



ТОМСКИЙ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

---

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

**ИЗВЕСТИЯ  
ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА  
ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ**

Том 329, № 2, 2018

Издательство  
Томского политехнического университета  
2018

# ИЗВЕСТИЯ ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА. ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ

## Редакционная коллегия

Семилетов И.П., гл. редактор, д-р геогр. наук (Россия)  
Рихванов Л.П., д-р геол.-минерал. наук (Россия)  
Остальд 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)  
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)  
Зиятдинов Р.А., канд. физ.-мат. наук (Южная Корея)  
Спицын В.Г., д-р техн. наук (Россия)  
Муравьев С.В., д-р техн. наук (Россия)  
Пойлов В.З., д-р техн. наук (Россия)  
Лотов В.А., д-р техн. наук (Россия)  
Софронов В.Л., д-р хим. наук (Россия)  
Бузник В.М., д-р хим. наук (Россия)  
Захаров Ю.А., д-р хим. наук (Россия)  
Антипенко В.Р., д-р хим. наук (Россия)  
Голик В.И., д-р техн. наук (Россия)  
Абуталипова Е.М., д-р техн. наук (Россия)  
Полищук В.И., д-р техн. наук (Россия)  
Хамитов Р.Н., д-р техн. наук (Россия)  
Зюев А.М., д-р техн. наук (Россия)  
Кирынова Л.Г., выпуск. редактор, канд. филос. наук (Россия)  
Глазырин А.С., выпуск. редактор, д-р техн. наук (Россия)

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

Подписной индекс в объединённом каталоге  
«Пресса России» – 18054

© ФГАОУ ВО НИ ТПУ, 2018

## УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

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

Учредителем является Томский политехнический университет.

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

ISSN (print) – 2500-1019

ISSN (on-line) – 2413-1830

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

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

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 и вопросы геоэкологии
- Инженерная геология Евразии и окраинных морей.

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

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

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

Окончательное решение по публикации статьи принимает главный редактор журнала.

Все материалы размещаются в журнале на бесплатной основе.

Журнал издается ежемесячно.

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

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

Volume 329, № 2, 2018

# BULLETIN OF THE TOMSK POLYTECHNIC UNIVERSITY. GEO ASSETS ENGINEERING

## Editorial Board

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

## AIMS AND SCOPE

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 Communicationss).

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

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

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

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

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

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

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

The publication of manuscripts is free of charge.

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

## СОДЕРЖАНИЕ

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                                                                                                     |            |                                                                                                                                                                                                                                        |            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Сульфиды Аргысуцкого габбрового массива (СЗ Восточного Саяна)</b><br>Юричев А.Н.                                                                                                                                                                 | <b>6</b>   | <b>Sulfides of Argysuksky gabbro massif (northwest of Eastern Sayan)</b><br>Yurichev A.N.                                                                                                                                              | <b>6</b>   |
| <b>Динамическая модель твердотопливного отопительного котла</b><br>Хаустов С.А., Хаустова О.В., Ермолаев А.Н.                                                                                                                                       | <b>16</b>  | <b>Computational model of a solid fuel heating boiler</b><br>Khaustov S.A., Khaustova O.V., Ermolaev A.N.                                                                                                                              | <b>16</b>  |
| <b>Вольтодобавочный последовательный резонансный преобразователь с изменяемой структурой для систем электропитания</b><br>Осипов А.В., Ярославцев Е.В., Буркин Е.Ю., Свиридов В.В.                                                                  | <b>27</b>  | <b>Boost type series resonant converter with flexible structure for power supplies</b><br>Osipov A.V., Yaroslavtsev E.V., Burkin E.Yu., Sviridov V.V.                                                                                  | <b>27</b>  |
| <b>Временные изменения химического состава вод в восточной части Васюганского болота (Западная Сибирь)</b><br>Савичев О.Г., Мазуров А.К.                                                                                                            | <b>38</b>  | <b>Changes of chemical composition of waters in east part of the Vasyugan mire (Western Siberia)</b><br>Savichev O.G., Mazurov A.K.                                                                                                    | <b>38</b>  |
| <b>Реконструкции геотермического режима нефтематеринской Китебютской свиты Арктического региона Западной Сибири с учетом влияния палеоклиматических факторов</b><br>Искоркина А.А., Прохорова П.Н., Стоцкий В.В., Фомин А.Н.                        | <b>49</b>  | <b>Reconstructions of geothermal mode of the petromaternal Kiterbutsk suite of the Arctic region in Western Siberia taking into account the influence of paleoclimate</b><br>Iskorkina A.A., Prokhorova P.N., Stoskiy V.V., Fomin A.N. | <b>49</b>  |
| <b>Способ косвенной защиты от перегрева для электроприводов горно-шахтных установок</b><br>Брейдо И.В., Семькина И.Ю., Нурмаганбетова Г.С.                                                                                                          | <b>65</b>  | <b>Method of indirect overheating protection for electric drives of mining installations</b><br>Breido I.V., Semykina I.Yu., Nurmaganbetova G.S.                                                                                       | <b>65</b>  |
| <b>Полимеры с углеродными наполнителями для мощных резисторов</b><br>Минакова Н.Н., Ушаков В.Я.                                                                                                                                                     | <b>74</b>  | <b>Polymers with carbon fillers for powerful resistors</b><br>Minakova N.N., Ushakov V.Ya.                                                                                                                                             | <b>74</b>  |
| <b>Эволюция химического состава блеклых руд Ак-Сугского золото-молибден-медно-порфирирового месторождения (Северо-Восточная Тува)</b><br>Кужугет Р.В., Монгуш А.А., Монгуш А.-Д.О.                                                                  | <b>81</b>  | <b>Evolution of chemical composition of fahlores of the Ak-Sug gold-molybdenum-copper-porphyry deposit (North-East Tuva)</b><br>Kuzhuget R.V., Mongush A.A., Mongush A.-D.O.                                                           | <b>81</b>  |
| <b>Сягойский участок Арка-Табьяхинского месторождения диатомовых глин: литология пород и перспективы освоения</b><br>Смирнов П.В., Константинов А.О., Шадрин А.Н., Баталин Г.А., Гареев Б.И., Новоселов А.А., Нафигин Р.Р.                          | <b>92</b>  | <b>Syagoy site of Arka-Tabayakha clayey diatomite deposit: lithology of rocks and mining potential</b><br>Smirnov P.V., Konstantinov A.O., Shadrin A.N., Batalin G.A., Gareev B.I., Novoselov A.A., Nafigin R.R.                       | <b>92</b>  |
| <b>Глауконит из верхнемеловых пород Варваринского месторождения (Торгайский прогиб, Северный Казахстан)</b><br>Рудмин М.А., Мазуров А.К., Капанов А.С., Соктоев Б.Р., Буяков А.С.                                                                   | <b>104</b> | <b>Glaucanite from Upper Cretaceous formations of Varvarinskoe deposit (Turgay depression, Northern Kazakhstan)</b><br>Rudmin M.A., Mazurov A.K., Kapanov A.S., Soktoev B.R., Buyakov A.S.                                             | <b>104</b> |
| <b>Разработка наблюдателя полного порядка с оперативным мониторингом момента сопротивления для погружных асинхронных электродвигателей</b><br>Глазырин А.С., Кладиев С.Н., Афанасьев К.С., Тимошкин В.В., Слепнёв И.Г., Полищук В.И., Sándor Halász | <b>118</b> | <b>Design of full order observer with real time monitoring of load torque for submersible induction motors</b><br>Glazyrin A.S., Kladiev S.N., Afanasiev K.S., Timoshkin V.V., Slepnev I.G., Polishchuk V.I., Sándor Halász            | <b>118</b> |
| <b>Низкотемпературное спекание корундовых порошков</b><br>Матренин С.В., Ильин А.П., Кулявцева С.В.                                                                                                                                                 | <b>127</b> | <b>Low temperature sintering of corundum powders</b><br>Matrenin S.V., Ilyin A.P., Kulyavtseva S.V.                                                                                                                                    | <b>127</b> |
| <b>Задача управления процессом ректификации нефти и метод ее решения</b><br>Дмитриевский Б.С., Затонский А.В., Тугашова Л.Г.                                                                                                                        | <b>136</b> | <b>Task of controlling oil rectification and the method of its solution</b><br>Dmitrievsky B.S., Zatonskiy A.V., Tugashova L.G.                                                                                                        | <b>136</b> |
| <b>Математическая модель управления функционированием генерирующей компании в современных условиях</b><br>Секретарев Ю.А., Мятаж Т.В., Мошкин Б.Н.                                                                                                  | <b>146</b> | <b>Mathematical model for controlling generation company functioning under modern conditions</b><br>Sekretarev Yu.A., Myatezh T.V., Moshkin B.N.                                                                                       | <b>146</b> |
| <b>Применение эвристических алгоритмов в анализе данных для решения задачи диагностирования электроцентробежных насосных установок</b><br>Валиахметов Р.И., Ямалиев В.У., Шубин С.С., Алферов А.В.                                                  | <b>159</b> | <b>Application of heuristic algorithms in analyzing data to solve the problem of detection of electric centrifugal pumping units</b><br>Valiakhmetov R.I., Yamaliev V.U., Shubin S.S., Alferov A.V.                                    | <b>159</b> |

УДК 552.321.5:553.08

## СУЛЬФИДЫ АРГЫСУКСКОГО ГАББРОВОГО МАССИВА (СЗ ВОСТОЧНОГО САЯНА)

Юричев Алексей Николаевич,  
juratur@sibmail.com

Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

**Актуальность работы** обусловлена необходимостью детального петрологического исследования многочисленных потенциально рудоносных мафит-ультрамафитовых массивов Канской глыбы Восточного Саяна с целью совершенствования региональных схем корреляции, а также выявления в них Pt-Cu-Ni оруденения.

**Цель работы:** комплексное изучение сульфидной минерализации габброидов Аргысукского массива с целью оценки степени потенциальной перспективности интрузива на обнаружение в нем промышленного медно-никелевого оруденения.

**Методы исследования:** изучение рудной минерализации в аншлифах с использованием поляризационного микроскопа AxioScope Carl Zeiss; диагностика химического состава рудной минерализации методом рентгеноспектрального микроанализа с применением электронного сканирующего микроскопа Tescan Vega II LMU, оборудованного энергодисперсионным спектрометром (с полупроводниковым Si (Li) детектором INCA x-sight) INCA Energy 450 и волнодисперсионным спектрометром INCA Wave 700.

**Результаты.** Впервые в габброидах Аргысукского массива проведена детальная диагностика сульфидной минерализации, которая увеличилась до 12 минеральных разновидностей. Изученная минерализация обнаруживает высокое сходство по своей специализации, минеральному набору и особенностям химизма с сульфидами из габброидов Талажинского массива, что также подтверждает ранее сделанное предположение о высоком сходстве этих объектов и их единой формационной природе. Типоморфизм и химические особенности сульфидов указывают на то, что их кристаллизация в габброидах происходила из исходного высокожелезистого сульфидного расплава в условиях повышенной фугитивности серы и значимой роли меди в рудной системе. Полученные результаты наряду с петрологическими особенностями позволяют предполагать высокую перспективность исследуемого массива на обнаружение Cu-Ni оруденения.

### Ключевые слова:

Аргысукский массив, габброиды, сульфиды, химизм, генезис, потенциальная рудоносность.

### Введение

В геологической литературе с конца 90-х гг. XX в. появляется все больше новых публикаций по вопросу Pt-Cu-Ni оруденения, связанного с разнотипными ультрамафит-мафитовыми формациями складчатых провинций азиатской части Евразии, включающих территорию Юга Сибири, Монголии, Казахстана и Северного Китая [1–7], что представляет, в первую очередь, как прикладной, так и научно-исследовательский интерес. В пределах Канской глыбы, локализованной в северо-западной части Восточного Саяна, по результатам выполненных ранее ГРП было выявлено большое число ультрамафитовых и мафит-ультрамафитовых интрузивов, в которых нередко отмечалась рудная минерализация Cu, Ni и ЭПГ [8–10]. В 60–80-е гг. XX в. по результатам таких работ в северо-западной части глыбы был охарактеризован расслоенный Талажинский плагиодунит-троктолит-анортозит-габбровый массив, не имеющий по своей формационной принадлежности аналогов в данном регионе [11, 12]. Сравнительно недавно, в 2007–2008 гг., в процессе поисково-разведочных работ на Pt-Cu-Ni оруденение А.Н. Смагиным был выявлен небольшой по размерам Аргысукский габбровый массив, который к настоящему времени мы считаем вероятным сателлитом от Талажинского массива, расположенного неподалеку к юго-западу на расстоянии 1,5 км. Ранее полученные автором с коллективом соавторов результаты петрологического исследования габброидов данных массивов подтвердили их высокое сходство и по-

зволили сделать вывод об единости их формационной принадлежности [13]. Также впервые выявленная и предварительно охарактеризованная рудная минерализация в габброидах Аргысукского массива позволила проследить ее высокое сходство по своей специализации, минеральному и вещественному составу с таковой минерализацией из талажинских габброидов [14].

Настоящая работа является заключительным исследованием по диагностике сульфидной минерализации из габброидов Аргысукского массива, по результатам которого минеральное разнообразие сульфидов массива увеличилось с 6 до 12 разновидностей, а также существенно расширена база химических составов ранее выявленных сульфидов, что к настоящему времени позволило дать наиболее полную оценку сульфидной минерализации, специфическим особенностям ее вещественного состава и предположить вероятную модель ее формирования.

Небольшой по величине (3...3,5 км<sup>2</sup>) габбрового состава Аргысукский массив формирует водораздел между истоками рр. Аргысук и Анжа. Природа аэромагнитного поля на исследуемой территории (данные А.Н. Смагина, 2008 г.) позволяет предположить наличие в его придонной части пластины ультрамафитов и ее практически полную сохранность в результате незначительного современного эрозионного среза интрузива. Принимая во внимание, что весь массив полностью расположен в контрастной аэромагнитной аномалии, характерной только рудоносным ультрамафитам в

пределах Канской глыбы, а также наличие по результатам геолого-съемочных работ 1978–1981 гг. контрастного и короткого (1,5 км) потока рассеяния Ni, можно выделить ультрамафиты массива, скрытые на глубине под преобладающими на поверхности габбро, в ранг весьма перспективных на обнаружение Cu-Ni оруденения.

Габбровая серия пород массива изменяется от меланократовых (оливиновых, оливин-пироксен-роговообманковых) до лейкократовых (преимущественно плагиоклазовых) разновидностей, которые в неравномерной степени были подвержены вторичным изменениям (амфиболизации, хлоритизации). Они сложены главным образом хризолитом ( $\text{Ga}_{19-21}$ ) ~5...25 %, лабрадором ( $\text{An}_{57-70}$ ) ~50...70 % и клинопироксеном – до 30 %. Отмечаются коричнево-бурая роговая обманка (до 7...10 %) и биотит (до 5 %), из вторичных минералов – актинолит, уралит и хлорит. Рудные минералы распределены неравномерно в основной массе породы и занимают до 10 % от общего объема.

