычно полагают, что коэффициенты и функции в задачах (1)–(5), (1)–(4), (6) имеют следующий вид [20] (для полного соответствия с обозначениями, используемыми на практике, будем считать, что  $x_1 = x$ ,  $x_2 = y$ ,  $x_3 = z$ ):

$$u_1 = u_1(z) = c_1 \ln z, \quad c_1 = \text{const} > 0, \quad u_2 = u_3 = 0 \quad (33)$$

(этот случай означает, что ось  $Ox$  сориентирована по направлению вектора скорости горизонтального переноса, а скорость ветра вдоль оси  $Oz$  изменяется по логарифмическому закону);

$$K_{ij} = \begin{cases} K_{ij} \neq 0, & i = j, \\ K_{ij} = 0, & i \neq j, \end{cases} \quad i, j = 1, 2, 3$$

т. е. в матрице коэффициентов диффузии учитываются только диагональные элементы, а все элемен-

ты, не расположенные на главной диагонали, считают равными нулю; при этом  $K_{11}=K_{22}=c_2u_1$ ,  $c_2=\text{const}>0$ , где  $u_1$  задается выражением (34),  $K_{33}=c_3z+c_4$ ,  $c_3=\text{const}>0$ ,  $c_4=\text{const}>0$ .

В качестве  $G$  часто выбирают прямой круговой цилиндр высотой  $H$  с достаточно большим радиусом  $R$  основания, расположенного на подстилающей поверхности  $z=0$  [14]. Такой способ задания  $G$  удобен при аналитических (если это возможно в отдельных случаях [15]) и численных решениях рассматриваемых начально-граничных задач.

Функции  $\alpha$ ,  $Q$ ,  $\varphi$ ,  $\psi$ ,  $\beta$ ,  $\nu$  задают таким образом, что выполняются условия теорем 1–4. Чаще всего полагают, что эти функции являются постоянными величинами в  $G$ .

При данном выборе  $u_i$ ,  $i=1,2,3$ , условие (2) выполняется тождественно.

Для указанных  $u_i$ ,  $\alpha$ ,  $K_{ij}$ ,  $\varphi$ ,  $\psi$ ,  $\beta$ ,  $\nu$ ,  $G$  условия теорем 1–4 выполняются. Поэтому используемые в прикладных исследованиях задачи вида (1)–(5) и (1)–(4), (6) всегда имеют (и при том одно) решение.

Обратим внимание на следующее обстоятельство. При численном решении задач (1)–(5) и (1)–(4), (6) в уравнении (1) часто  $f$  заменяют на  $Q$

без должного на то обоснования. Однако результаты численных расчетов в этом случае удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными. Объяснить этот факт можно следующим образом. Из доказательств теорем 1–4 следует, что вид  $q(t, x_1, x_2, x_3)$  не зависит от выбора в уравнении (1) в качестве свободного члена  $f$  или  $Q$  (см. (15) и (21), (22) и (26), (27)). Поэтому и результаты численных расчетов (при замене  $f$  на  $Q$  в уравнении (1)) всегда будут хорошо согласованы с экспериментальными данными (если только, конечно, сама модель (1)–(5) или (1)–(4), (6) адекватно экспериментальным данным описывает изменения значений  $q(t, x_1, x_2, x_3)$  в  $G$ ).

#### Заключение

В работе представлены результаты исследований на существование и единственность решения краевых задач, описывающих диффузионный рост тонкой пленки на подстилающей поверхности. Найдены критерии, обеспечивающие разрешимость (существование и единственность решения) в соответствующих пространствах. Данные критерии имеют важное значение в прикладных исследованиях.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Болтакс Б.И. Диффузия и точечные дефекты в полупроводниках. – Л.: Мир, 1972. – 362 с.
2. Верлань А.Ф., Москалюк С.С. Математическое моделирование непрерывных динамических систем. – Киев: Наукова думка, 1988. – 362 с.
3. Галай Е.О. Математическая модель образования плёнок на подложках // Обзорные прикладной и промышленной математики. – 2005. – Т. 12. – Вып. 4. – С. 932.
4. Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы математической физики. – М.: Научный мир, 2000. – 358 с.
5. Семенчин Е.А., Тарасенко Е.О. Моделирование процесса диффузии в полупроводниках // Обзорные прикладной и промышленной математики. – 2007. – Т. 14. – Вып. 2. – С. 352–353.
6. Тарасенко Е.О., Гладков А.В. Аналитические и численные решения некоторых обратных задач в рамках математической модели роста тонких пленок на подложках, уравнение которой допускает решение гауссова вида // Параллельная компьютерная алгебра и её приложения в новых инфокоммуникационных системах: сборник научных трудов I Международной конференции. – Ставрополь, 2014. – С. 93–98.
7. Тарасенко Е.О., Гладков А.В. Аналитическое решение краевой задачи о восстановлении мощности источника в математической модели роста тонких пленок на подложках // Параллельная компьютерная алгебра и её приложения в новых инфокоммуникационных системах: сборник научных трудов I Международной конференции. – Ставрополь, 2014. – С. 99–103.
8. Тарасевич Ю.Ю. Математическое и компьютерное моделирование. – М.: Едиториал УРСС, 2002. – 144 с.
9. Яценко Ю.П. Интегральные модели систем с управляемой памятью. – Киев: Наукова думка, 1991. – 284 с.
10. Aubry S. Toward a Rigorous Molecular Theory of Metastability // Ferroelectrics. – 1980. – V. 24. – P. 53–59.
11. Metiu H., Kitahara K., Ross J. Statistical mechanical theory of the kinetics of phase transitions // Fluctuation phenomena. Studies in statistical mechanics / Eds. E.W. Montroll, J.L. Lebowitz. North-Holland Publish. Comp., Amsterdam. – 1979. – V. 7. – P. 229–291.
12. Nishiyama H. Martensitic Theory Transformations. – New York: Academic, 1981. – 315 p.
13. Robledo A. The liquid-solid transition of the hard sphere system from uniformity of the chemical potential // J.Chem.Phys. – 1980. – V. 72. – P. 1701–1712.
14. Марчук Г.И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. – М.: Наука, 1982. – 320 с.
15. Семенчин Е.А. Аналитические решения краевых задач в математической модели атмосферной диффузии. – Ставрополь: СКИУУ, 1993. – 141 с.
16. Фридман А. Уравнения с частными производными параболического типа. – М.: Мир, 1968. – 427 с.
17. Ладыженская О.А., Уральцева Н.Н. Линейные и квазилинейные уравнения эллиптического типа. – М.: Наука, 1973. – 576 с.
18. Ладыженская О.А. Краевые задачи математической физики. – М.: Наука, 1973. – 406 с.
19. Афанасьев В.Н., Колмановский В.Б., Носов В.Р. Математическая теория конструирования систем управления. – М.: Высшая школа, 2003. – 614 с.
20. Берлянд М.Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. – Л.: Гидрометеоздат, 1975. – 448 с.

Поступила: 09.12.2015.