#### Сульфидная минерализация

Сульфиды наблюдаются достаточно часто в виде мелких зерен (0,1...0,4 мм) в основной матрице породы и представлены преимущественно пирротин, пентландитом, халькопиритом, железистым халькопиритом и пиритом. Реже отмечается никелистый пирротин, галенит, сфалерит, халькозин, борнит и миллерит. При этом в меланократовых разновидностях габброидов минерализация представлена пирротин-пентландит-халькопиритовой триадой с доминированием пирротина, а в лейкократовых разновидностях и метагаббро – преимущественно неправильными агрегативными выделениями пирита и (или) тонкозернистой «сыпью» данного минерала.

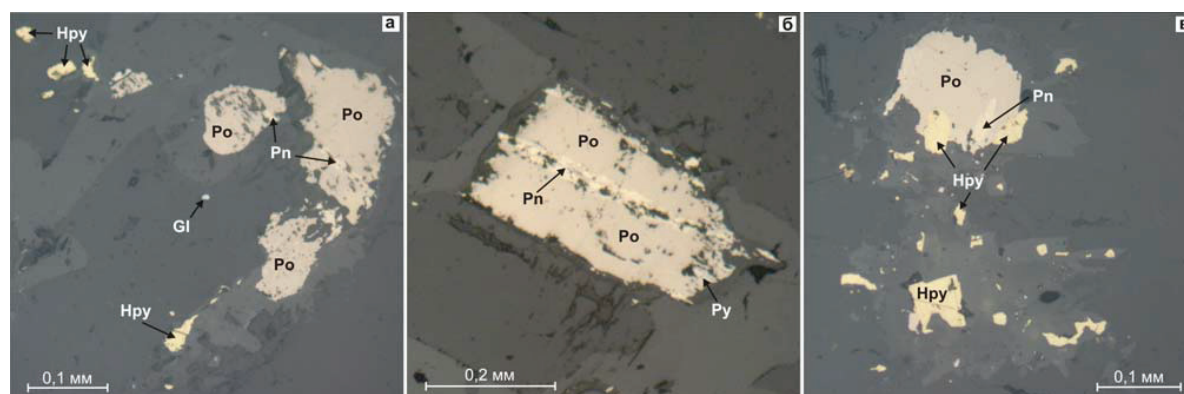
*Пирротин* является наиболее распространенным сульфидом и отмечается в виде каплевидных зерен (0,2...0,4 мм) в ассоциации с пентландитом, формируя структуры распада твердых растворов, а также в ассоциации с пентландитом и халькопиритом

(рис. 1, рис. 2, а). Химический состав минерала схож с его стехиометрической формулой (табл. 1). По дифференциации значений S в составе, а также по эволюционному тренду фигуративных точек составов, отражающему обратную зависимость между Fe и S, аргысукские пирротины обнаруживают высокое сходство с таковым сульфидом из габбровой серии Талажинского массива (рис. 3, а). Однако оба этих массива по химическому составу пирротитов отличаются от подобного минерала из Кингашского ультрамафитового массива Канской глыбы, включающего крупное Pt-Cu-Ni одноименное месторождение [15, 16].

В процессе исследования пирротитов отмечены разновидности со значимым содержанием никеля (табл. 1). Автором они были выделены в отдельную разновидность – никелистый пирротин.

*Пентландит*, наряду с пирротин, также широко представлен в изученных габброидах. Он наблюдается преимущественно в виде веретенообразных, пламевидных включений распада внутри пирротина; крайне реже образует обособленные мелкие (до 0,1 мм) зерна треугольной, округлой формы, в которых часто отмечается весьма отчетливая октаэдрическая спайность (111) (рис. 1, 2). Минерал характеризуется постоянным присутствием в химическом составе примеси кобальта (2,14...4,38 %) и повышенной железистостью (табл. 1). Такие особенности химического состава обнаруживают большое сходство с талажинскими пентландитами из габброидов и отличают их от кингашских пентландитов (рис. 3, б–е). Последние характеризуются несколько большей железистостью при меньших значениях содержания кобальта (обычно до 1,5 %) [18]. При этом содержания Ni и S, а также отношение Ni/Fe являются близкими для пентландитов из всех трех массивов (рис. 3, б, в).

*Халькопирит* не распространен так широко, как два предыдущих сульфида. В изученных образцах отмечено две его генерации. Халькопирит первой генерации образует мелкие самостоятельные зерна до 0,05 мм вблизи пирротин-пентланди-



**Рис. 1.** Микрофотографии сульфидной минерализации в габброидах Аргысукского массива в отраженном свете, аншлифы: Po – пирротин; Pn – пентландит; Hpy – халькопирит; Py – пирит; Gl – галенит

**Fig. 1.** Microphotographs of sulfide mineralization in gabbroids of Argysuksky massif in reflected light, polished sections: Po – pyrrhotite; Pn – pentlandite; Hpy – chalcopyrite; Py – pyrite; Gl – galena

**Таблица 1.** Химический состав основных сульфидных минералов из габброидов Аргысукского массива, вес. %

**Table 1.** Chemical composition of basic sulfide minerals from gabbroides of Argysuksky massif, wt. %

| Образец/Sample | Минерал/Mineral                                                    | S                                                | Fe    | Ni    | Co    | Cu    |       |
|----------------|--------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 151-2-1        | Пирротин<br>Pyrrhotite                                             | 36,78                                            | 63,22 | -     | -     | -     |       |
| 151-2-2        |                                                                    | 38,83                                            | 61,17 |       |       |       |       |
| 151-2-3        |                                                                    | 36,40                                            | 63,60 |       |       |       |       |
| 151-2-4        |                                                                    | 39,55                                            | 60,45 |       |       |       |       |
| 151-3-2        |                                                                    | 36,42                                            | 63,58 |       |       |       |       |
| 151-4-1        |                                                                    | 36,45                                            | 63,55 |       |       |       |       |
| 151-4-2        |                                                                    | 36,48                                            | 63,52 |       |       |       |       |
| 151-4-3        |                                                                    | 36,61                                            | 63,39 |       |       |       |       |
| 2141-1-2       |                                                                    | 38,48                                            | 61,26 | 0,26  |       |       |       |
| 151-3-1        |                                                                    | 36,65                                            | 63,35 | -     |       |       |       |
| 151-3-2        |                                                                    | 36,47                                            | 63,53 |       |       |       |       |
| 151-3-5        |                                                                    | 36,38                                            | 63,62 |       |       |       |       |
| 151-3-6        |                                                                    | 36,45                                            | 63,55 |       |       |       |       |
| 151-4-2        |                                                                    | 36,49                                            | 63,51 |       |       |       |       |
| 151-5-1        |                                                                    | 36,85                                            | 63,15 |       |       |       |       |
| 151-5-3        |                                                                    | 36,56                                            | 63,44 |       |       |       |       |
| 151-5-5        |                                                                    | 36,73                                            | 63,27 |       |       |       |       |
| 151-6-2        |                                                                    | 36,39                                            | 63,61 |       |       |       |       |
| 2141-1-1       |                                                                    | 36,75                                            | 63,25 |       |       |       |       |
| 2141-1-4       |                                                                    | 37,89                                            | 62,11 |       |       |       |       |
| 2141-2-1       |                                                                    | 39,29                                            | 60,71 |       |       |       |       |
| 41/5-4-1       |                                                                    | 38,78                                            | 61,22 |       |       |       |       |
|                | среднее/average (22)                                               | 37,17                                            | 62,82 |       |       |       |       |
| 2141-2-5       | Никелистый пирротин<br>Ni-pyrrhotite                               | 37,97                                            | 60,01 | 2,03  |       |       |       |
| 151-3-1        |                                                                    | 39,41                                            | 58,90 | 1,69  |       |       |       |
|                | среднее/average (2)                                                | 38,69                                            | 59,45 | 1,86  |       |       |       |
| 151-3-3        | Пентландит/Pentlandite                                             | 33,40                                            | 36,10 | 28,16 | 2,34  |       |       |
| 151-3-7        |                                                                    | 33,81                                            | 34,25 | 29,28 | 2,66  |       |       |
| 151-4-3        |                                                                    | 33,56                                            | 35,74 | 28,23 | 2,48  |       |       |
| 151-5-6        |                                                                    | 33,36                                            | 35,99 | 27,98 | 2,68  |       |       |
| 151-6-3        |                                                                    | 33,29                                            | 36,54 | 28,03 | 2,14  |       |       |
| 2141-1-3       |                                                                    | 34,35                                            | 31,34 | 29,93 | 4,38  |       |       |
| 2141-2-2       |                                                                    | 33,51                                            | 31,51 | 31,16 | 3,83  |       |       |
| 151-3-3        |                                                                    | 33,99                                            | 36,24 | 27,14 | 2,63  |       |       |
|                |                                                                    | среднее/average (8)                              | 33,66 | 34,71 | 28,74 | 2,89  |       |
| 151-5-4        | Халькопирит<br>Chalcopyrite                                        | 34,68                                            | 31,00 | -     | -     | 34,33 |       |
| 2141-2-3       |                                                                    | 34,84                                            | 30,14 | 0,27  |       | 34,75 |       |
| 2141-2-4       |                                                                    | 36,36                                            | 29,31 | -     |       | 34,33 |       |
| 2127-3-1       |                                                                    | 34,32                                            | 31,21 |       |       | 34,47 |       |
| 2144-2-4       |                                                                    | 34,27                                            | 30,53 |       |       | 35,20 |       |
| 2144-6-1       |                                                                    | 35,35                                            | 29,90 |       |       | 34,76 |       |
| 152-2-1        |                                                                    | 34,65                                            | 30,46 |       |       | 34,89 |       |
| 152-2-2        |                                                                    | 34,99                                            | 30,38 |       |       | 34,63 |       |
| 2144-1-1       |                                                                    | 34,68                                            | 30,69 |       |       | 34,64 |       |
|                |                                                                    | среднее/average (9)                              | 34,90 |       |       | 30,40 | 34,66 |
| 151-9-1        |                                                                    | Железистый халькопирит<br>Glandular chalcopyrite | 35,30 | 40,94 |       | -     | 23,76 |
| 151-9-2        |                                                                    |                                                  | 35,34 | 41,14 |       |       | 23,52 |
| 151-3/2-1      | 35,33                                                              |                                                  | 41,15 | 23,52 |       |       |       |
| 151-3/2-2      | 35,21                                                              |                                                  | 40,94 | 23,86 |       |       |       |
| 151-4-4        | 35,21                                                              |                                                  | 40,49 | 24,30 |       |       |       |
|                | среднее/average (5)                                                | 35,28                                            | 40,93 | -     | 23,79 |       |       |
| 2141-3-1       | Пирит<br>Pyrite<br>(самостоятельные зерна)<br>(independent grains) | 53,69                                            | 46,31 |       | 0,47  | -     |       |
| 2141-3-3       |                                                                    | 53,69                                            | 46,31 |       |       |       |       |
| 2141-3-4       |                                                                    | 54,44                                            | 45,09 |       |       |       |       |
| 2144-2-5       |                                                                    | 53,24                                            | 46,76 |       | -     |       |       |
| 2144-3-1       |                                                                    | 53,34                                            | 46,66 |       |       |       |       |
| 2127-1         |                                                                    | 53,89                                            | 46,11 |       |       |       |       |
| 2144-1-2       |                                                                    | 53,06                                            | 46,94 |       |       |       |       |
| 2144-2-1       |                                                                    | 53,00                                            | 47,00 |       |       |       |       |
| 2144-2-2       |                                                                    | 53,42                                            | 46,58 |       |       |       |       |
| 151-3-4        |                                                                    | 52,69                                            | 47,31 |       |       |       |       |
| 151-3-8        |                                                                    | 52,75                                            | 47,25 |       |       |       |       |
| 2144-2-1       |                                                                    | 52,97                                            | 47,03 |       |       |       |       |
| 2146-5-1       |                                                                    | 52,45                                            | 47,55 |       |       |       |       |
|                | среднее/average (13)                                               | 53,28                                            | 46,68 |       |       |       |       |

Примечание к табл. 1. Здесь и далее диагностика химического состава сульфидов выполнена методом рентгеноспектрального микроанализа [17] на электронном сканирующем микроскопе «Tescan Vega II LMU», оборудованном энергодисперсионным спектрометром INCA Energy 350 и волнодисперсионным спектрометром INCA Wave 700 в ЦКП «Аналитический центр геохимии природных систем» ТГУ (г. Томск), аналитик Е. Карбовяк

Note to table 1. Here and below diagnostics of chemical composition of sulfides was performed by X-ray spectral microanalysis [17] on electron scanning microscope «Tescan Vega II LMU» equipped with energy-dispersive spectrometer (with detector Si (Li) Standard) INCA Energy 350 and wave-dispersive spectrometer INCA Wave 700 at TPU «Analytic center of natural system geochemistry» (Tomsk), the operator is E. Karbovyak.

товых обособлений либо представлен в виде аллотриоморфных агрегатов в ассоциации с пирротинитом и пентландитом (рис. 1, а, в). По химическому составу такой халькопирит близок своей стехиометрической формуле.

Халькопирит второй генерации формирует неправильные агрегативные выделения размером до 0,4 мм, заполняющие мелкие интерстиции между силикатными зернами, и отклоняется от стехиометрического состава повышенными содержаниями железа (до 41,15 %) при пониженных содержаниях меди (23,52...24,30 %) (рис. 2, б; табл. 1).

В метагаббро отмечается развитие по халькопириту неравномерных каемок пирита, который в свою очередь интенсивно замещается каймой магнетита (рис. 2, в).

По химическому составу халькопириты первой генерации в целом близки халькопиритам из Талажинского и Кингашского массивов. Однако аргысукские и талажинские халькопириты отличаются от кингашских несколько большей железистостью.

**Пирит**, подобно халькопириту, также отмечен в виде двух генераций, первая из которых формирует самостоятельные мелкие округлые и неправильные зерна размером до 0,3 мм в основной силикатной массе породы, а вторая представлена в виде кайм замещения по зернам пирротина и халькопирита (рис. 1, б; рис. 2, в, г). При этом пирит второй генерации отличается от пирита первой генерации меньшим содержанием S при большей железистости (табл. 1).

Пирит имеет неровный, бугристый рельеф, по краевым зонам зерен часто отмечается интенсивное развитие магнетита (рис. 2, в, г).

**Галенит** выявлен в виде «сыпи» самостоятельных мелких (до 0,01 мм) округлых зерен, обособляющихся вокруг более крупных зерен пирротина и пентландита. В химическом составе нередко отмечается примесь железа до 0,58 % (табл. 2; рис. 1, а).

**Железистый сфалерит** (содержание Fe > 3 %, табл. 2) отмечен единожды в метагаббро в виде самостоятельного мелкого зерна размером ~4 мкм, неподалеку от зерен мангонильменита и рутила (рис. 2, д). Подобный специфический по химическому составу сфалерит с содержанием Fe до 6,5 % ранее был диагностирован в габброидах Талажинского массива [11].

**Таблица 2.** Химический состав второстепенных сульфидов из габброидов Аргысукского массива, вес. %

**Table 2.** Chemical composition of minor secondary sulfide minerals from gabbroides of Argysuksky massif, wt. %

| Образец<br>Sample | Минерал<br>Mineral      | S     | Fe    | Ni    | Cu    | Pb    | Zn    |
|-------------------|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 151-7-1           | Халькозин<br>Chalcocine | 23,13 | 2,70  | 1,18  | 72,99 | –     | –     |
| 151-8-2           | Борнит<br>Bornite       | 26,38 | 10,11 | –     | 63,51 |       |       |
| 151-8-3           | Миллерит<br>Millerite   | 34,73 | 1,15  | 60,02 | 4,10  |       |       |
| 41/5-8-1          | Сфалерит<br>Sphalerite  | 33,69 | 3,07  | –     | –     | 86,42 | 63,23 |
| 151-4-1           | Галенит<br>Galena       | 13,00 | 0,58  |       |       |       |       |
| 2144-10-1         | Галенит<br>Galena       | 12,89 | –     | –     | –     | 87,11 | –     |
|                   |                         |       |       |       |       |       |       |

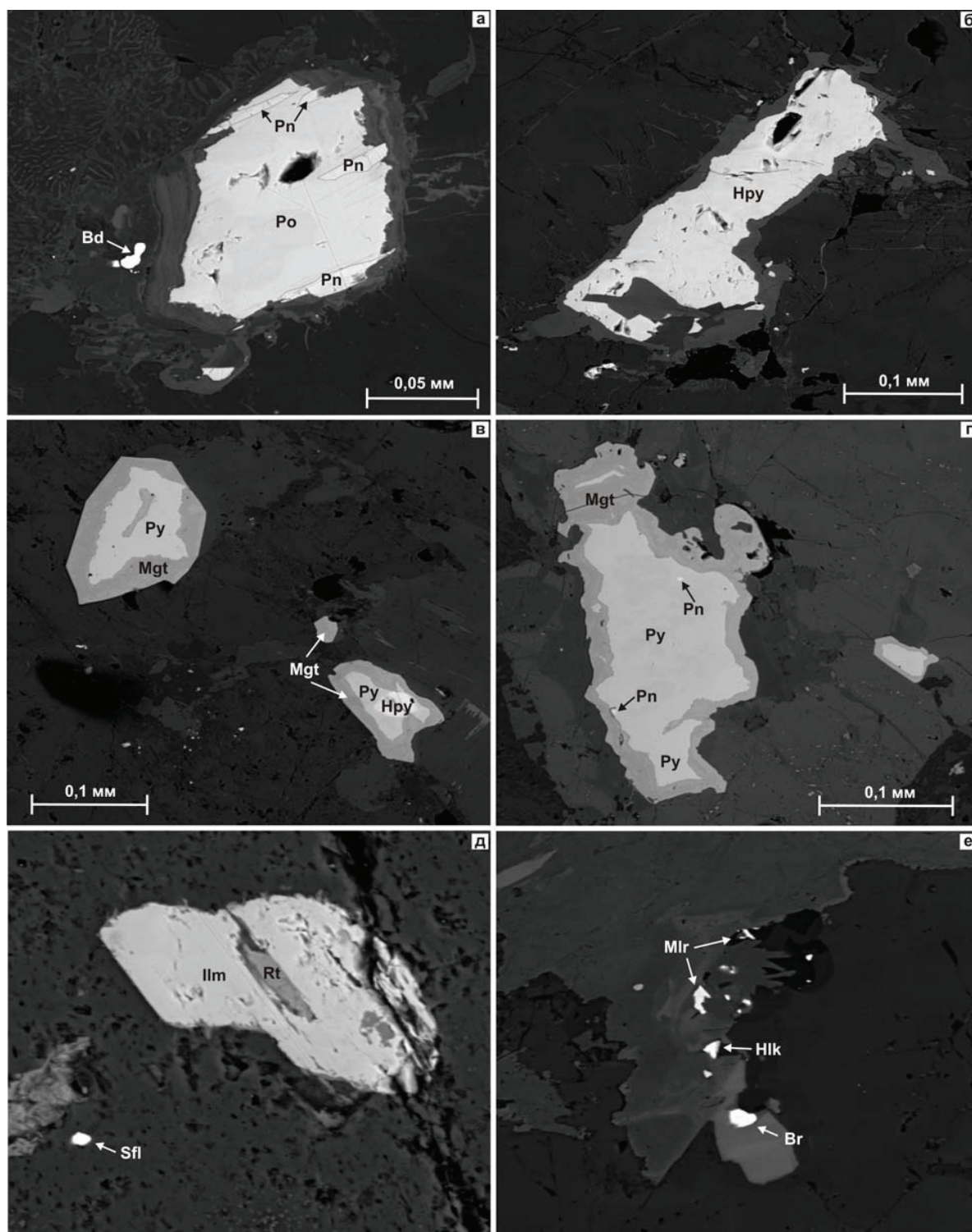
**Миллерит, борнит и халькозин** выявлены в тесной ассоциации друг с другом в виде «сыпи» мелких (первые микроны) однообразных округлых зерен, диагностируемых только путем применения метода рентгеноспектрального анализа (рис. 2, е; табл. 2). Нередко они также ассоциируют с агрегативными неправильными выделениями халькопирита.

## Выводы

Впервые в габброидах Аргысукского массива проведена детальная диагностика сульфидной минерализации. Полученные результаты позволили к настоящему времени расширить минералогию сульфидов Аргысукского массива до 12 разновидностей. Наряду с известными до этого сульфидными минералами (пирит, пирротин, халькопирит, железистый халькопирит, пентландит), впервые выявлены и описаны новые для данного массива разновидности сульфидов: никелистый пирротин, галенит, железистый сфалерит, миллерит, борнит, халькозин.

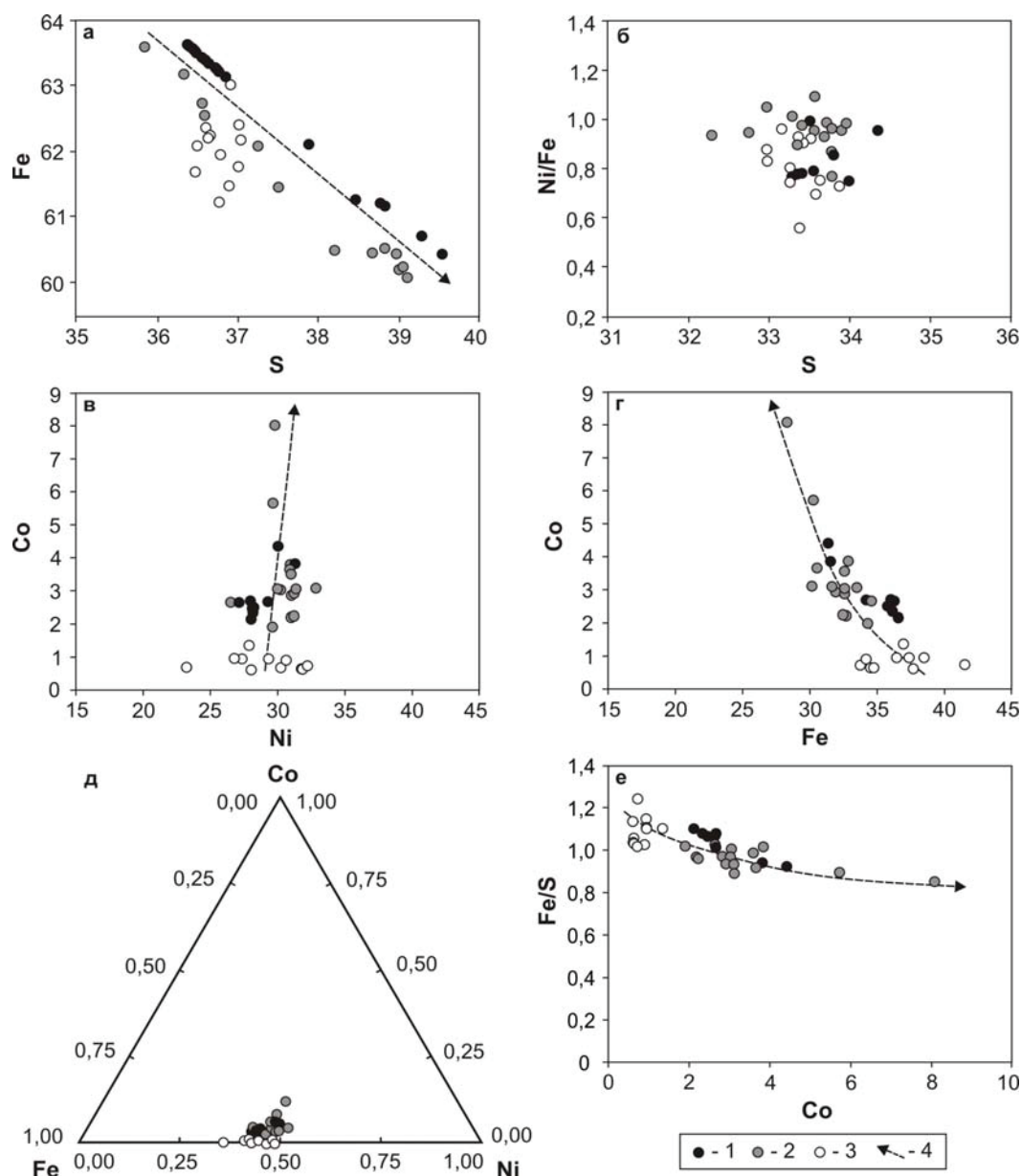
Полученные результаты показывают высокое сходство сульфидов Аргысукского массива с подобной минерализацией из габброидов (троктолитов, оливиновых габбро) Талажинского массива. Это, наряду с ранее полученными результатами петрологического исследования, свидетельствует в пользу большой схожести данных интрузивов.

Кристаллизация сульфидной минерализации, очевидно, осуществлялась из сульфидного расплава повышенной железистости, выделившегося в



**Рис. 2.** Микрофотографии сульфидной минерализации (режим BSE, сканирующий микроскоп «Tescan Vega II LMU») в габброидах Аргысукского массива: Po – пирротин; Pn – пентландит; Hpy – халькопирит; Py – пирит; Sfl – сфалерит; Hlk – халькозин; Br – борнит; Mlr – миллерит. Сопутствующие минералы: Mgt – магнетит; Ilm – ильменит; Rt – рутил; Bd – бадделейт

**Fig. 2.** Microphotographs of sulfide mineralization (BSE mode, scanning microscope «Tescan Vega II LMU») in gabbroides of Argysuksky massif: Po – pyrrhotite; Pn – pentlandite; Hpy – chalcopyrite; Py – pyrite; Sfl – sphalerite; Hlk – chalcosine; Br – bornite; Mlr – millerite. Related minerals: Mgt – magnetite; Ilm – ilmenite; Rt – rutile; Bd – baddeleyite



**Рис. 3.** Диаграммы элементного состава пирротитов (а) и пентландитов (б-е) из Аргысукского, Талажинского и Кингашского массивов Канской глыбы (СЗ Восточного Саяна). 1 – Аргысукский массив; 2 – Талажинский массив; 3 – Кингашский массив, по [18]; 4 – эволюционный тренд составов

**Fig. 3.** Diagrams of composition of pyrrhotines (a) and pentlandites (б-е) from Argysuisky, Talazhinsky and Kingash massifs of Kan block (NW of Eastern Sayan). 1 – Argysuisky massif; 2 – Talazhinsky massif; 3 – Kingash massif, according to [18]; 4 – evolutionary trend

процессе ликвации из исходного магматического расплава и претерпевшего последующую дифференциацию в процессе становления интрузива. На последнее предположение указывает присутствие наряду с основными сульфидами их переходных разновидностей, а также разброс значений содержания элементов внутри основных разновидностей сульфидов.

При понижающихся температурах из исходного сульфидного расплава осуществлялась близкая по времени кристаллизация зерен пирротина и

пентландита, с образованием на начальном этапе ряда твердых растворов между этими двумя сульфидами. Нередкое присутствие совместно с пирротитом и пентландитом халькопирита позволяет сделать предположение о повышенной фугитивности S и значимой роли Си в рудной системе на момент кристаллизации габброидов и, как следствие, ранней кристаллизации данного минерала наряду с пирротин-пентландитовыми выделениями.

Формирование железистого халькопирита, обеих генераций пирита, галенита, железистого сфа-

лерита, миллерита, борнита и халькозина автор склонен связывать с эпимагматическими гидротермальными процессами. При этом особенности химизма состава данных минералов также указывают на повышенную железистость и повышенную фугитивность серы в постмагматическом флюиде.

В соответствии с классической гравитационной моделью, наибольшая концентрация сульфидов происходит в результате опускания капелек сульфидной жидкости из головы магматической колонны в придонные части магматической камеры с их последующей сегрегацией в структурных ловушках и образованием густовкрапленного или сплошного оруденения [19, 20]. Учитывая, что магнитометрией доказывается наличие «скрытого» под габброидами ультрамафитового тела в основании Аргысукского массива, данная модель позволяет предположить потенциальную его рудоносность. При этом исследуемый массив, в отличие от Талажинского, характеризуется слабым эрозийным срезом, что позволяет ожидать полную сохранность предполагаемого Cu-Ni оруденения в его придонной ультрамафитовой части.

На потенциальную рудоносность Аргысукского массива также указывает его высокое сходство с Талажинским массивом плагиодунит-троктолит-анортосит-габбрового состава, который к настоящему времени причислен к рифейской дунит-трок-

толит-габбровой никеленосной формации [11, 12], характерными представителями которой являются массивы Войсис-Бей (Лабрадор, Канада), Дулут (Миннесота, США), Маскок (Нунавут, Канада), Джинчуан (Ганьсу, Китай), пояс интрузивов Кабанга-Мусонгати (Западная Танзания), Йоко-Довыренский (Северное Прибайкалье, Россия) и др. [19, 21–25]. Интрузивы данной формации относятся к перспективным источникам рифейской эпохи Pt-Cu-Ni рудообразования и включают как богатые Pt-Cu-Ni руды, так и малосульфидные оруденения ЭПГ [26, 27].