UDC 51-73

## RESOLVABILITY OF BOUNDARY PROBLEMS DESCRIBING FILM ATOM DIFFUSION IN UNDERLYING SURFACE AT FORMATION OF THIN-FILM STRUCTURES

**Elena O. Tarasenko,**

North Caucasian Federal University,  
bld. 2, 1, Pushkin Street, 355000, Stavropol, Russia. E-mail: galail@mail.ru

**Andrey V. Gladkov,**

North Caucasian Federal University,  
bld. 2, 1, Pushkin Street, 355000, Stavropol, Russia. E-mail: gavandrew@mail.ru

**Nataliya V. Malikova,**

Secondary school no. 1, 47, Sovietskaya street, Grachevka village,  
Stavropol region, 356250, Russia. E-mail: nmalik\_@mail.ru

**Relevance of the work.** Extraction of geo assets requires the development of new technological solutions for their production, for example, the coating of drill screws with anticorrosion agents. A solution to this problem is possible using diffusion lacquer coating (corrosion inhibitor) on underlying surface (auger). The mathematization of such physical process as diffusion growth of thin films on the underlying surface is currently unexplored. In mathematical models the question on the existence and uniqueness of the solution of boundary-value problems describing the specified physical process often arises. Many domestic and foreign scientists have studied the analytical and numerical methods for solving the initial-boundary value problems, in which it is originally explicitly or implicitly assumed that the solution of the problem exists and it is unique. As a rule, the authors of publications devoted to various problems of mathematical modeling of diffusion, either do not address this question at all (about the existence and uniqueness of the solution) or refer to the classic works without good reason. Therefore, the studies on solvability of boundary value problems carried out in the paper are relevant. **The aim** of the research is to develop the criteria of resolvability (existence and uniqueness) of the boundary problems arising at mathematical modeling of the thin-film structure growth on underlying surface in various spaces.

**Research methods.** The achievement of a goal is based on correct use of results and methods of the equations of mathematical physics, the integrated equations, the mathematical analysis, the equations in private derivatives, physics of a solid body, a crystallography.

**Results.** The authors have studied the resolvability of the boundary problems describing the diffusive growth of thin films on substrates; developed the criteria of existence and uniqueness of the solution of the specified tasks in various spaces.

**Conclusions.** At mathematical modeling of diffusive growth of a thin film on underlying surface the authors developed the theorems (criteria) providing resolvability (existence and uniqueness of the decision) of initial-boundary tasks. The paper considers the boundary problems for cases of full reflection and absorption of atoms of a film by the underlying surface. The present article is of considerable interest in applied research, and allows answering a question whether it is possible to proceed immediately to a numerical (or possibly analytic) solution of the specific boundary value problem describing the diffusion growth of thin-film structures on substrates, or carry out further researches on its regularization.

### Key words:

Resolvability, boundary problem, thin film, underlying surface, substrate, diffusive growth.

### REFERENCES

1. Boltaks B.I. *Diffuziya i tochechnye defekty v poluprovodnikakh* [Diffusion and dot defects in semiconductors]. Leningrad, Mir Publ., 1972. 362 p.
2. Verlan A.F., Moskalyuk S.S. *Matematicheskoe modelirovanie nepreryvnykh dinamicheskikh system* [Mathematical modeling of continuous dynamic systems]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1988. 362 p.
3. Galay E.O. *Matematicheskaya model obrazovaniya plenok na podlozhkakh* [Mathematical model of formation of films on substrates]. *Obozrenie prikladnoy i promyshlennoy matematiki*, 2005, vol. 12, Iss. 4, p. 932.
4. Samarskiy A.A., Gulin A.V. *Chislennyye metody matematicheskoy fiziki* [Numerical methods of mathematical physics]. Moscow, Nauchny mir Publ., 2000. 358 p.
5. Semenchin E.A., Tarasenko E.O. *Modelirovanie protsessa diffuzii v poluprovodnikakh* [Diffusion modeling in semiconductors]. *Obozrenie prikladnoy i promyshlennoy matematiki*, 2007, vol. 14, Iss. 2, pp. 352–353.
6. Tarasenko E.O., Gladkov A.V. *Analiticheskie i chislennyye resheniya nekotorykh obratnykh zadach v ramkakh matematicheskoy modeli rosta tonkikh plenok na podlozhkakh, uravnenie kotoroy dopuskaet reshenie gaussovogo vida* [Analytical and numerical solutions of some return tasks within mathematical model of growth of thin films on substrates which equation allows the solution of a Gaussian type]. *Parallelnaya kompyuternaya algebra i ee prilozheniya v novykh infokommunikatsionnykh sistemakh. I Mezhdunarodnaya konferentsiya, sbornik nauchnykh trudov* [Parallel computer algebra and its appendices in new infocommunication systems. The I International conference, collection of scientific works]. Stavropol, 2014. pp. 93–98.
7. Tarasenko E.O., Gladkov A.V. *Analiticheskoe reshenie kraevoy zadachi o vosstanovlenii moshchnosti istochnika v matematicheskoy modeli rosta tonkikh plenok na podlozhkakh* [The analytical solution of a boundary problem on restoration of a source power in mathematical model of thin films growth on substrates]. *Parallelnaya kompyuternaya algebra i ee prilozheniya v novykh infokommunikatsionnykh sistemakh. I Mezhdunarodnaya konferentsiya, sbornik nauchnykh trudov* [Parallel computer algebra and its appendices in new infocommunication systems. The I International conference, collection of scientific works]. Stavropol, 2014. pp. 99–103.
8. Tarasevich Yu.Yu. *Matematicheskoe i kompyuterno modelirovanie* [Mathematical and computer modeling]. Moscow, Editorial URSS Publ., 2002. 144 p.

9. Yatsenko Yu.P. *Integralnye modeli sistem s upravlyaemoy pamyatyu* [Integrated models of systems with the operated memory]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1991. 284 p.
10. Aubry S. Toward a Rigorous Molecular Theory of Metastability. *Ferroelectrics*, 1980, vol. 24, pp. 53–59.
11. Metiu H., Kitahara K., Ross J. Statistical mechanical theory of the kinetics of phase transitions. *Fluctuation phenomena. Studies in statistical mechanics*. Eds. Montroll E.W., Lebowitz J.L. Amsterdam, North-Holland Publish. Comp., 1979. Vol. 7, pp. 229–291.
12. Nishiyama H. *Martensitic Theory Transformations*. New-York, Academic, 1981. 315 p.
13. Robledo A. The liquid-solid transition of the hard sphere system from uniformity of the chemical potential. *J. Chem. Phys.*, 1980, vol. 72, pp. 1701–1712.
14. Marchuk G.I. *Matematicheskoe modelirovanie v probleme okruzhayushchey sredy* [Mathematical modeling in an environment problem]. Moscow, Nauka Publ., 1982. 320 p.
15. Semenchin E.A. *Analiticheskie resheniya kraevykh zadach v matematicheskoy modeli atmosfery* [Analytical solutions of boundary problems in mathematical model of atmospheric diffusion]. Stavropol, SKIUU Publ., 1993. 141 p.
16. Fridman A. *Urvneniya s chastnymi proizvodnymi parabolicheskogo tipa* [The equations with private derivatives of parabolic type]. Moscow, Mir Publ., 1968. 427 p.
17. Ladyzhenskaya O.A., Uraltseva N.N. *Lineynye i kvazilineynye uravneniya ellipticheskogo tipa* [Linear and quasilinear equations of elliptic type]. Moscow, Nauka Publ., 1973. 576 p.
18. Ladyzhenskaya O.A. *Kraevye zadachi matematicheskoy fiziki* [Boundary problems of mathematical physics]. Moscow, Nauka Publ., 1973. 406 p.
19. Afanasev V.N., Kolmanovskiy V.B., Nosov V.R. *Matematicheskaya teoriya konstruirovaniya sistem upravleniya* [Mathematical theory of designing control systems]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2003. 614 p.
20. Berlyand M.E. *Sovremennye problemy atmosfery i zagryzneniya atmosfery* [Current problems of atmospheric diffusion and pollution of atmosphere]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1975. 448 p.