В пользу потенциальной рудоносности Аргысукского массива также указывают выявленные не редкие находки бадделеита вблизи сульфидных капель (рис. 2, а). Подобная минеральная ассоциация ранее была описана в образцах Таймырского, Талнахского и Норильского интрузивов, включающих уникальное Pt-Cu-Ni оруденение [28].

Отмеченные выше соотношения позволяют предположить высокую степень перспективности Аргысукского массива на обнаружение Pt-Cu-Ni оруденения. Для подтверждения факта наличия «скрытой» под габброидами ультрамафитовой пластины в его нижней части и реальной оценки степени ее рудоносности необходима постановка разведочного бурения со сквозной проходкой габбровой «покрышки».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Платиноносность ультрамафит-мафитов Монголии и Тувы / Л.В. Агафонов, Ж. Лхамсурэн, К.С. Кужугет, Ч.К. Ойдул. – Улаанбаатар: Монгольский государственный университет науки и технологии, 2005. – 224 с.
2. Kuzmin M.I., Yarmolyuk V.V. Mantle plumes of Central Asia (northeast Asia) and their role in forming endogenous deposits // *Russian Geology and Geophysics*. – 2014. – V. 55. – № 2. – P. 120–143.
3. Mineralogy and geochemistry of the Tartai massif, East Siberian metallogenic province / M.Y. Podlipsky, N.D. Tolstykh, A.V. Vishnevskiy, G.V. Polyakov, A.S. Mekhonoshin // *Geology of Ore Deposits*. – 2015. – V. 57. – № 3. – P. 172–196.
4. Юричев А.Н. Идарский ультрамафитовый комплекс Восточного Саяна: петрогеохимические особенности и вопросы рудоносности // *Отечественная геология*. – 2014. – № 6. – С. 56–66.
5. Field Relationships and Geochemical Constraints on the Emplacement of the Jinchuan Intrusion and its Ni-Cu-PGE Sulfide Deposit, Gansu, China / J. Lehmann, N. Arndt, B. Windley, M.-F. Zhou, C.Y. Wang, C. Harris // *Econ. Geol.* – 2007. – V. 102. – P. 75–94.
6. Ultramafic-mafic igneous complexes of the precambrian East Siberian metallogenic province (southern framing of the Siberian craton): age, composition, origin, and ore potential / G.V. Polyakov, N.D. Tolstykh, A.E. Izokh, M.Y. Podlipskii, A.S. Mekhonoshin, T.B. Kolotilina, D.A. Orsoev // *Russian Geology and Geophysics*. – 2013. – V. 54. – № 11. – P. 1319–1331.
7. Ore mineralogy of PGM placer in Siberia and the Russian Far East / N. Tolstykh, A. Krivenko, E. Sidirov, K. Laajoki, M. Podlipsky // *Ore Geol. Rev.* – 2002. – V. 20. – P. 1–25.
8. Платиноносность ультрабазит-базитовых комплексов Юга Сибири / под ред. В.И. Богнибова, А.П. Кривенко, А.Э. Изова и др. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «ГЕО», 1995. – 151 с.
9. 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.
10. 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.
11. Юричев А.Н. Геолого-генетическая модель образования и потенциальная рудоносность мафит-ультрамафитовых массивов талажинского и кулибинского комплексов Восточного Саяна: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск: Изд-во ТПУ, 2011. – 22 с.
12. Yurichev A.N., Chernyshov A.I., Konnikov A.E. The Talazhin plagioclone-troctolite-anorthosite-gabbro massif (East Sayan): petrogeochemistry and ore potential // *Russian Geology and Geophysics*. – 2013. – V. 54. – № 2. – P. 166–180.
13. Юричев А.Н., Чернышов А.И. Талажинский и Аргысукский массивы: общность петролого-геохимических черт (северо-запад Восточного Саяна) // *Известия Томского политехнического университета*. – 2015. – Т. 326. – № 1. – С. 40–49.
14. Юричев А.Н. Рудная минерализация габброидов Аргысукского массива (северо-запад Восточного Саяна) // *Известия ТПУ. Инжиниринг георесурсов*. – 2016. – Т. 327. – № 7. – С. 35–45.
15. Глазунов О.М., Богнибов В.И., Еханин А.Г. Кингашское платиноидно-медно-никелевое месторождение. – Иркутск: Изд-во ИГТУ, 2003. – 192 с.
16. 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.
17. Reed S.J.B. Electron microprobe analysis and scanning electron microscopy in geology. – N.Y.: Cambridge University Press, 2005. – 189 p.

18. Князев В.Н. Геология и условия образования благороднометалльного и медно-никелевого оруденения Канского зеленокаменного пояса (Восточный Саян): дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Красноярск, 2004. – 145 с.
19. Naldrett A.J. Magmatic sulfide deposits: geology, geochemistry and exploration. – Berlin: Springer, 2004. – 727 p.
20. Вахрушев А.М. Компьютерная модель формирования массивных сульфидных медно-никелевых руд Норильского месторождения // Руды и металлы. – 2012. – № 4. – С. 36–41.
21. Barnes S.-J., Zientek M.L., Seversen M.J. Ni, Cu, Au, and platinum-group element contents of sulphides associated with intraplate magmatism: a synthesis // Canadian Journal of Earth Sciences. – 1997. – V. 34. – № 4. – P. 337–351.
22. Formation of the Jinchuan ultramafic intrusion and the world's third largest Ni-Cu sulfide deposit: associated with the ~825 Ma south China mafic plume / X.H. Li, L. Su, S.-L. Chung, Z.X. Li, Y. Liu, B. Song, D.Y. Liu // Geochemistry, geophysics, geosystems. – 2005. – V. 6. – № 11. – P. 1–16.
23. Maier W.D., Barnes S.-J., Ripley E.M. The Kabanga Ni sulfide deposits, Tanzania: a review of ore-forming processes // Reviews in Economic Geology. – 2011. – V. 17. – P. 217–234.
24. Early Kibaran rift-related mafic-ultramafic magmatism in western Tanzania and Burundi: petrogenesis and ore potential of the Kapalagulu and Musongati layered intrusions / W.D. Maier, S.-J. Barnes, D. Bandyayera, T. Livesey, C. Li, E. Ripley // Lithos. – 2008. – V. 101. – P. 24–53.
25. The Dovyren intrusive complex: problems of petrology and Ni sulfide mineralization / A.A. Ariskin, G.S. Nikolaev, G.S. Barmina, K.A. Bychkov, E.G. Konnikov, L.V. Danyushevsky, E.V. Kislov, D.A. Orsoev // Geochemistry International. – 2009. – Т. 47. – № 5. – С. 425–453.
26. Кислов Е.В. Рифейская платинометалло-медно-никелевая металлогеническая эпоха: факторы рудообразования // Петрология магматических и метаморфических комплексов. – Томск: ЦНТИ, 2009. – Вып. 7. – С. 328–338.
27. Кислов Е.В., Конников Э.Г. Рифейская эпоха платинометалло-медно-никелевого рудообразования // Проблемы геологии и геохимии юга Сибири. – Томск: Изд-во ТГУ, 2000. – С. 67–72.
28. Серова А.А., Спиридонов Э.М. Бадделлит в ореолах флюидного воздействия над каплями сульфидов в пикритовых габбро-долеритах, плагиолерцолитах и троктолитах рудоносных интрузивов норильского типа // Известия вузов. Геология и разведка. – 2015. – № 3. – С. 83–85.

*Поступила 31.05.2017 г.*

#### **Информация об авторах**

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

UDC 552.321.5:553.08

**SULFIDES OF ARGYSUKSKY GABBRO MASSIF (NORTHWEST OF EASTERN SAYAN)**

**Alexey N. Yurichev,**  
juratur@sibmail.com

National Research Tomsk State University,  
36, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

**The relevance** of the work is caused by the need in detailed petrological studies of numerous potentially mineralized 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.

**The main aim** of the research is a complex study of sulfide mineralization of gabbroides of the Argysuksky massif in order to assess the degree of potential prospect of intrusion for detecting commercial copper-nickel mineralization in it.

**The methods:** study of ore mineralization in polished sections using a polarizing microscope AxioScope Carl Zeiss; determination of chemical composition of ore mineralization by the method of X-ray spectrum microanalysis using scanning electron microscope Tescan Vega II LMU, equipped with energy-dispersive spectrometry (with a semiconductor Si (Li) detector INCA x-sight) INCA Energy 450 and wave-dispersive spectrometer INCA Wave 700.

**The results.** The detailed diagnosis of sulfide mineralization was carried out in gabbroides of Argysuksky massif. The mineralization increased to 12 mineral varieties. The studied mineralization shows high similarity on specialization, mineral recruitment and chemistry with sulfides from gabbros of Talazhinsky massif, which further confirms the earlier assumption made about the high similarity of these objects and their assignment to a single formation type. Typomorphic and chemical features of sulphides indicate that their crystallization in gabbros occurred from the original high-iron sulfide melt at high sulfur fugacity and significant role of copper in ore system. The results obtained, along with petrological features, point out on great promise of the test massif for detection of Cu-Ni ores.

**Key words:**

Argysuksky massif, gabbroides, sulfides, chemistry, genesis, potentially ore-bearing.

**REFERENCES**

1. Agafonov L.V., Lkhamsuren J., Kuzhuget K.S., Oydup Ch.K. *Platinonosnost ultramafit-mafitov Mongolii i Tuvy* [Ultramafic-mafic PGE of Mongolia and Tuva]. Ulaanbaatar, Mongolian University of Science and Technology, 2005. 224 p.
2. Kuzmin M.I., Yarmolyuk V.V. Mantle plumes of Central Asia (northeast Asia) and their role in forming endogenous deposits. *Russian Geology and Geophysics*, 2014, vol. 55, no. 2, pp. 120–143.
3. Podlipsky M.Y., Tolstykh N.D., Vishnevskiy A.V., Polyakov G.V., Mekhonoshin A.S. Mineralogy and geochemistry of the Tartai massif, East Siberian metallogenic province. *Geology of Ore Deposits*, 2015, vol. 57, no. 3, pp. 172–196.
4. Yurichev A.N. Idarsky ultramafic complex of the Eastern Sayan: petrogeochemical features and issues of ore-bearing. *Otechestvennaya geologiya*, 2014, no. 6, pp. 56–66. In Rus.
5. Lehmann J., Arndt N., Windley B., Zhou M.-F., Wang C.Y., Harris C. Field Relationships and Geochemical Constraints on the Emplacement of the Jinchuan Intrusion and its Ni-Cu-PGE Sulfide Deposit, Gansu, China. *Econ. Geol.*, 2007, vol. 102, pp. 75–94.
6. Polyakov G.V., Tolstykh N.D., Izokh A.E., Podlipskii M.Y., Mekhonoshin A.S., Kolotilina T.B., Orsoev D.A. Ultramafic-mafic igneous complexes of the Precambrian East Siberian metallogenic province (southern framing of the Siberian craton): age, composition, origin, and ore potential. *Russian Geology and Geophysics*, 2013, vol. 54, no. 11, pp. 1319–1331.
7. Tolstykh N., Krivenko A., Sidirov E., Laajoki K., Podlipsky M. Ore mineralogy of PGM placer in Siberia and the Russian Far East. *Ore Geol. Rev.*, 2002, vol. 20, pp. 1–25.
8. *Platinonosnost ultrabazit-bazitovykh kompleksov Yuga Sibiri* [PGE of mafic-ultramafic complexes of South Siberia]. Eds. V.I. Bognibova, A.P. Krivenko, A.E. Izokh. Novosibirsk, Publ. House of SB RAS, Branch «Geo», 1995. 151 p.
9. Yurichev A.N., Chernyshov A.I. Ore mineralization of peridotites and gabbroides of the Kulibinsky complex (north-west of the Eastern Sayan). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2011, vol. 319, no. 1, pp. 64–70. In Rus.
10. Kornev T.Ya., Ekhanin A.G., Knyazev V.N., Sharifulin S.K. *Zelenokamennyye 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.
11. Yurichev A.N. *Geologo-geneticheskaya model obrazovaniya i potentsialnaya rudonosnost mafit-ultramafitovykh massivov talazhinskogo i kulibinskogo kompleksov Vostochnogo Sayana*. Avtoref. Dis. Kand. nauk [Geologic genetic model of formation and potentially mineralization of mafic-ultramafic massifs of talazhinsky and kulibinsky complexes of Eastern Sayan. Cand. Diss. Abstract]. Tomsk, 2011. 22 p.
12. Yurichev A.N., Chernyshov A.I., Konnikov A.E. The Talazhin plagioclone-troctolite-anorthosite-gabbro massif (East Sayan): petrogeochemistry and ore potential. *Russian Geology and Geophysics*, 2013, vol. 54, no. 2, pp. 166–180.
13. Yurichev A.N., Chernyshov A.I. Talazhinsky and Argysuksky massifs: petrologo-geochemistry common traits (Northwest of Eastern Sayan). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2015, vol. 326, no. 1, pp. 40–49. In Rus.
14. Yurichev A.N. Ore mineralization from gabbroides of Argysuksky massif (north-west of Eastern Sayan). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 7, pp. 35–45. In Rus.
15. Glazunov O.M., Bognibov V.I., Ekhanin A.G. *Kingashskoe platinoidno-medno-nikelevoe mestorozhdenie* [Kingash platinum-copper-nickel deposit]. Irkutsk, IGTU Publ., 2003. 192 p.
16. Gertner I.F., Vrublevskiy V.V., Glazunov O.M., Tishin P.A., Krasnova T.S., Voytenko D.N. Age and nature of the substance of Kingash ultramafic-mafic massif, Eastern Sayan. *Doklady Akademii nauk*, 2009, vol. 429, no. 5, pp. 645–651. In Rus.
17. Reed S.J.B. *Electron microprobe analysis and scanning electron microscopy in geology*. N.Y., Cambridge University Press, 2005. 189 p.
18. Knyazev V.N. *Geologiya i usloviya obrazovaniya blagorodnometalnogo i medno-nikelevogo orudneniya Kanskogo zelenokamennogo poyasa (Vostochny Sayan)*. Dis. Kand. nauk [Geology and