Received: 9 December 2015.

УДК 621.3.073

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И РАСЧЕТ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТА ПОСТОЯННОГО ТОКА С РАСЩЕПЛЕННЫМИ ПОЛЮСАМИ И ПОЛЮСНЫМИ НАКОНЕЧНИКАМИ В КОМПЛЕКСЕ ПРОГРАММ ELCUT

**Татевосян Александр Сергеевич,**

кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической и общей электротехники Омского государственного технического университета, Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11. E-mail: karo1@mail.ru

**Татевосян Андрей Александрович,**

кандидат технических наук, доцент кафедры электрической техники Омского государственного технического университета, Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11. E-mail: karo1@mail.ru

**Захарова Наталья Васильевна,**

кандидат технических наук, доцент кафедры машиноведения Омского государственного технического университета, Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11. E-mail: nvzdm@mail.ru

**Шелковников Сергей Васильевич,**

магистрант кафедры теоретической и общей электротехники Омского государственного технического университета, Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11. serj85\_85@inbox.ru

**Шелковникова Юлия Васильевна,**

бакалавр электромеханического факультета Национального минерально-сырьевого университета «Горный», Россия, 199106, г. Санкт-Петербург, 21 линия Васильевского острова, д. 2. E-mail: shelk\_07@list.ru

**Актуальность исследований.** Железоотделители на основе электромагнитов постоянного тока находят повсеместное применение во многих отраслях промышленности, например, на рудообогатительных фабриках, угольных теплоэлектростанциях, коксохимических заводах и т. д., для защиты оборудования от механических поломок, а также засорения конечного продукта посторонними предметами, причем сепарация основана на ферромагнитных свойствах этих предметов. Среди магнитных систем электромагнитов постоянного тока с полюсными наконечниками клапанная магнитная система является наиболее распространенной, а значит хорошо изученной, так как нашла широкое применение в приводах электромагнитных коммутационных аппаратов, устройствах автоматики и управления. Однако даже при синтезе такой магнитной системы электромагнита у разработчиков возникает проблема определения доли магнитного потока под полюсным наконечником в рабочем зазоре. Решение задачи ещё более осложняется при отсутствии в электромагните постоянного тока поворотного якоря, поскольку магнитное поле в межполюсном зазоре оказывается резко неоднородным, затухающим по мере удаления исследуемой точки от плоскости полюсов. Такое распределение магнитного поля имеет место в специальных электромагнитах постоянного тока – подвесных железоотделителях, которые используются для извлечения ферромагнитных предметов из различных сыпучих материалов, транспортируемых ленточными конвейерами.

**Цель исследования.** Рассмотреть комплексный подход к исследованию магнитного поля электромагнита постоянного тока с расщепленными полюсами и полюсными наконечниками, характеризующийся изучением резкой неоднородности магнитного поля в межполюсном зазоре и за его пределами.

**Методы исследования.** Исследование проводилось с использованием разработанного лабораторного стенда электромагнита с применением программного обеспечения ELCUT 6.0. Подход основывается на сопоставлении результатов экспериментального исследования магнитного поля и магнитной силы для опытного образца электромагнитного железоотделителя с помощью цифрового миллитесламетра с датчиком Холла, численного расчета магнитного поля в комплексе программ ELCUT 6.0 и аналитического расчета напряженности магнитного поля.

**Результаты исследования.** Полученные результаты экспериментального исследования магнитного поля на опытном образце электромагнита с использованием цифрового миллитесламетра с датчиком Холла дополнены результатами аналитического и численного расчета магнитного поля, выполненного в комплексе программ ELCUT 6.0 (профессиональная версия). Надежность представленных результатов эксперимента и расчета подтверждается проверкой закона полного тока в замкнутом контуре. В ходе анализа затухания магнитного поля электромагнита на середине межполюсного зазора по мере удаления исследуемой точки от полюсных наконечников определено оптимальное расстояние между полюсными наконечниками, при котором удельная погонная сила магнитного поля достигает максимального значения.

### **Ключевые слова:**

Электромагнит постоянного тока, межполюсный зазор, полюсные наконечники, расщепленные полюса, проверка закона полного тока, затухание магнитного поля, погонные силы.

## Введение

Магнитная сепарация в ресурсосберегающих технологиях позволяет исключить попадание стальных примесей в машины и механизмы, выход их из рабочего состояния и снизить износ оборудования. Благодаря магнитной сепарации на предприятиях переработки растительного сырья уменьшается вероятность взрыва пылевоздушной смеси вследствие возникновения искры при попадании стальных включений в линию транспортировки [1].

На предварительной стадии проектирования железоотделителей наибольший интерес у разработчиков вызывает исследование магнитного поля для точек вертикали середины межполюсного зазора, где наиболее трудно извлечь ферромагнитные предметы вследствие максимальной толщины очищаемого слоя и минимального значения возникающей в неоднородном магнитном поле пондеромоторной силы [2]:

$$F_{\text{м.п.}} = -\text{grad}P, \quad (1)$$

где  $P = \int_V \frac{\mu_0 \chi_0 H^2}{2} dV$  – потенциальная энергия на-

магниченной частицы;  $H$  – модуль напряженности магнитного поля;  $V$  – объем частицы;  $\chi_0$  – магнитная восприимчивость частицы;  $\mu_0$  – магнитная постоянная.

При малых размерах намагниченной частицы в объеме  $V$  модуль напряженности магнитного поля  $H$  можно считать одинаковым и выражение для пондеромоторной силы упрощается:

$$F_{\text{м.п.}} = -\mu_0 \chi_0 V H \text{grad}H. \quad (2)$$

Поскольку напряженность магнитного поля с увеличением расстояния от поверхности магнитной системы электромагнита уменьшается ( $\text{grad}H < 0$ ), то положительное значение пондеромоторной силы означает, что под её действием ферромагнитные частицы будут перемещаться к полюсам. В выражении (2) величину

$$F_{\text{м}} = H \text{grad}H \quad (3)$$

принято называть магнитной силой, она не зависит от формы, размеров и природы извлекаемого тела, а характеризует только свойства магнитного поля и критерий качества разрабатываемой конструкции электромагнитного железоотделителя.

### Аналитическое решение для расчета магнитного поля

Расчет магнитного поля на середине межполюсного зазора для подвешенного электромагнитного железоотделителя на предварительной стадии проектирования можно свести к аналитическому расчету плоскопараллельного магнитного поля двух бесконечных пластин шириной  $L$ , отстоящих друг от друга на расстоянии  $2\delta$ , имеющих разность магнитных потенциалов  $U_0$  (рис. 1). На оси симметрии магнитной системы напряженность магнитного

поля имеет только горизонтальную составляющую [3], а именно:

$$H = H_x(y) = \frac{U_0}{2K(k)} \frac{(L + \delta)}{\sqrt{\delta^2 + y^2} \sqrt{(L + \delta)^2 + y^2}}, \quad (4)$$