- conditions for formation of noble metal and copper-nickel mineralization of the Kan Greenstone Belt (Eastern Sayan). Cand. Diss.]. Krasnoyarsk, 2004. 145 p.
19. Naldrett A.J. *Magmatic sulfide deposits: geology, geochemistry and exploration*. Berlin, Springer, 2004. 727 p.
  20. Vakhrushev A.M. Computer model for formation of massive sulfide copper-nickel ores of Norilsk deposit. *Rudy i metally*, 2012, no. 4, pp. 36–41. In Rus.
  21. Barnes S.-J., Zientek M.L., Seversen M.J. Ni, Cu, Au, and platinum-group element contents of sulphides associated with intraplate magmatism: a synthesis. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1997, vol. 34, no. 4, pp. 337–351.
  22. Li X.H., Su L., Chung S.-L., Li Z.X., Liu Y., Song B., Liu D.Y. Formation of the Jinchuan ultramafic intrusion and the world's third largest Ni-Cu sulfide deposit: associated with the ~825 Ma south China mafic plume. *Geochemistry, geophysics, geosystems*, 2005, vol. 6, no. 11, pp. 1–16.
  23. Maier W.D., Barnes S.-J., Ripley E.M. The Kabanga Ni sulfide deposits, Tanzania: a review of ore-forming processes. *Reviews in Economic Geology*, 2011, vol. 17, pp. 217–234.
  24. Maier W.D., Barnes S.-J., Bandyayera D., Livesey T., Li C., Ripley E. Early Kibaran rift-related mafic-ultramafic magmatism in western Tanzania and Burundi: petrogenesis and ore potential of the Kapalagulu and Musongati layered intrusions. *Lithos*, 2008, vol. 101, pp. 24–53.
  25. Ariskin A.A., Nikolaev G.S., Barmina G.S., Bychkov K.A., Konnikov E.G., Danyushevsky L.V., Kislov E.V., Orsoev D.A. The Dovyren intrusive complex: problems of petrology and Ni sulfide mineralization. *Geochemistry International*, 2009, vol. 47, no. 5, pp. 425–453.
  26. Kislov V.E. Rifeyskaya platinometalno-medno-nikelevaya metallogenicheskaya epokha: faktory rudoobrazovaniya [Riphean PGM-copper-nickel metallogenic epoch: factors of mineralization]. *Petrologiya magmaticheskikh i metamorficheskikh kompleksov* [Petrology of igneous and metamorphic complexes]. Tomsk, TsNTI Publ., 2009. Iss. 7, pp. 328–338.
  27. Kislov V.E., Konnikov E.G. Rifeyskaya epokha platinometalno-medno-nikelevogo rudoobrazovaniya [Riphean era of PGE-copper-nickel mineralization]. *Problemy geologii i geokhimii yuga Sibiri* [Problems of Geology and Geochemistry of southern Siberia]. Tomsk, Tomsk State University Press, 2000. pp. 67–72.
  28. Serova A.A., Spiridonov E.M. Baddeleyite in halos of fluid influence on droplets of sulfides in picritic gabbro-dolerites, plagioclherzolites and troctolites of ore-bearing intrusives of norilsk type. *Izvestiya vuzov. Geologiya i razvedka*, 2015, no. 3, pp. 83–85. In Rus.

Received: 31 May 2017.

#### Information about the authors

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

УДК 621.18

## ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТВЕРДОТОПЛИВНОГО ОТОПИТЕЛЬНОГО КОТЛА

Хаустов Сергей Александрович<sup>1</sup>,  
khaustovSA@tpu.ru

Хаустова Ольга Владимировна<sup>1</sup>,  
olgaolga@tpu.ru

Ермолаев Антон Николаевич<sup>2</sup>,  
ermolaevanton03@gmail.com

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

<sup>2</sup> Тюменский индустриальный университет,  
Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38.

**Актуальность** работы обусловлена тем, что в настоящее время отсутствует достаточно работоспособный с инженерной точки зрения математический аппарат, позволяющий производить динамическое моделирование твердотопливного отопительного котла на временных интервалах большой длительности, например, для определения годовых расходов с учетом метеорологических и технологических особенностей расположения объекта проектирования. Кроме того, динамическая модель твердотопливного отопительного котла необходима для настройки автоматических систем регулирования и выявления опасных отклонений параметров на стадии проектирования.

**Цель исследования:** разработать применимую на практике производительную модель твердотопливного отопительного котла с достаточным уровнем детализации.

**Методы.** Записаны обыкновенные дифференциальные уравнения для динамических характеристик твердотопливного отопительного котла. Решение уравнений производилось методом Эйлера с последующей итерационной обработкой на базе специально разработанного программно-исследовательского комплекса.

**Результат.** Представлена новая одномерная нестационарная физическая модель твердотопливного жаротрубного котла, которая не требует большого вычислительного времени для качественного моделирования его работы. Приведен алгоритм, используя который предложенная модель может быть легко реализована и применена в инженерной практике. Для апробации разработанной модели произведено численное исследование слоевого сжигания в котле КВр-0,8 твердого топлива двух марок: бурый уголь ирша-бородинский 2Б и каменный уголь Кузнецкого бассейна 1СС. По результатам численного эксперимента установлено, что среднеинтегральные значения производительности и КПД-брутто зависят от аэродинамической схемы в котле и времени между загрузками топлива. Размах вариации значений производительности составил 42 кВт для бурого угля и 75 кВт для каменного. Размах вариации КПД-брутто – 1,8 и 2,9 % для бурого и каменного углей соответственно.

### Ключевые слова:

Жаротрубный котел, моделирование, теплопередача, динамические характеристики, твердое топливо, уголь, тренажер.

### Введение

Известно, что нагрузка отопительного котла определяется тепловой энергией, которая потребляется системой отопления [1]. Поскольку уровень потребления тепловой энергии изменяется во времени, варьируется и нагрузка на отопительный котел соответственно. Режим работы котла при смене нагрузки принято характеризовать как переходный [2]. В переходном режиме изменяются теплофизические характеристики поверхностей нагрева, коэффициент полезного действия котла и отпускаемая потребителям мощность. При этом тепловая инерция водяного тракта котла увеличивает время перехода с одного режима на другой.

Длительность изменения и численные значения перечисленных параметров при переходных режимах работы котла отображаются его динамическими характеристиками. В общем случае динамические характеристики представляют собой зависимости изменения во времени производительности и эффективности котла при варьировании его режимными параметрами [3]. В мировой прак-

тике проектирования для определения динамических характеристик котла применяется метод динамического моделирования [4]. Этим методом изучают, например, влияние тепловой инерции вторичных переизлучателей на уменьшение вредных выбросов в камере сгорания трехходового котла [5] и системы испарения водотрубных котлов [6–9]. Тем не менее, представленные в литературе модели, как правило, не рассматривают все протекающие в котле процессы, а сосредоточены на каком-то одном из аспектов производительности при номинальных рабочих условиях.

На стадии проектирования динамическая модель отопительного котла незаменима для выявления опасных отклонений теплотехнических характеристик топлива и режимных параметров, а также для разработки и настройки систем автоматического регулирования. Кроме того, динамические характеристики котла являются определяющими при разработке различных тренажеров для обучения операторов и персонала котельной. Поэтому динамическая модель котла должна адекват-

но описывать нестационарные процессы в его газо-воздушном и водяном трактах при пуске, останове и длительном номинальном режиме работы котла [10].

С развитием вычислительной техники широкое распространение получили математические модели, которые позволяют откорректировать конструктивные решения еще на стадии проектирования с учетом рабочих параметров и характеристик эффективности котла. Наиболее часто используются так называемые CFD-модели (от англ. Computational Fluid Dynamics) в стационарной постановке [11–16] с высокой степенью детализации, в которых течение, смешивание, сгорание и теплообмен считаются постоянными во времени. Однако нагрузка на отопительные котлы небольшой мощности значительно изменяется в течение всего года, вслед за изменением температуры наружного воздуха. Кроме того, в процессе длительной эксплуатации твердотопливных котлоагрегатов, как правило, меняются характеристики топлива, что также требует корректировки режима работы. Детальное CFD-моделирование физических процессов требует получения устойчивого решения системы сложных дифференциальных уравнений ресурсоёмким методом конечных элементов, что делает неэффективным применение CFD-моделей для решения практико-ориентированных нестационарных задач теплообмена на временных интервалах большой длительности [17, 18]. По этой причине CFD-модели преимущественно применяются для моделирования газовых и жидкотопливных отопительных котлов, где при постоянной тепловой нагрузке соблюдается стационарный режим горения. В топках твердотопливных отопительных котлов даже при постоянной тепловой нагрузке процессы горения протекают в нестационарном режиме: топливо обычно сжигается на колосниковой решетке слоевым способом, с периодической дозагрузкой, шуровкой и очисткой колосников от шлака. В процессе сжигания изменяется толщина слоя, что приводит к изменению воздушного режима топки, характеризуемого расходом воздуха через колосниковую решетку [19].

В настоящее время отсутствует достаточно работоспособный с инженерной точки зрения математический аппарат, позволяющий производить динамическое моделирование твердотопливного отопительного котла на временных интервалах большой длительности, например, для определения годовых расходов с учетом метеорологических и технологических особенностей расположения объекта проектирования. Для таких объектов трудно производить многофакторную оптимизацию регулируемых величин, устанавливать взаимосвязь между возможными режимными параметрами и эффективностью [20]. Таким образом, для моделирования твердотопливного отопительного котла следует разработать производительную модель с достаточным уровнем детализации. Целью работы является реализация такой модели.

### Физико-математическая постановка задачи

При слоевом сжигании топлива процесс горения сосредоточен в пределах довольно тонкого слоя и имеет свойство саморегулирования, т. е. количество прореагировавшего угля будет соответствовать количеству поданного воздуха [21].

Предположим, что имеет место диффузионный режим горения и скорость реакции регулируют путем изменения давления дутья. Обозначим:  $F$  – площадь ( $\text{м}^2$ ) колосниковой решетки, на которой происходит сжигание топлива;  $m$  – масса ( $\text{кг}$ ) топлива на решетке в произвольный момент времени  $t$ . Как уже было отмечено,  $m$  – переменная величина, которая будет изменяться пропорционально расходу подаваемого на горение воздуха. Величина расхода топлива, которая определяет тепловую мощность котла, есть первая производная  $m$  по

времени  $t$ :  $\dot{m} = \frac{\partial m}{\partial t}$ . На практике тепловую мощность водогрейного котла принято определять как

количество теплоты ( $\text{кВт}$ ), переданное теплоносителю (воде) в процессе сгорания топлива в топке. По известным значениям теплотворной способности топлива  $Q$  ( $\text{кДж/кг}$ ) и коэффициенту полезного действия котла  $\eta$  это количество тепла ( $\text{кВт}$ ) можно записать как

$$P = Q \cdot \eta \cdot \dot{m}.$$

Однако в действительности из-за влияния тепловой инерции при переходных режимах работы котла количество теплоты, переданное потребителю, отличается от этого значения и в общем случае выражается как

$$P = \dot{m}_в \cdot c_в \cdot (T_{out} - T_{in}),$$

где  $\dot{m}_в$  – массовый расход котловой воды,  $\text{кг/с}$  (производительность насоса котлового контура);  $c_в$  – удельная теплоемкость воды ( $\text{кДж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ );  $T_{out}$  и  $T_{in}$  – температуры прямой и обратной сетевой воды соответственно,  $^{\circ}\text{C}$ .

Слойовой процесс сжигания углей на неподвижной колосниковой решетке с ручной загрузкой топлива имеет выраженную цикличность. Каждый цикл включает следующие стадии: испарение влаги, выделение летучих веществ и их горение, активное горение коксового остатка в слое, его догорание. Каждая из стадий требует подачи в топку определенного количества воздуха для горения. На практике это количество принято определять коэффициентом избытка воздуха  $\alpha$  – эмпирическим безразмерным коэффициентом, который показывает, во сколько раз действительный объем воздуха, расходуемого на сгорание 1  $\text{кг}$  топлива, отличается от  $V_0$  – теоретически необходимого объема воздуха, который согласно стехиометрической реакции горения требуется для полного сгорания 1  $\text{кг}$  топлива [22].

Циклическое изменение коэффициента избытка воздуха в топках, работающих с периодической загрузкой твердого топлива, хорошо изучено и

представлено в литературе в виде эмпирических зависимостей [23–25]. При моделировании  $\alpha$  может быть математически представлен в виде неко-

торой функции вида  $\alpha = f\left(\frac{m_0 - m}{m_0}\right)$ , где  $m_0$  – ис-

ходная масса топлива, а все выражение в скобках – степень завершенности процесса горения. Таким образом, можно избежать ресурсоемкой вычислительной задачи моделирования множества взаимосвязанных химических реакций, участвующих в сгорании топлива.

При изучении слоевого сжигания часто используется понятие скорости фильтрации, которое определяется как секундный расход воздуха, отнесенный к полной площади сечения слоя. Используя это понятие, объемный расход воздуха запишем произведением  $F \cdot \varpi$ , где  $\varpi$  – средняя скорость фильтрации в произвольный момент времени  $t$ ,  $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ , тогда расход топлива запишется уравнением:

$$\dot{m} = \frac{F \cdot \varpi}{V_0 \cdot \alpha}, \text{ кг / с.} \quad (1)$$

Управление процессом горения угля на решетке обеспечивается регулированием подаваемого дутья и отвода дымовых газов за котлом. Регулирующими параметрами является давление воздуха в нагнетательном воздухопроводе  $p_{in}$  и давление дымовых газов за котлом  $p_{out}$  (Па). Управляя этими параметрами, можно контролировать сумму сопротивлений газового  $\Delta p_r$  и воздушного  $\Delta p_v$  трактов котла (Па):

$$p_{in} - p_{out} = \Delta p_r + \Delta p_v.$$

Выразим аэродинамическое сопротивление воздушного тракта  $\Delta p_v$  через среднюю скорость фильтрации  $\varpi$  по нормативному методу аэродинамического расчета котлов [26]:

$$\Delta p_v = p_{in} - p_{out} - \Delta p_r = (\zeta + \lambda \cdot \delta) \frac{\varpi^2 \rho_v}{2}, \quad (2)$$

где  $\varpi$  – средняя скорость фильтрации;  $\rho_v$  – плотность воздуха,  $\text{кг}/\text{м}^3$ , а  $\zeta$  – коэффициент аэродинамического сопротивления воздушного тракта;  $\lambda$  – коэффициент аэродинамического сопротивления слоя,  $\text{м}^{-1}$ ;  $\delta$  – толщина слоя угля (м) в произвольный момент времени  $t$ , которая может быть рассчитана по формуле:

$$\delta = \frac{m}{\rho_c \cdot F}, \quad (3)$$

где  $\rho_c$  – средняя насыпная плотность угля в слое.

Воздушный тракт исследуемого котла имеет несложную схему (выход из нагнетательного воздухопровода через решетку), коэффициент аэродинамического сопротивления которой [26]:

$$\zeta = \left( \frac{F}{H} + 0,707 \cdot \frac{F}{H} \sqrt{1 - \frac{F}{H}} \right)^2,$$

где  $H$  – проходное сечение решетки.