где  $y$  – расстояние по вертикали от плоскости полюсов до расчетной точки А, в которой определяется напряженность магнитного поля;  $K(k)$  – полный эллиптический интеграл первого рода с модулем  $k$ , аппроксимируемый выражением (с точностью до четвертого знака после запятой)

$$K(k) = \sum_{n=0}^2 (1 - k^2)^n \left[ a_n + b_n \ln \frac{1}{(1 - k^2)} \right],$$

$$\text{модуль } k = \frac{L}{L + \delta},$$

$$a_0 = 1,3862944, \quad a_1 = 0,119723, \quad a_2 = 0,0725296;$$

$$b_0 = 0,5, \quad b_1 = 0,1213478, \quad b_2 = 0,0288729.$$

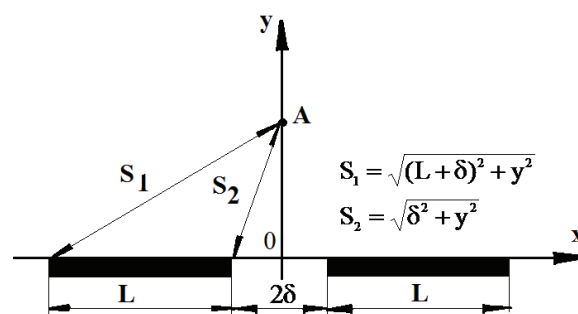


Рис. 1. Расчетная схема магнитной системы

Fig. 1. Structural diagram of magnetic system

Представленное аналитическое решение (3) для модуля напряженности магнитного поля на середине межполюсного зазора используется на стадии предварительных проектных расчетов электромагнитных железоотделителей. На этой стадии расчет распределения напряженности магнитного поля по всему межполюсному пространству и под полюсными наконечниками, как правило, не проводится, поскольку именно на середине межполюсного зазора труднее всего обеспечить извлечение ферромагнитных предметов вследствие максимальной толщины слоя очищаемого материала [3, 4].

Целью данной статьи является комплексный подход к исследованию магнитного поля подвешенного электромагнитного железоотделителя постоянного тока с расщепленными полюсами и полюсными наконечниками. Подход основывается на сопоставлении результатов экспериментального исследования магнитного поля и магнитной силы  $F_{\text{м}} = H \text{grad}H$  для опытного образца электромагнитного железоотделителя с помощью цифрового миллитесламетр-датчиком Холла [5], численного расчета магнитного поля (магнитостатическая задача) в комплексе программ Elcut 6.0 (профессиональная версия) и аналитического расчета напряженности магнитного поля с использованием выражения (3).

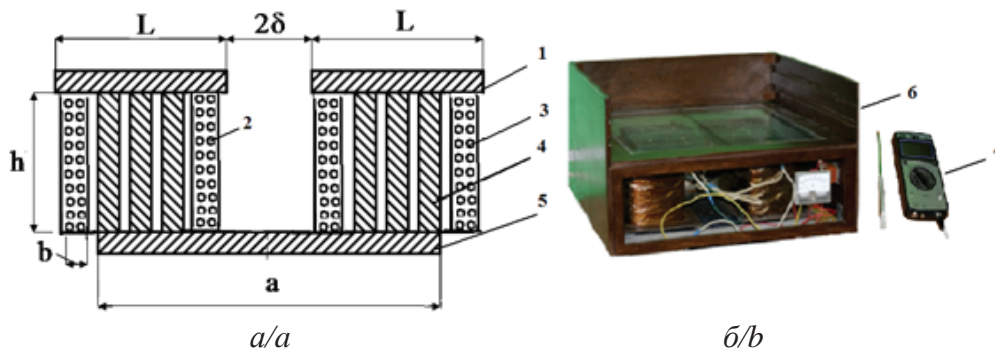


Рис. 2. Эскиз (а) и внешний вид (б) магнитной системы электромагнита постоянного тока: 1 – полюсные наконечники; 2, 3 – обмотка, состоящая из двух идентичных катушек; 4 – расщепленные полюса; 5 – ярмо; 6 – лабораторный стенд; 7 – цифровой миллитесламетр ТПУ-03, снабженный датчиком Холла

Fig. 2. Sketch (a) and appearance (b) of magnetic system of DC electromagnet: 1 is the pole pieces; 2, 3 is the winding consisting of two identical coils; 4 are the split poles; 5 is the yoke; 6 is the laboratory stand; 7 is the digital milliteslametr TPU-3 equipped with the Hall sensor

### Описание лабораторного стенда

Экспериментальная часть исследования магнитного поля выполнена на опытном образце электромагнита. Эскиз электромагнита и внешний вид лабораторного стенда показаны на рис. 2.

Электрическая схема лабораторного стенда показана на рис. 3. Опытный образец электромагнита имеет полное число витков обмотки  $w=1100$ . Ток обмотки  $I=2,1$  А. Магнитопровод выполнен из листовой горячекатаной стали марки Ст. 20: ярмо сердечника размером  $376 \times 140 \times 20$  мм, шесть наборных полюсов размерами  $20 \times 140 \times 140$  мм, два полюсных наконечника размерами  $160 \times 140 \times 20$  мм. Толщина катушки – 20 мм, высота катушки – 140 мм, зазор между наборными полюсами – 20 мм, толщина стенок каркаса катушек – 5 мм.

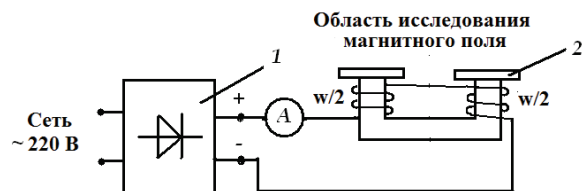


Рис. 3. Электрическая схема лабораторной установки: 1 – выпрямитель; 2 – электромагнит постоянного тока с двумя полюсными наконечниками

Fig. 3. Electrical circuit of the laboratory device: 1 is the rectifier; 2 is the DC electromagnet with two pole pieces

### Исследование магнитного поля в программном обеспечении Elcut 6.0

Расчетная часть исследования магнитного поля численным методом построена на решении задачи линейной магнитостатики в комплексе программ Elcut 6.0 (профессиональная версия) [6–8]. В задаче магнитное поле принимается плоскопараллельным (векторы  $\vec{B}$  и  $\vec{H}$  лежат в плоскости  $xy$ , зависят от координат  $x$  и  $y$  и не зависят от координаты  $z$ ). Вектор плотности тока  $\vec{J} = J_z$  имеет одну составляющую, направленную вдоль оси  $z$ . В декартовой системе координат магнитное поле электро-

магнита в кусочно-однородных средах описывается с помощью уравнения Лапласа–Пуассона относительно векторного магнитного потенциала  $\vec{A} = A_z$  [9–12]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{\mu'} \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{\mu'} \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = -\mu_0 J_z. \quad (5)$$

Площадь области моделирования с учетом кусочно-однородных сред с различными магнитными проницаемостями (сталь, обмотка с током, воздух) составляет  $50 \times 300$  мм<sup>2</sup>.

На внешней границе области принимается условие, что векторный магнитный потенциал  $A_z = 0$ , относительная магнитная проницаемость стали  $\mu' = 2000$ , относительная магнитная проницаемость воздуха и обмоточного медного провода  $\mu' = 1$ . Геометрия модели электромагнита задана размерами:  $a = 376$  мм,  $h = 140$  мм,  $L = 170$  мм,  $2\delta = 36$  мм,  $b = 20$  мм (рис. 2). Область модели покрывается сеткой конечных элементов (из более 124 тысяч узлов, с шагом дискретизации 1 мм).

Проверка численного расчета картины магнитного поля электромагнита в пакете Elcut 6.0 по закону полного тока для произвольного контура показала, что при заданном шаге дискретизации ошибка расчета не превышает одного процента [13–16].

По рассчитанной картине магнитного поля электромагнита можно определить изменение вектора напряженности магнитного поля и его составляющих в любом заданном направлении, например по стрелке  $l$  (рис. 4). Из графика видно, что интенсивность магнитного поля на середине межполюсного зазора, то есть способность его производить работу, оказывается значительно больше, чем под полюсными наконечниками.

### Результаты исследования

Сопоставление результатов эксперимента и расчета распределения напряженности магнитного поля на середине межполюсного зазора по оси  $y$  показано на рис. 5 [17–20].

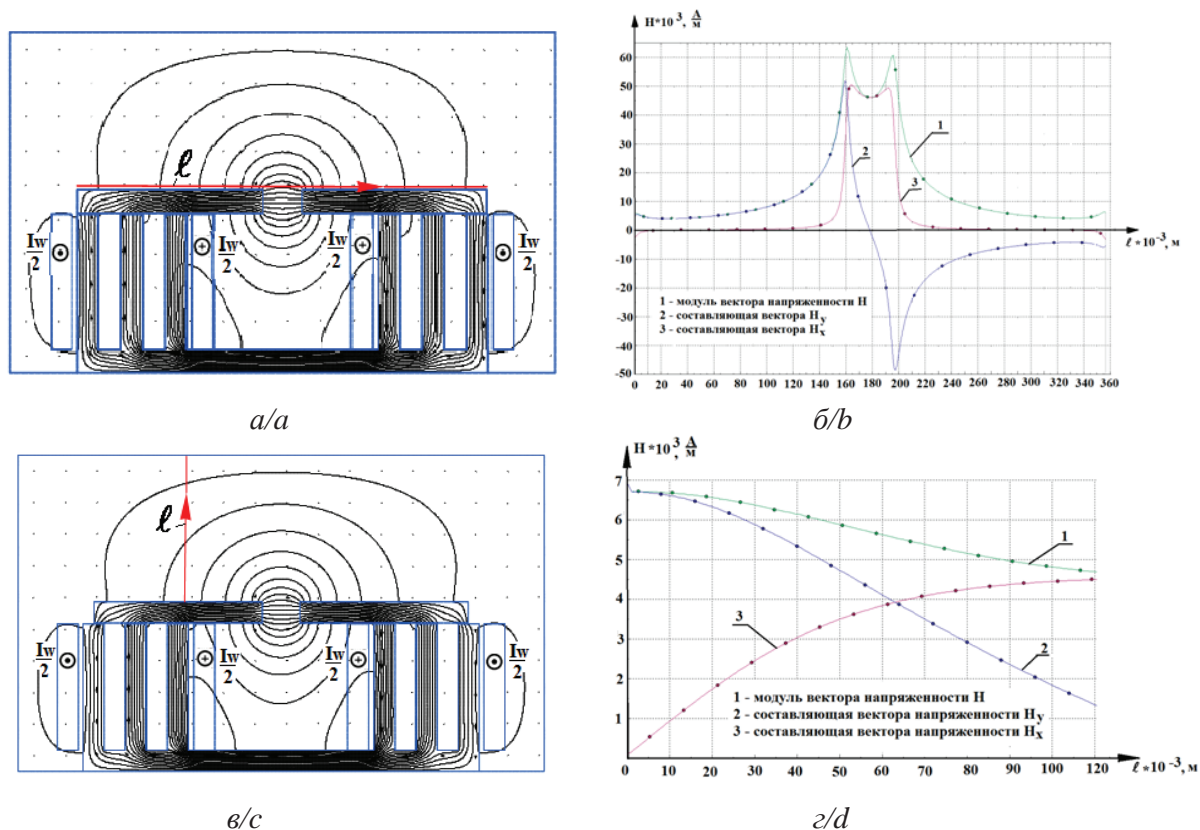


Рис. 4. Картина магнитного поля (а, в) и распределение модуля и составляющих вектора напряженности поля (б, г) вдоль прямой  $l$

Fig. 4. Pattern of magnetic field (a, c) and distribution of module and components of the field vector (b, d) along a straight line

Экспериментальные значения напряженности магнитного поля в расчетных точках определялись по значениям магнитной индукции, измерен-

ным миллитесламетром по формуле  $H=B/\mu_0$  [21–23]. На графике (рис. 5) наблюдается хорошее сближение экспериментальной кривой 1 с расчет-

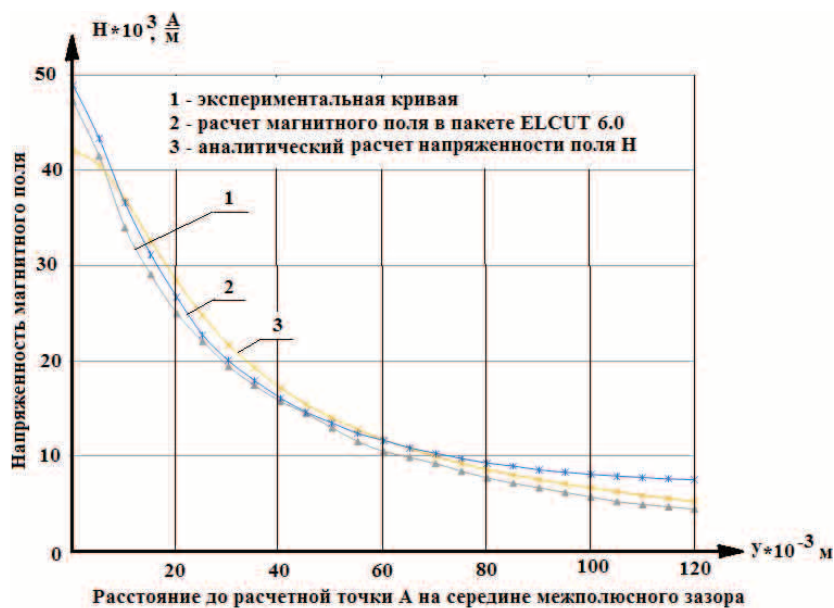


Рис. 5. Комплексный подход к исследованию магнитного поля на середине межполюсного зазора вдоль оси  $y$

Fig. 5. Integrated approach to the research of the magnetic field in the middle of the pole gap along the axis  $y$



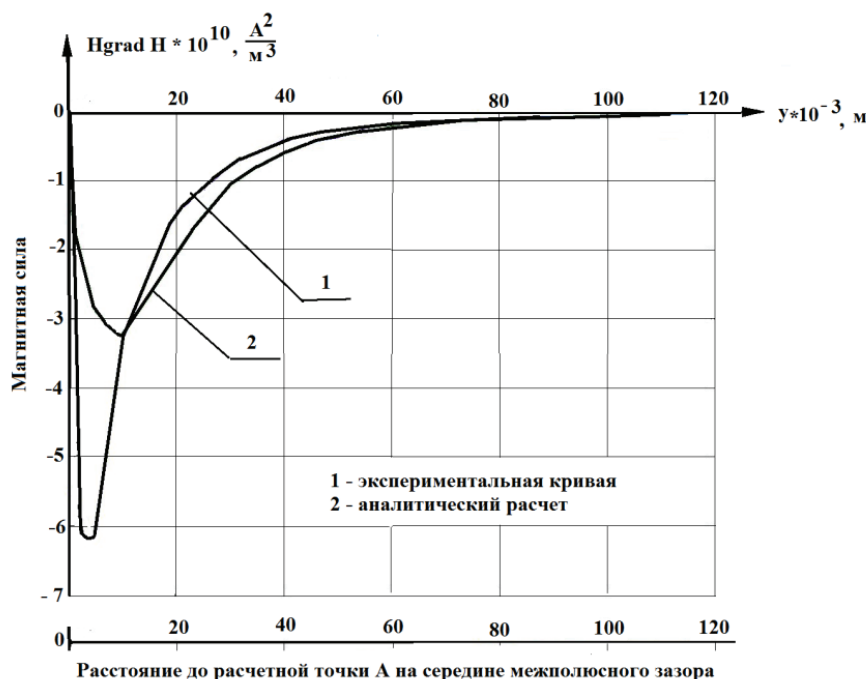


Рис. 6. Магнитная сила электромагнита в области резкой неоднородности магнитного поля

Fig. 6. Magnetic force of the electromagnet in the magnetic field sharp inhomogeneity range

ной кривой 2, построенной с использованием пакета Elcut 6.0, особенно в области, где магнитное поле имеет резкую неоднородность. Аналитический метод расчета напряженности магнитного поля (кривая 3) в этой области имеет большее расхождение с экспериментом.