Выражая из формулы (2) значение скорости фильтрации и подставляя его в (1), получим итоговую расчетную формулу для расхода топлива:

$$\dot{m} = \frac{F \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (p_{in} - p_{out} - \Delta p_r)}{\rho_v \cdot (\zeta + \lambda \cdot \delta)}}}{V_0 \cdot \alpha}. \quad (4)$$

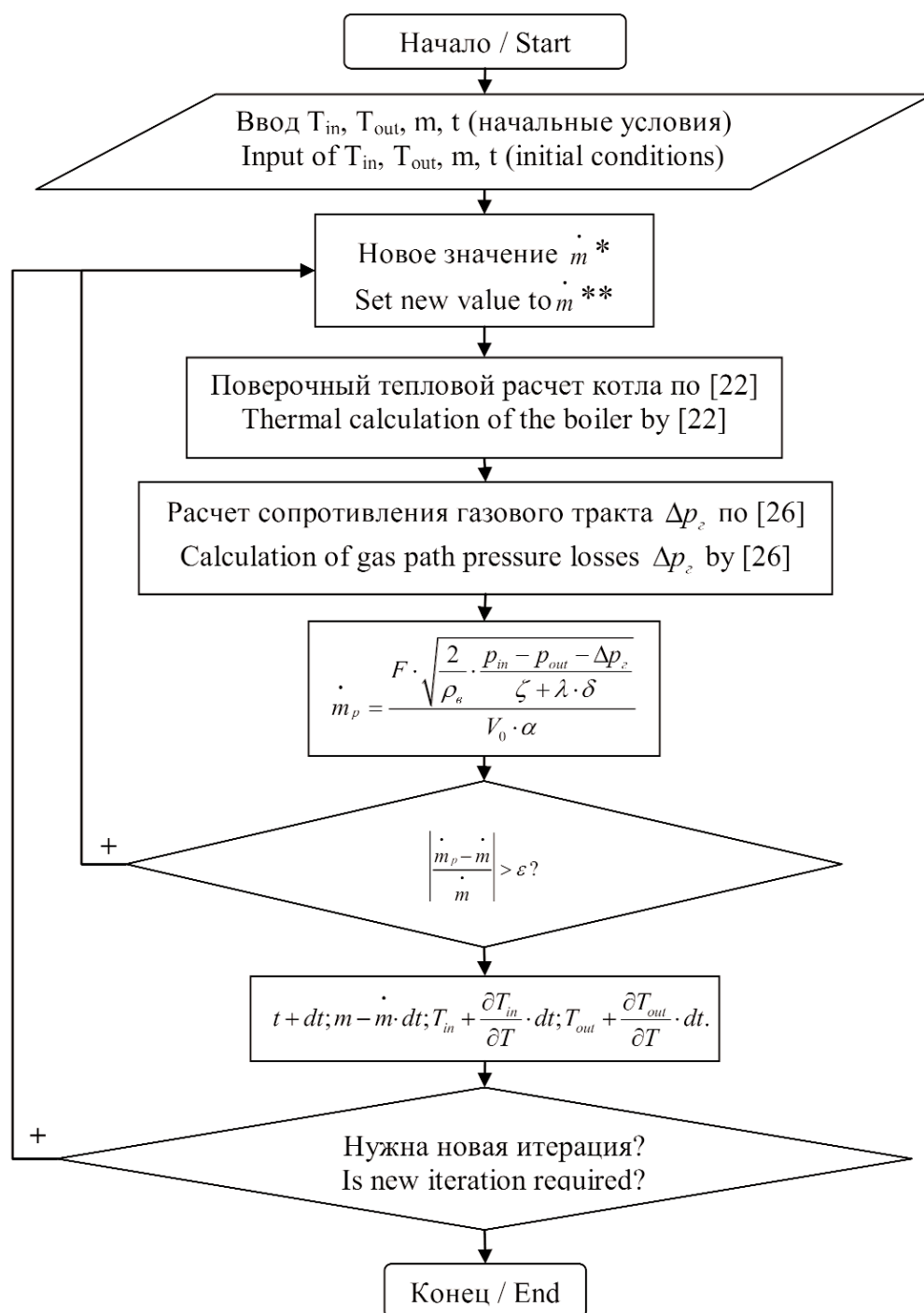
Несмотря на допущение (1), аналитическое решение уравнения (4) является сложной задачей из-за его нелинейности. Наиболее универсальным и простым численным методом решения обыкновенных дифференциальных уравнений является метод Эйлера [19]. Согласно этому методу, заменяем производную, входящую в уравнение (4), конечно-разностным аналогом таким образом, что временная ось дискретизируется на интервалы, в пределах которых расход топлива принимается постоянным. В результате получаем конечно-разностное уравнение, решение которого сводится к вычислению значений динамических характеристик котла по алгоритму (рис. 1) методом итераций. Для интеграции алгоритма был разработан и применен специальный программно-исследовательский комплекс.

Для моделирования возможных неравномерностей в толщине или плотности слоя угля производится его дискретизация на  $N$  участков с массой топлива  $m_i$  и площадью решетки  $F_i$ , где индекс  $i$  – номер участка в диапазоне  $1...N$ . Проходное сечение решетки  $H_i$  также может задаваться неравномерным, что позволяет моделировать сжигание угля на колосниковых решетках со сложной геометрией. Такой подход позволяет спрогнозировать распределение скоростей фильтрации воздуха и выгорания угля в слое и смоделировать изменение геометрии слоя во времени (рис. 2).

Скорость фильтрации, а вместе с тем и скорость выгорания топлива (рис. 3), перераспределяются обратно пропорционально сопротивлениям параллельных участков. Даже при небольшой неравномерности в толщине или плотности слоя угля он прогорает в местах наименьшего аэродинамического сопротивления, стремясь к образованию участков без топлива (кратеров). Образование кратеров, в свою очередь, приводит к бесполезному прорыву дутьевого воздуха в топку через оголенные участки решетки. Вместе с тем резко снижается скорость фильтрации через участки, покрытые слоем угля. В [27] приводятся данные о том, что при живом сечении решетки  $H=0,1F$  скорость фильтрации через оголенные участки решетки в 6–10 раз выше, чем через участки, покрытые слоем угля толщиной 165 мм.

Для прогнозирования возникновения кратерного горения, имеющего низкую эффективность, для каждого участка по формуле (3) рассчитывается толщина слоя  $\delta_i$  и решается уравнение (4) в следующем виде:

$$\dot{m}_i = \frac{F_i \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (p_{in} - p_{out} - \Delta p_r)}{\rho_v \cdot (\zeta_i + \lambda \cdot \delta_i)}}}{V_0 \cdot \alpha_i}.$$

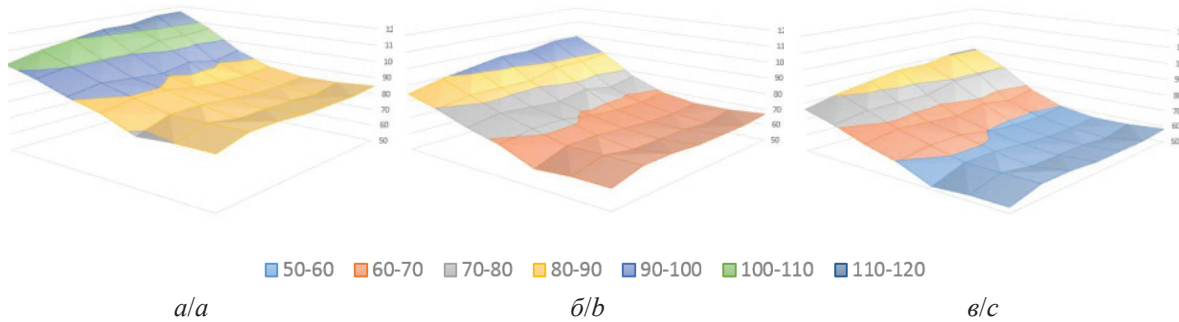


\* В первом приближении первой итерации расход топлива  $\dot{m}$  принимается по паспортным данным котла. В первом приближении каждой следующей итерации расход топлива принимается равным значению, рассчитанному на предыдущей итерации.

\*\* The first approximation of the fuel consumption  $\dot{m}$  is assumed to be equal to the value calculated at the previous iteration. In case of the first iteration, the first approximation of the fuel consumption is taken from the boiler's passport.

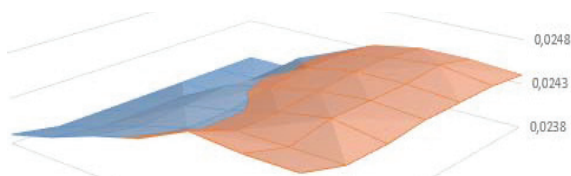
**Рис. 1.** Алгоритм расчета значений динамических характеристик котла

**Fig. 1.** Algorithm for calculating the values of a boiler dynamic characteristics



**Рис. 2.** Распределение толщины слоя угля (мм) на решетке в моменты времени: а) при пуске котла; б) время работы котла 30 мин; в) время работы котла 1 час

**Fig. 2.** Distribution of coal layer thickness (mm) on a fire-grate at time points: a) when starting the boiler; b) the combustion time is 30 minutes; c) the combustion time is 1 hour



**Рис. 3.** Распределение скорости выгорания угля ( $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ ) на решетке

**Fig. 3.** Distribution of coal burning rate ( $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ ) on the grate

Суммарный расход воздуха и топлива через котел определяются как  $\sum_{i=1}^N F_i \cdot \varpi_i$  и  $\sum_{i=1}^N \dot{m}_i$  соответственно. По известным значениям теплотворной способности топлива  $Q$  (кДж/кг) и коэффициента полезного действия котла  $\eta$  количество тепла (кВт), которое передается теплоносителю (воде) в процессе сгорания топлива, можно записать как  $Q \cdot \eta \cdot \sum_{i=1}^N \dot{m}_i$ . Тогда тепловой баланс водяного тракта будет иметь вид:

$$Q \cdot \eta \cdot \sum_{i=1}^N \dot{m}_i + \dot{m}_b \cdot c_b \cdot T_{in} = \dot{m}_b \cdot c_b \cdot T_{out}, \quad (5)$$

где слагаемые в левой части – это теплоступления в водяной тракт, в правой – тепло, уходящее из водяного тракта.

Для того, чтобы учесть тепловую инерцию водяного объема котла, делаем допущение, что это единый водяной объем со средней температурой  $T_{out}$ . Тогда из балансового уравнения (5) запишем выражение для изменения средней температуры водяного объема во времени:

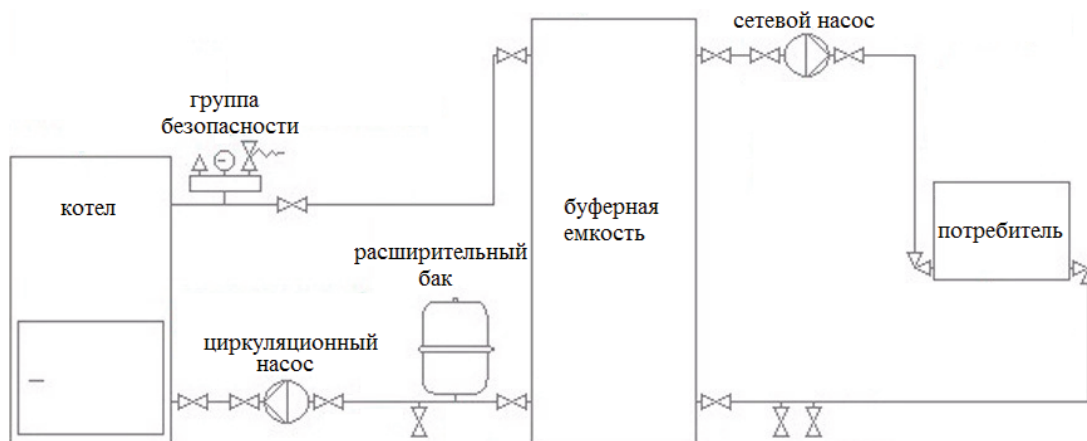
$$\frac{\partial T_{out}}{\partial t} = \frac{Q \cdot \eta \cdot \sum_{i=1}^N \dot{m}_i + \dot{m}_b \cdot c_b \cdot (T_{in} - T_{out})}{m_b \cdot c_b}, \quad (6)$$

где  $m_b$  – масса воды в котле, кг.

Предположение о равномерной средней температуре в водяном объеме является обоснованным допущением при прогнозировании теплообмена в котле жаротрубного типа, т. к. подтверждается сравнением экспериментальных результатов с подобными математическими моделями [28, 29].

Для принятой схемы (рис. 4) подключения котла к сети уравнение для температуры обратной сетевой воды запишется аналогично уравнению (6).

$$\frac{\partial T_{in}}{\partial t} = \frac{\dot{m}_b \cdot c_b \cdot (T_{out} - T_{in}) - Q_c}{m_b \cdot c_b},$$



**Рис. 4.** Схема подключения котла к сети

**Fig. 4.** Diagram of boiler connection to the network

где  $Q_c$  – тепловая нагрузка сети, кВт;  $m_6$  – масса воды в буферной емкости, кг.

### Апробация модели

Для численного исследования был выбран твердотопливный водогрейный котел КВр-0,8 (рис. 5), оборудованный топкой слоевого типа с неподвижной колосниковой решеткой и ручной загрузкой топлива. Этот котел предназначен для теплоснабжения зданий и сооружений различного назначения, оборудованных системами водяного отопления с принудительной циркуляцией теплоносителя. Котлы типа КВр-0,8 имеют номинальную мощность 800 кВт, давление и температуру котловой воды 0,4 МПа и 115 °С соответственно.

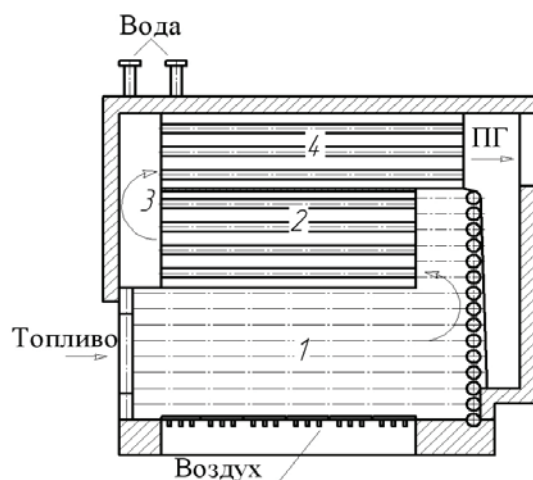


Рис. 5. Схема отопительного водогрейного котла КВр-0,8: 1 – топочный блок; 2 – первый газотрубный пучок; 3 – передняя дымовая коробка, 4 – второй газотрубный пучок; ПГ – выход продуктов горения

Fig. 5. Water-heating boiler «KВr-0,8»: 1 is the furnace unit; 2 is the first gas-tube bundle; 3 is the front smoke box; 4 is the second gas-tube bundle; ПГ is the output of combustion products

Котлы, в соответствии требованиями ГОСТ 30735–2001 и ТУ 4931-001-59680616–2005, изготавливаются газоплотными в виде трубных цельносварных панелей с проставками между трубами из стальных полос.