Для выяснения влияния этого расхождения на магнитную силу электромагнита аппроксимируем кривые 1 и 3, заданные таблично, кубическим сплайном в пакете Matlab [24, 25]. Для кубического сплайна функций используем процедуру вычисления магнитной силы по формуле (3). Результаты расчета магнитной силы электромагнита на середине межполюсного зазора по оси у показаны на рис. 6.

Анализ построенных кривых на рисунке показывает, что в области резкой неоднородности магнитного поля магнитная сила электромагнита достигает максимума. Причем экспериментальная и расчетная кривые в этой области существенно расходятся между собой, что свидетельствует о возможности использования аналитического метода на предварительной стадии проектирования электромагнита. При выполнении оптимизационных расчетов его конструкции необходимо основываться на результатах численного расчета магнитного поля, выполненного с помощью пакета Elcut 6.0 (профессиональная версия).

С увеличением расстояния от поверхности магнитной системы электромагнита напряженность магнитного поля (также магнитная индукция) затухает по экспоненте, однако этот закон в области резкой неоднородности магнитного поля на середине межполюсного зазора, где магнитная сила до-

стигает максимального значения, не выполняется. Экспериментальная кривая магнитной индукции вдоль оси у и экспоненциальный тренд функции, построенный в пакете Excel [24], в этой области существенно отличаются.

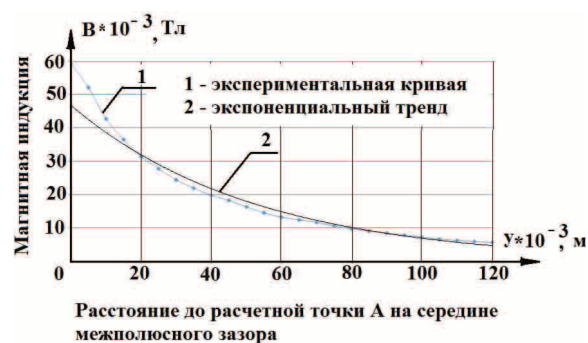


Рис. 7. Затухание магнитной индукции с увеличением расстояния от поверхности магнитной системы

Fig. 7. Attenuation of magnetic induction with increase of distance from magnetic system surface

### Выводы

1. Экспериментальным и расчетным путем на основе исследования магнитного поля электромагнита с расщепленными полюсами и полюсными наконечниками показано, что в области межполюсного зазора с резкой неоднородностью магнитного поля наблюдается максимум магнитной силы.
2. Численная модель магнитного поля электромагнита, построенная в пакете Elcut 6.0 (профессиональная версия), наиболее точно описы-

вает распределение магнитного поля в межполюсном зазоре и под полюсными наконечниками. В области с резкой неоднородностью затухание магнитного поля происходит не по экспоненциальному закону.

3. Задача оптимального проектирования электромагнита с расщепленными полюсами и полюсными наконечниками может быть решена на

основе численного расчета магнитного поля с помощью пакета Elcut 6.0 (профессиональная версия). Критерием оптимальности конструкции магнитной системы может служить максимум магнитной силы на середине межполюсного зазора путем варьирования параметра  $k=L/\delta$  при прочих неизменных условиях, включая постоянство ампер-витков обмотки.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мищенко А.С., Тишин А.М. Магнитные сепараторы – многообразие конструкций. URL: <http://www.amtc.ru/publications/articles/2053> (дата обращения: 05.01.2016).
2. Сумцов В.Ф. Электромагнитные железоотделители. – М.: Машиностроение, 1978. – 174 с.
3. Загирняк М.Ф., Бранспиз Ю.А. Приближенная формула напряженности магнитного поля над серединой зазора двухполюсного магнитного железоотделителя // Изв. вузов. Электромеханика. – 1992. – № 3. – С. 62–65.
4. ELCUT. Моделирование двумерных полей методом конечных элементов: руководство пользователя. Версия 6.0. – ПК TOP; СПб., 1989–2013. URL: <http://www.exponenta.ru/soft/others/elcut/Manual.pdf> (дата обращения: 05.01.2016).
5. Сытник А.А., Ключка К.Н., Протасов С.Ю. Применение интегральных динамических моделей при решении задачи идентификации параметров электрических цепей // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 322. – № 4. – С. 103–106.
6. Дьяконов В.П., Пеньков А.А. MATLAB и SIMULINK в электроэнергетике. – М.: Изд-во «Горячая линия – телеком», 2009. – 816 с.
7. Злыгостева Г.В., Муравьев С.В. Обобщенная модель процедуры испытаний измерительного программного обеспечения // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 318. – № 4. – С. 62–67.
8. Ran Wang, Shuaihua Nie, Jianhua Zhao, Yang Ji. Measuring magnetic anisotropy with a rotatable AC electromagnet // Measurement. – 2016, February. – V. 79. – P. 15–19.
9. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле. – М.: Гардарики, 2001. – 317 с.
10. Tatevosyan A.A., Tatevosyan A.S. Calculation of magnetic system of the magnetoelectric machines // Proc. Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines, Dynamics. – Omsk, 11–13 November 2014. – P. 299–302.
11. Tatevosyan A.A., Tatevosyan A.S. The study of magnetic characteristics of amorphous alloys at various frequencies and ranges of magnetic flux // Proc. International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015. – Omsk, 21–23 May 2015. – P. 1250–1254.
12. Tatevosyan A.A., Fokina V.V. The study of the electromagnetic field of the synchronous magnetoelectric generator // Proc. International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015 – Omsk, 21–23 May 2015. – P. 1336–1340.
13. Ишков А.С., Литвинов Л.Н. Измерительно-вычислительный комплекс для исследования магнитных характеристик электротехнической стали // Датчики и системы. – 2006. – № 4. – С. 14–17.
14. Татевосян А.А., Татевосян А.С. Расчет оптимальных параметров электромагнитного привода колебательного движения. // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 325. – № 4. – С. 121–132.
15. Pironneau M.O. Optimum design with Lagrangian finite elements: Design of an electromagnet // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. – 1978, September. – V. 15. – Iss. 3. – P. 277–308.
16. Anderson Ph. A universal DC characterisation system for hard and soft magnetic materials // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2008, October. – V. 320. – Iss. 20. – P. e589–e593.
17. Zaharova N.V. Improvement of magnetic system of the speed sensor in the devices of the impact parameters control // Proc. International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015. – Omsk, 21–23 May 2015. – P. 482–486.
18. Anisotropy field distribution in soft magnetic Hitperm alloys submitted to different field annealing processes / J.S. Blázquez, J. Marcin, F. Andrejka, V. Franco, A. Conde, I. Skorvanek // Journal of Alloys and Compounds. – 2016, 15 February. – V. 658. – P. 367–371.
19. Fernanda A. Sampaio da Silva, Castro N.A., de Campos M.F. Modeling hysteresis curves of anisotropic SmCoFeCuZr magnets // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2013, February. – V. 328. – P. 53–57.
20. Макенова Н.А., Канев Ф.Ю., Носов Г.В. Построение компьютерных моделей по курсу ТОЭ в различных системах программирования // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 312. – № 4. – С. 103–108.
21. Research on anisotropic bonded Nd–Fe–B magnets by 2-step compaction process / Bin Ma, Aizhi Sun, Zhenwen Lu, Chuan Cheng, Chen Xu // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2016, 1 March. – V. 401. – P. 802–805.
22. Бахвалов Ю.А., Горбатенко Н.И., Гречихин В.В. Метод решения обратных задач магнитных измерений // Измерительная техника. – 2015. – № 3 – С. 58–60.
23. Создание однородного магнитного поля с помощью системы аксиальных катушек для калибровки магнитометров / В.Е. Баранова (Огай), П.Ф. Баранов, С.В. Муравьев, С.В. Учайкин // Измерительная техника. – 2015. – № 5. – С. 52–56.
24. Спиридонов О.В. Расширенные возможности Microsoft Excel 2003. – М.: МИЭМП, 2010. – 458 с.
25. McDougall I. Ferrous Alloys Processing Equipment // Handbook of Ferrous Alloys. – Oxford, Elsevier Science, 2013. – P. 83–138.

Поступила 11.01.2016.

UDC 621.3.073

## EXPERIMENTAL INVESTIGATION AND CALCULATION OF MAGNETIC FIELD OF DC ELECTROMAGNET WITH SPLIT POLES AND POLE PIECES IN THE SOFTWARE COMPLEX ELCUT

**Aleksandr S. Tatevosyan,**

Omsk State Technical University, 11, Mira Avenue, Omsk, 644050, Russia. E-mail: ast\_51@mail.ru

**Andrey A. Tatevosyan,**

Omsk State Technical University, 11, Mira Avenue, Omsk, 644050, Russia. E-mail: karo1@mail.ru

**Natalya V. Zakharova,**

Omsk State Technical University, 11, Mira Avenue, Omsk, 644050, Russia. E-mail: nvzdm@mail.ru

**Sergey V. Shelkovnikov,**

Omsk State Technical University, 11, Mira Avenue, Omsk, 644050, Russia. E-mail: serj85\_85@inbox.ru

**Yulia V. Shelkovnikova,**

National Mineral Resources University (Mining University) 2, 21 line of Vasilyevsky Island, Saint-Petersburg, 199106, Russia. E-mail: shelk\_07@list.ru

**The relevance of research.** Iron separator devices based on the DC electromagnets are widely spread in many industries: ore-treatment plants, coal thermal power plants, coking plants, for equipment protection from mechanical damage, as well as from final product clogged with outsider objects; separation is based on ferromagnetic properties of these objects. Among the magnetic systems of permanent magnets with magnetic pole pieces the valve system is the most common and therefore the well-studied, as it is widely used in the drives of electromagnetic switching devices, automation and control devices. However, even in the synthesis of a solenoid magnet system the developers have the problem of determining the proportion of the magnetic flux by the pole piece in the working gap. Solution of the problem is even more complicated in the absence of a rotary anchor in DC electromagnet, since the magnetic field in the pole gap is dramatically uneven, fading with the distance of the point from the plane of the poles. Such distribution of the magnetic field takes place in special DC electromagnets – suspended iron separators, which are used to extract the ferromagnetic items from various bulk materials transported by belt conveyors.

**The aim of research.** The paper considers an integrated approach to the study of magnetic field of DC electromagnet with split poles and pole pieces, characterized by the study of the sharp inhomogeneity of the magnetic field in the pole gap and beyond.

**Methods of research.** The study was carried out using a laboratory designed electromagnet using software Elcut 6.0. The approach is based on comparing the results of an experimental study of magnetic field and magnetic force for the prototype electromagnetic iron separator with a digital milliteslametra with the Hall sensor, a numerical calculation of the magnetic field in the complex programs Elcut 6.0 and analytical calculation of the magnetic field.

**The results** of experimental research of the magnetic field in a prototype electromagnet using digital milliteslameter with the Hall sensor were supplemented by the results of analytical and numerical calculation of magnetic fields made in the software complex Elcut 6.0 (professional version). The reliability of the presented results of the experiment and the calculation is confirmed by checking the Ampere law in a closed circuit. Analyzing the attenuation of the magnetic field of the electromagnet in the middle of the pole gap as the distance of the investigated point from the pole pieces the authors determined the optimal distance between the pole pieces at which the specific ponderomotive force of the magnetic field reaches the maximum value.

### Key words:

DC electromagnet, pole gap, pole pieces, split poles, verification of Ampere law, magnetic field attenuation, ponderomotive force.

### REFERENCES

- Mishchenko A.C., Tishin A.M. *Magnitnye separatory – mnogoobrazie konstruktsiy* [Magnetic separators – the variety of constructions]. Available at: <http://www.amtc.ru/publications/articles/2053> (accessed: 05 January 2016).
- Sumtsov V.F. *Elektromagnitnye zhelezootdeliteli* [Iron separators]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978. 174 p.
- Zagirnyak M.F., Branspiz Yu.A. Priblizhennaya formula napyazhennosti magnitnogo polya nad seredinoy zazora dvukhpolyusnogo magnitnogo zhelezootdelitelya [Approximated formula of magnetic field stress over the middle of the gap of two-pole iron separator]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika*, 1992, no. 3, pp. 62–65.
- ELCUT. *Modelirovanie dvumernykh poley metodom konechnykh ehlementov: rukovodstvo polzovatelya. Versiya 6.0*. [ELCUT. Modeling two-dimensional fields by the finite element method: user manual. Version 6.0.]. Moscow, PK TOP; St.-Petersburg, 1989–2013. Available at: <http://www.exponenta.ru/soft/others/elcut/Manual.pdf> (accessed: 05 January 2016).
- Sytnik A.A., Klyuchka K.N., Protasov S.Yu. Application of integral dynamic models when solving the problems of identification of electric circuit parameters. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 322, no. 4, pp. 103–106. In Rus.