Котел КВр-0,8 состоит из топочного блока и двух газотрубных пучков (рис. 5).

Топочный блок – 1 представляет собой конструкцию из пятнадцати горизонтально-параллельных труб диаметром 42×3,5 мм с шагом 102 мм, вваренных в два вертикальных коллектора. Сгорание топлива происходит в топочном блоке, затем горячие газы перемещаются через конвективную поверхность нагрева (водоохлаждаемые дымогарные трубы диаметром 60×3 мм) к дымовой трубе.

Жаротрубные котлы часто характеризуют числом ходов дымовых газов. Топка котла КВр-0,8 используется в качестве первого хода дымовых газов, далее следует два конвективных хода дымо-

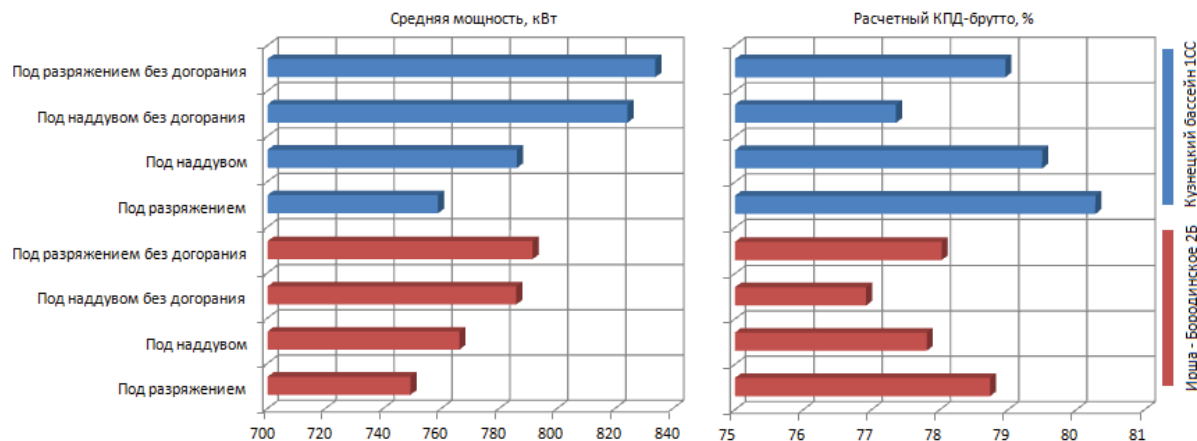
вых газов с разворотом продуктов сгорания между пучками дымогарных труб на 180°. Трехходовая компоновка исследуемого котла имеет большую конвективную поверхность нагрева (дымогарных труб) по сравнению с двухходовой и за счет этого позволяет увеличить полноту охлаждения дымовых газов [30].

Поворотные зоны могут быть двух конструкций: неохлаждаемые (в англоязычных источниках «dry-back») или охлаждаемые («water-back»). В исследуемой конструкции котла первая поворотная зона на входе в первый газотрубный пучок имеет водяное охлаждение. Передняя дымовая коробка – 3, которая является зоной разворота продуктов сгорания после первого газотрубного пучка – 2, футеруется огнеупорным материалом, т. е. имеет dry-back исполнение. Задняя дымовая коробка ПГ выполнена из листовой углеродистой стали, покрытой снаружи теплоизоляцией из минеральных матов, и служит для сбора дымовых газов из второго газотрубного пучка и отвода их далее к дымовой трубе (дымососу).

Газовоздушный тракт котла (рис. 5) имеет следующую схему: продукты сгорания топлива, сжигаемого на колосниках, поднимаясь в топке – 1 вверх, омывают поверхности экранов топочного блока, проходят через дымогарные трубы первого пучка – 2, разворачиваются на 180° в передней дымовой коробке – 3, проходят через дымогарные трубы второго газотрубного пучка – 4. После чего газы попадают в заднюю дымовую коробку, откуда направляются к дымососу и в дымовую трубу.

Для апробации разработанной модели и программного комплекса произведено численное исследование сжигания в котле КВр-0,8 твердого топлива двух марок: бурый уголь 2Б Ирша-Бородинского месторождения и каменный уголь 1СС Кузнецкого бассейна. Итоговая интегральная оценка производительности (рис. 6) приведена для разных режимов работы котла. По результатам численного эксперимента установлено, что среднеинтегральные значения производительности и КПД-брутто зависят от аэродинамической схемы котла (под наддувом или под разрежением) и времени между загрузками топлива. Размах вариации значений производительности при этом составляет 42 кВт для бурого угля и 75 кВт для каменного. Размах вариации КПД-брутто – 1,8 и 2,9 % для бурого и каменного углей соответственно.

Согласно разработанной математической модели, главным фактором, влияющим на мгновенное значение КПД-брутто исследуемого котла, является степень завершенности процесса горения, которая, в свою очередь, определяет толщину и аэродинамическое сопротивление слоя, тепловыделение и избыток воздуха в топке. Мгновенный КПД (рис. 7) значительно изменяется во времени и минимален во время загрузки топлива, когда дверца топки открыта. Снижение мгновенного значения КПД-брутто котла во время загрузки топлива качественно зависит от его аэродинамической схемы.



**Рис. 6.** Интегральные характеристики (КПД и производительность) котла KWr-0,8 с различной реализацией аэродинамики при сжигании твердого топлива марок 2Б (Ирша-Бородинское месторождения) и 1СС (Кузнецкий бассейн)

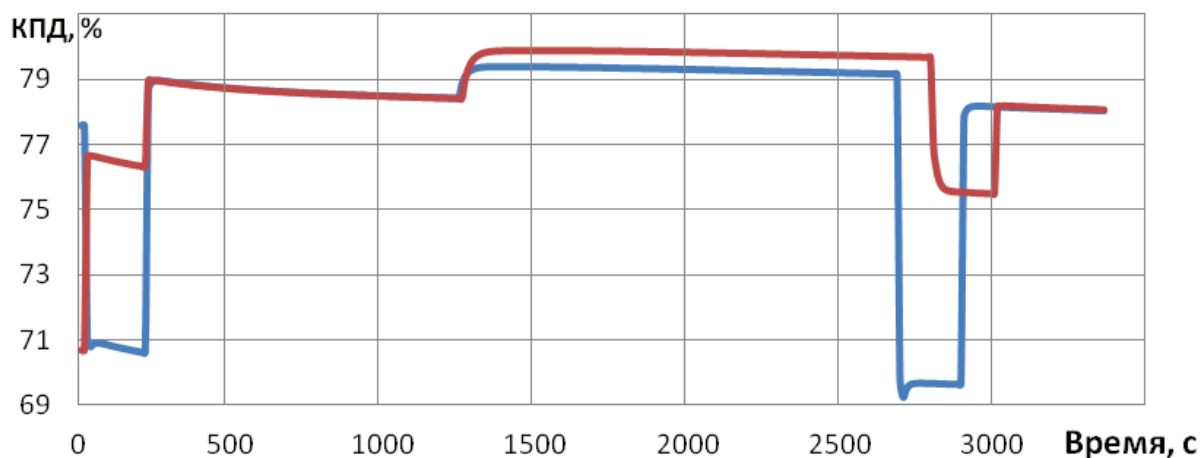
**Fig. 6.** Integral characteristics (efficiency and capacity) of the «KWr-0,8» boiler while burning Irsha-Borodinsky lignite and Kuznetsky coal with various gas-dynamics

При избыточном давлении в топке (так называемый наддув) загрузка топлива сопровождается попаданием разогретых продуктов сгорания в помещение котельной, при этом понижается теплоотдача конвекцией в дымогарных трубах и значительно увеличиваются потери тепла с уходящими газами. Расчетное значение мгновенного КПД-брутто котла при загрузке топлива под наддувом на 8...10 % ниже номинального.

В противоположность этому, при разрежении во время загрузки топлива происходит увеличение присосов воздуха в топку исследуемого котла на 7 %. В результате увеличивается удельный объем дымовых газов, возрастает сопротивление газового тракта и потери тепла с уходящими газами. В самой топке интенсифицируется горение летучих веществ, но часть выделившегося тепла расходуется на нагрев поступившего холодного воздуха, отчего на 5 % снижается теплоотдача излу-

чением, пропорциональная четвертой степени температуры газов. В результате во время загрузки топлива расчетное значение КПД-брутто котла на 2...3 % ниже, чем в номинальном режиме. Следует отметить, что мгновенные теплотери во время загрузки топлива для рассмотренных аэродинамических схем количественно зависят от значения избыточного давления в топке, а их влияние на среднеинтегральные значения производительности котла определяется интервалом между загрузками и средней длительностью загрузки топлива. В настоящей работе при численном моделировании имитировались следующие режимы ручной загрузки 100 кг топлива со скоростью 0,5 кг/с:

- каждые 20 минут вне зависимости от полноты выгорания предыдущей партии топлива;
- после полного выгорания предыдущей партии топлива.



**Рис. 7.** Динамика расчетного значения КПД брутто котла KWr-0,8 во времени для вариантов с аэродинамическими схемами под наддувом и разрежением при слоевом сжигании бурого угля марки 2Б (Ирша-Бородинское месторождение)

**Fig. 7.** The «KWr-0,8» boiler gross efficiency dynamics in discrete time for variants with overpressure and underpressure while burning Irsha-Borodinsky lignite

В первом режиме загрузки топлива процесс горения угля все время сопровождается выходом летучих и не переходит в низкопроизводительную и неэффективную стадию догорания углеродного остатка, следствием чего является более высокое среднеинтегральное значение тепловой мощности котла (рис. 6). Чтобы количественно учесть полностью выгорания предыдущей партии топлива при итоговом интегрировании, программный комплекс суммирует произведение значений недогоревшей массы топлива (кг) и калорийности топлива (кДж/кг) с теплопотерями (кДж) от механической неполноты сгорания. Таким образом, работа исследуемого котла без догорания характеризуется меньшим среднеинтегральным значением КПД-брутто по сравнению с другим рассмотренным вариантом ручной загрузки топлива (рис. 6).

### Заключение

Представлена новая одномерная нестационарная динамическая модель жаротрубного котла, которая не требует большого вычислительного времени для качественного моделирования его работы. Приведен алгоритм, используя который предложенная модель может быть легко реализована и применена в инженерной практике.

Модель дает полное представление о производительности котла при номинальных и переходных режимах его работы, поэтому может быть применена как тренажер при повышении квалификации персонала. Кроме того, разработанная динамическая модель котла позволяет дать его оценку как объекта автоматизации и производить анализ его динамических характеристик с учетом конструктивных особенностей. С применением модели можно проектировать многопараметрические контроллеры для автоматизации работы котельной установки.

Предлагаемая модель может быть использована для сравнения характеристик котла при работе на различных видах топлива с учетом нестационарности процессов горения и теплообмена.

Апробация модели выполнена при моделировании процессов в жаротрубном твердотопливном водогрейном котле КВр-0,8 для двух вариантов сжигаемого топлива: бурый уголь 2Б Ирша-Бородинского месторождения и каменный уголь 1СС Кузнецкого бассейна.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке программы повышения конкурентоспособности ТПУ среди ведущих мировых исследовательских центров.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. МДК 4–05.2004. Методика определения потребности в топливе, электрической энергии и воде при производстве и передаче тепловой энергии и теплоносителей в системах коммунального теплоснабжения – Утверждена Госстроем России 12.08.2003. – М., 2004. – 78 с.
2. Dynamic modeling of a utility once-through pulverized-fuel steam generator / D. Rakopoulos, I. Avagianos, D. Almpantidis, N. Nikolopoulos, P. Grammelis // Journal of Energy Engineering. – 2017. – V. 143 (4). – Article number 04016070.
3. Study of connected system of automatic control of load and operation efficiency of a steam boiler with extremal controller on a simulation model / V.R. Sabanin, A.A. Starostin, A.I. Repin, A.I. Popov // Thermal Engineering. – 2017. – V. 64 (2). – P. 151–160.
4. Behbahani-nia A., Bagheri M., Bahrampoury R. Optimization of fire tube heat recovery steam generators for cogeneration plants through genetic algorithm // Appl. Therm. Eng. – 2010. – V. 30 – P. 2378–2385.
5. Aydin O., Erhan Boke Y. An experimental study on carbon monoxide emission reduction at a fire tube water heater // Appl. Therm. Eng. – 2010. – V. 30 – P. 2658–2662.
6. Colonna P., van Putten H. Dynamic modeling of steam power cycles. Part I – Modeling paradigm and validation // Appl. Therm. Eng. – 2007. – V. 27. – P. 467–480.
7. De Mello F.P. Boiler models for system dynamic performance studies // IEEE Trans. Power Syst. – 1991. – V. 6. – P. 66–74.
8. Adam E.J., Marchetti L. Dynamic simulation of large boilers with natural recirculation // Comput. Chem. Eng. – 1999. – V. 23. – P. 1031–1040.
9. Astrom K.J., Bell R.D. Drum-boiler dynamics // Automatica. – 2000. – V. 36. – P. 363–378.
10. Modeling of boiler-turbine coordinated control system in coal-fired power plants for power system unified dynamic simulation of transient, medium-term and long-term stabilities / X. Song, C. Wang, T. Liu, Y. Tang, X. Tao, X. Ye // Zhongguo Dianji Gongcheng Xuebao / Proc. of the Chinese Society of Electrical Engineering. – 2013. – V. 33 (25). – P. 167–172.
11. Kim H., Choi S. A model on water level dynamics in natural circulation drum-type boilers // Int. Commun. Heat Mass. – 2005. – V. 32. – P. 786–796.
12. Coelho P.J., Novo P.A., Carvalho M.G. Modelling of a utility boiler using parallel computing // J. Super Comput. – 1999. – V. 13. – P. 211–232.
13. Bhuiyan A.A., Naser J. CFD modelling of co-firing of biomass with coal under oxy-fuel combustion in a large scale power plant // Fuel. – 2015. – V. 159. – P. 150–168.
14. Gómez A., Fueyo N., Díez L.I. Modelling and simulation of fluid flow and heat transfer in the convective zone of a power-generation boiler // Appl. Therm. Eng. – 2008. – V. 28. – P. 532–546.
15. Pezo M., Stevanovic V.D., Stevanovic Z. A two-dimensional model of the kettle reboiler shell side thermal-hydraulics // Int. J. Heat Mass Tran. – 2006. – V. 49. – P. 1214–1224.
16. Habibi A., Merci B., Heynderickx G.J. Impact of radiation models in CFD simulations of steam cracking furnaces // Comput. Chem. Eng. – 2007. – V. 31. – P. 1389–1406.
17. Бушланов В.П., Бушланов И.В. Метод расчета теплообмена излучением в топке осесимметричной конфигурации на основе уравнений для компонент суммарного вектора потока лучистой энергии. Инженерная методика // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 312. – № 4. – С. 13–19.
18. Weng C.K., Ray A., Dai X. Modeling of power plant dynamics and uncertainties for robust control synthesis // Appl. Math. Model. – 1996. – V. 20. – P. 501–512.
19. Корольченко А.Я. Процессы горения и взрыва. – М.: Пожннаука, 2007. – 266 с.
20. Ismatkhodzhaev S.K., Kuzishchin V.F. Enhancement of the efficiency of the automatic control system to control the thermal load of steam boilers fired with fuels of several types // Thermal Engineering – 2017. – V. 64 (5). – P. 387–398.
21. Соснин Ю.П., Бухаркин Е.Н. Бытовые печи, камини и водонагреватели. – М.: Стройиздат, 1985. – 368 с.