6. Dyakonov V.P., Penkov A.A. *MATLAB i SIMULINK v ehlektronergetike* [MATLAB and SIMULINK in power engineering]. Moscow, Goryachaya liniya – telekom Publ., 2009. 816 p.
7. Zlygosteva G.V., Muravyev S.V. Generalized model of testing measuring software. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2011, vol. 318, no. 4, pp. 62–67. In Rus.
8. Ran Wang, ShuaihuaNie, Jianhua Zhao, Yang Ji. Measuring magnetic anisotropy with a rotatable AC electromagnet. *Measurement*, 2016, February, vol. 79, pp. 15–19.
9. Bessonov L.A. *Teoreticheskie osnovy elektrotehniki. Elektromagnitnoe pole* [Theoretical bases of electrical engineering. Electromagnetic field]. Moscow, Gardariki Publ., 2001. 317 p.
10. Tatevosyan A.A., Tatevosyan A.S. Calculation of magnetic system of the magnetoelectric machines. *Proc. Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines, Dynamics*. Omsk, 11–13 November 2014. pp. 299–302.
11. Tatevosyan A.A., Tatevosyan A.S. The study of magnetic characteristics of amorphous alloys at various frequencies and ranges of magnetic flux. *Proc. International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015*. Omsk, 21–23 May 2015. pp. 1250–1254.
12. Tatevosyan A.A., Fokina V.V. The study of the electromagnetic field of the synchronous magnetoelectric generator. *Proc. International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015*. Omsk, 21–23 May 2015. pp. 1336–1340.
13. Ishkov A.S., Litvinov L.N. Izmeritelno-vychislitelny kompleks dlya issledovaniya magnitnykh kharakteristik elektrotekhnicheskoy stali [Measuring and computing complex for studying magnetic characteristics of electrotechnical steel]. *Datchiki i sistemy*, 2006, no. 4, pp. 14–17.
14. Tatevosyan A.A., Tatevosyan A.S. Calculation of optimal parameters of electromagnetic drive of oscillation mode. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 325, no. 4, pp. 121–132. In Rus.
15. Pironneau M.O. Optimum design with Lagrangian finite elements: Design of an electromagnet. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1978, September, vol. 15, Iss. 3, pp. 277–308.
16. Anderson Ph. A universal DC characterisation system for hard and soft magnetic materials. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2008, October, vol. 320, Iss. 20, pp. e589–e593.
17. Zaharova N.V. Improvement of magnetic system of the speed sensor in the devices of the impact parameters control. *Proc. International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015*. Omsk, 21–23 May 2015. pp. 482–486.
18. Blázquez J.S., Marcin J., Andrejka F., Franco V., Conde A., Skorkvanek I. Anisotropy field distribution in soft magnetic Hitperm alloys submitted to different field annealing processes. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016, 15 February, vol. 658, pp. 367–371.
19. Fernanda A. Sampaio da Silva, Castro N.A., de Campos M.F. Modeling hysteresis curves of anisotropic SmCoFeCuZr magnets. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2013, February, vol. 328, pp. 53–57.
20. Makenova N.A., Kanev F.Yu., Nosov G.V. Computer modeling in the course Theoretical bases of electrical engineering in different programming systems. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 312, no. 4, pp. 103–108. In Rus.
21. Bin Ma, Aizhi Sun, Zhenwen Lu, Chuan Cheng, Chen Xu. Research on anisotropic bonded Nd–Fe–B magnets by 2-step compaction process. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2016, 1 March, vol. 401, pp. 802–805.
22. Bakhvalov Yu.A., Gorbatenko N.I., Grechikhin V.V. Method of solving reverse problems of magnetic measurements. *Measurement technique*, 2015, no. 3, pp. 58–60. In Rus.
23. Baranova V.E. (Ogaj), Baranov P.F., Muravyev S.V., Uchaykin S.V. Development of uniform magnetic field by the system of axial coils for calibrating magnetic tester. *Measurement technique*, 2015, no. 5, pp. 52–56. In Rus.
24. Spiridonov O.V. *Rasshirennye vozmozhnosti MicrosoftExcel 2003* [Exceeding the possibilities of MicrosoftExcel 2003]. Moscow, MIEHMP Publ., 2010. 458 p.
25. McDougall I. *Ferroalloys Processing Equipment. Handbook of Ferroalloys*. Oxford, Elsevier Science, 2013. pp. 83–138.

*Received: 11 January 2016.*

## К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

Принимаются статьи, подготовленные в MS Word-2003 (файл и распечатка). Статья должна быть подписана авторами и иметь сопроводительное письмо на бланке организации.

Объем статьи не менее 8 стр., но не более 20 стр., включая рисунки и таблицы, размещенные в тексте по упоминанию. Размер бумаги А4, поля по 25 мм. Текст в 1 интервал **без переносов, лишних пробелов и абзацных интервалов**, шрифт Times New Roman, 12 пунктов. Файлы рисунков (в градациях серого) в jpg, tif, cdr или иных форматах редакторов Photoshop, Corel Draw с разрешением 300 dpi прилагаются к статье. Рисунки и таблицы: **Рис. 1. Название; Таблица. Название.** Кавычки вида «...». Интервалы – 1,2...1,8 мм или 5–7 шт. Формулы – в MathType, настройка по умолчанию. Нумеруются только те формулы, на которые есть ссылка в тексте.

Курсивом – буквы латинского и греческого алфавита, кроме входящих в имена собственные, обозначения стандартных математических функций и химических элементов ( $U_{пр.}$ ,  $\Phi_i$ , но  $Al_2O_3$ ,  $\cos\alpha_i$ , max, lg, «BASF»). Векторы – полужирным курсивом. Список литературы – по ГОСТ Р 7.0.5–2008 (см. пример). Литература – по упоминанию: [1, 2], [2. С. 245], [3–7]. Список литературы должен включать не менее 20 источников.

УДК 621.37 (Пример оформления статьи)

### АНАЛИЗ РАБОТЫ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ РЕГУЛИРОВКИ (название на английском языке)

**Петров Иван Иванович**, канд. техн. наук, доцент каф. обработки металлов давлением факультета стандартизации, химии и биотехнологии ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Россия, 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38. E-mail: vip111@yandex.ru

**Иванов Андрей Андреевич**, д-р хим. наук, профессор каф. химической технологии топлива и химической кибернетики Института природных ресурсов ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: iip@tpu.ru

Показана возможность расчета ... Установлено, что ... Сделан вывод о том, что ... (Аннотация, 10 кегль, не менее 200 слов).

**Ключевые слова:** (ниже ключевые слова на английском языке)

Усилительный каскад, регулировка тока

В [1, 2] показано, что усилительный каскад с автоматической регулировкой потребляемого тока (АРПТ) позволяет получить ...

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фамилия И.О. Название книги. – М.: Издательство, 2014. – 123 с.
2. Название книги / под ред. И.О. Фамилия. – М.: Издательство, 2014. – 123 с.
3. Фамилия И.О. Название статьи // Журнал. – 2014. – Т. 316. – № 1. – С. 71–77.
4. Фамилия И.О. Название диссертации: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Томск, 2008. – 19 с.
5. Название изобретения: пат. 2000000 Рос. Федерация. № 2009129009/10; заявл. 27.07.13; опубл. 10.10.14, Бюл. № 4. – 3 с.
6. Фамилия И.О. Название статьи // Наименование конференции: Труды VII Междунар. научно-практ. конф. молодых ученых. – Томск, 2014. – Т. 1. – С. 226–228.
7. Фамилия И.О. Название статьи // Наименование ресурса. 2013. URL: <http://www.tpu.ru/html/izvestia.htm> (дата обращения: 25.09.2014).

### REFERENCES

Поступила 25.01.2013 г.

Руководство для авторов и образец оформления статьи: [izvestiya.tpu.ru](http://izvestiya.tpu.ru)

**Компьютерная верстка** *О.Ю. Аршинова*  
**Корректурa** *Д.В. Заремба*  
**Перевод на английский язык** *С.В. Жаркова*  
**Дизайн обложки** *Т.В. Буланова*

Фотографии на обложке взяты из личного архива  
*Валерия Касаткина*

Подписано к печати 26.02.2016. Формат 60x84/8. Бумага «Снегурочка».  
Печать XEROX. Усл. печ. л. 16,52. Уч.-изд. л. 14,94.  
Заказ 90-16. Тираж 500 экз.



**Издательство**

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