22. Тепловой расчет котлов (нормативный метод). – СПб: Изд-во НПО ЦКТИ, 1998. – 256 с.
23. Wang Y.X., Young-Bum K. Real-Time Control for Air Excess Ratio of a PEM Fuel Cell System // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. – 2014. – V. 19 (3). – P. 852–861.
24. Determining the air excess in the heating of coke furnaces. 3. Calculation of the air excess / D.G. Zublev, S.V. Modakalov, A.V. Sizov, A.V. Kravchenko // Coke and Chemistry. – 2017. – № 60 (3). – P. 108–112.
25. Cem Onat. Prediction of Excess Air Factor in Automatic Feed Coal Burners by Processing of Flame Images // Chinese Journal of Mechanical Engineering. – 2017. – № 30 (3). – P. 722–731.
26. Мочан С.И. Аэродинамический расчет котлов (нормативный метод). – Л.: Энергия, 1977. – 31 с.
27. Яворский И.А., Шабанов С.И. Предварительные результаты экспериментального исследования процесса пневматической рассортировки рядового угля на цепной решетке // Известия Томского политехнического института. – 1952. – Т. 69. – С. 166–176.
28. Flynn M.E., O'Malley M.J. A drum boiler model for long term power system dynamic simulation // IEEE T. Power Syst. – 1999. – V. 14. – P. 209–217.
29. Kruger K., Franke R., Rode M. Optimization of boiler start-up using a nonlinear boiler model and hard constraints // Energy. – 2004. – V. 2. – P. 2239–2251.
30. Хаустов С.А., Загорин А.С. Современные тенденции проектирования жаротрубных котлов // Вестник науки Сибири. – 2014. – Т. 12. – № 2. – С. 21–28. URL: <http://sjs.tpu.ru/journal/article/view/988> (дата обращения 01.10.2017).

*Поступила 10.10.2017 г.*

### Информация об авторах

**Хаустов С.А.**, кандидат технических наук, доцент научно-образовательного центра И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Хаустова О.В.**, инженер Института развития стратегического партнерства и компетенций Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Ермолаев А.Н.**, ассистент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции Тюменского индустриального университета.

UDC 621.18

## COMPUTATIONAL MODEL OF A SOLID FUEL HEATING BOILER

**Sergey A. Khaustov<sup>1</sup>,**

khaustovSA@tpu.ru

**Olga V. Khaustova<sup>1</sup>,**

olgaolga@tpu.ru

**Anton N. Ermolaev<sup>2</sup>,**

ermolaevanton03@gmail.com

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

<sup>2</sup> Tyumen Industrial University,  
38, Volodarskogo street, Tyumen, 625000, Russia.

**The relevance** of the research is caused by the fact, that there is no mathematical apparatus for simulating long-timeline dynamics of a solid fuel boiler. Simulation of its long-timeline dynamics is useful for determining annual costs, taking into account meteorological and technological features. In addition, the dynamic model of solid fuel boiler will help set up automatic control systems and detect dangerous deviations of parameters during the project.

**The main aim** of the research is to develop a practically applicable productive model of a solid fuel boiler with sufficient level of detail.

**The methods.** Ordinary differential equations for dynamic characteristics of a solid fuel boiler are formulated. The equations were solved by the Euler method with subsequent iterative processing on the basis of the developed research software «TPU-Boiler».

**The results.** The paper introduces a new one-dimensional nonstationary mathematical model of the fire-tube boiler. This model requires less computational time for qualitative simulation of boiler operation. The proposed model can be easily implemented and applied to solve engineering problems using the algorithm given. To test the developed model, the authors have simulated the operation of a «KVR-0,8» boiler using Irsha–Borodinsky lignite and Kuznetsk coal as fuel. The results of the numerical experiment show that the average integrated performance and gross efficiency are dependent on aerodynamics in the boiler and the time between fuel loads. The range of variation in the output values was 42 kW for the lignite and 75 kW for the coal. The range of variation in efficiency is 1,8 and 2,9 % for the lignite and the coal, respectively.

### Key words:

Fire-tube boiler, modeling, heat transfer, dynamic characteristics, solid fuel, coal, simulator.

The research was carried out at Tomsk Polytechnic University within the framework of the Tomsk Polytechnic University Competitiveness Enhancement Program grant.

### REFERENCES

- MDK 4–05.2004. *Metodika opredeleniya potrebnosti v toplivo, elektricheskoy energii i vode pri proizvodstve i peredache teplovooy energii i teplonositeley v sistemakh kommunalnogo teplosnabzheniya* [Methodology for determining the demand for fuel, electric energy and water in production and transfer of thermal energy and heat carriers in public heat supply systems]. Moscow, 2004. 78 p.
- Rakopoulos D., Avagianos I., Almpandis D., Nikolopoulos N., Grammelis P., Dynamic modeling of a utility once-through pulverized-fuel steam generator. *Journal of Energy Engineering*, 2017, vol. 143, no. 4, article number 04016070.
- Sabanin V.R., Starostin A.A., Repin A.I., Popov A.I., Study of connected system of automatic control of load and operation efficiency of a steam boiler with extremal controller on a simulation model. *Thermal Engineering*, 2017, vol. 64, no. 2, pp. 151–160.
- Behbahani-nia A., Bagheri M., Bahrampoury R., Optimization of fire tube heat recovery steam generators for cogeneration plants through genetic algorithm. *Appl. Therm. Eng.*, 2010, vol. 30, pp. 2378–2385.
- Aydin O., Erhan Boke Y., An experimental study on carbon monoxide emission reduction at a fire tube water heater. *Appl. Therm. Eng.*, 2010, vol. 30, pp. 2658–2662.
- Colonna P., van Putten H., Dynamic modeling of steam power cycles. Part I – Modeling paradigm and validation. *Appl. Therm. Eng.*, 2007, vol. 27, pp. 467–480.
- De Mello F.P. Boiler models for system dynamic performance studies. *IEEE Trans. Power Syst.*, 1991, vol. 6, pp. 66–74.
- Adam E.J., Marchetti L. Dynamic simulation of large boilers with natural recirculation. *Comput. Chem. Eng.*, 1999, vol. 23, pp. 1031–1040.
- Astrom K.J., Bell R.D., Drum-boiler dynamics. *Automatica*, 2000, vol. 36, pp. 363–378.
- Song X., Wang C., Liu T., Tang Y., Tao X., Ye X. Modeling of boiler-turbine coordinated control system in coal-fired power plants for power system unified dynamic simulation of transient, medium-term and long-term stabilities. *Zhongguo Dianji Gongcheng Xuebao/ Proc. of the Chinese Society of Electrical Engineering*, 2013, vol. 33, no. 25, pp. 167–172.
- Kim H., Choi S., A model on water level dynamics in natural circulation drum-type boilers. *Int. Commun. Heat Mass.*, 2005, vol. 32, pp. 786–796.
- Coelho P.J., Novo P.A., Carvalho M.G. Modelling of a utility boiler using parallel computing. *J. Super Comput.*, 1999, vol. 13, pp. 211–232.
- Bhuiyan A.A., Naser J., CFD modelling of co-firing of biomass with coal under oxy-fuel combustion in a large scale power plant. *Fuel*, 2015, vol. 159, pp. 150–168.
- Gómez A., Fueyo N., Díez L.I. Modelling and simulation of fluid flow and heat transfer in the convective zone of a power-generation boiler. *Appl. Therm. Eng.*, 2008, vol. 28, pp. 532–546.

15. Pezo M., Stevanovic V.D., Stevanovic Z. A two-dimensional model of the kettle reboiler shell side thermal-hydraulics. *Int. J. Heat Mass Tran.*, 2006, vol. 49, pp. 1214–1224.
16. Habibi A., Mercı B., Heynderickx G.J. Impact of radiation models in CFD simulations of steam cracking furnaces. *Comput. Chem. Eng.*, 2007, vol. 31, pp. 1389–1406.
17. Bushlanov V.P., Bushlanov I.V. Method for calculating the heat exchange in the axisymmetric furnace based on the equations for the total flux vector components of radiant energy. Engineering approach. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2008, vol. 312, no. 4, pp. 13–19. In Rus.
18. Weng C.K., Ray A., Dai X. Modeling of power plant dynamics and uncertainties for robust control synthesis. *Appl. Math. Model.*, 1996, vol. 20, pp. 501–512.
19. Korolchenko A.Ya. *Protsessy goreniya i vzryva* [Combustion and explosion processes]. Moscow, Pozhnauka Publ., 2007. 266 p.
20. Ismatkhodzhaev S.K., Kuzishchin V.F. Enhancement of the efficiency of the automatic control system to control the thermal load of steam boilers fired with fuels of several types. *Thermal Engineering*, 2017, vol. 64, no. 5, pp. 387–398.
21. Sosnin Ju. P., Buharkin E. N., *Bytovye pechi, kaminy i vodonagrevateli* [Household stoves, fireplaces and water heaters]. Moscow, Strogizdat, 1985, 368 p.
22. *Teplovoy raschet kotlov (normativny metod)* [Boiler thermal design (standard approach)]. St-Petersburg, NPO CKTI Publ., 1998. 256 p.
23. Wang Y.X., Young-Bum K. Real-Time Control for Air Excess Ratio of a PEM Fuel Cell System. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2014, vol. 19, no. 3, pp. 852–861.
24. Zublev D.G., Modakalov S.V., Sizov A.V., Kravchenko A.V. Determining the air excess in the heating of coke furnaces. 3. Calculation of the air excess. *Coke and Chemistry*, 2017, vol. 60, no. 3, pp. 108–112.
25. Cem Onat. Prediction of Excess Air Factor in Automatic Feed Coal Burners by Processing of Flame Images. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2017, vol. 30, no. 3, pp. 722–731.
26. Mochan S.I. *Aerodinamichesky raschet kotlov (normativny metod)* [Boiler aerodynamics design (standard approach)]. St-Petersburg, Energiya Publ., 1977. 31 p.
27. Yavorsky I.A., Shabanov S.I. Predvaritelnye rezultaty eksperimentalnogo issledovaniya protsessa pnevmaticheskoy rassortirovki ryadovogo uglya na tsepnoy reshetke [Preliminary results of experimental study of pneumatic sorting of the raw coal on a chain grate]. *Izvestiya Tomskogo Politehnicheskogo Instituta*, 1952, vol. 69, pp. 166–176.
28. Flynn M.E., O'Malley M.J. A drum boiler model for long term power system dynamic simulation. *IEEE T. Power Syst.*, 1999, vol. 14, pp. 209–217.
29. Kruger K., Franke R., Rode M. Optimization of boiler start-up using a nonlinear boiler model and hard constraints. *Energy*, 2004, vol. 2, pp. 2239–2251.
30. Khaustov S.A., Zavorin A.S. Modern trends in designing fire tube boilers. *Siberian Journal of Science*, 2014, vol. 12, no. 2, pp. 21–28. In Rus. Available at: <http://sjs.tpu.ru/journal/article/view/988> (accessed 1 October 2017).

Received: 10 October 2017

#### Information about the authors

**Sergey A. Khaustov**, Cand. Sc., assistant, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Olga V. Khaustova**, engineer, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Anton N. Ermolaev**, assistant, Tyumen Industrial University.

УДК 621.314

## ВОЛЬТОДОБАВОЧНЫЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫЙ РЕЗОНАНСНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ С ИЗМЕНЯЕМОЙ СТРУКТУРОЙ ДЛЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

Осипов Александр Владимирович<sup>1</sup>,  
ossan@mail.ru

Ярославцев Евгений Витальевич<sup>2</sup>,  
yaroslavtsev@tpu.ru

Буркин Евгений Юрьевич<sup>2</sup>,  
burkin@mail.ru

Свиридов Виталий Владимирович<sup>2</sup>,  
vsviridov@yandex.ru

<sup>1</sup> Томский университет систем управления и радиоэлектроники,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40.

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

**Актуальность.** Качество геофизических исследований во многом определяется системой электропитания геофизических приборов, которая, в частности, должна гарантировать бесперебойность энергообеспечения за счет питания от аккумуляторной батареи. Особенную актуальность бесперебойность питания имеет при исследовании наклонных и пологих скважин, требующих применения автономных геофизических приборов. Эксплуатация силового преобразователя, питающего геофизический прибор, производится в условиях высоких температур, при существенно затрудненных условиях отвода тепловых потерь, что ставит задачу увеличения КПД преобразования в ряд наиболее актуальных. В этой связи применение вольтодобавочных топологий, преобразующих неполный поток энергии, является энергетически оправданным, так как система энергоснабжения не требует гальванической развязки. Однако жесткая коммутация транзисторов в такой схеме приводит к существенному росту динамических потерь, что делает актуальной разработку резонансного вольтодобавочного преобразователя.

**Цель работы:** создание резонансного вольтодобавочного преобразователя с повышенным КПД и исследование его энергетических и частотных характеристик.

**Методы исследования:** основаны на общих положениях теории электрических цепей, теории алгебраических уравнений, вычислительных методах и использовании современных инструментальных систем и методов математического моделирования.

**Результаты.** Рассмотрен резонансный мостовой DC–DC преобразователь с вольтодобавочным звеном в режиме стабилизации выходного напряжения при питании от аккумулятора и режиме заряда аккумулятора в реверсном режиме. Показана эффективность схемы вольтодобавочного преобразователя при узком диапазоне изменения напряжения аккумулятора. Существенное влияние на характеристики преобразователя оказывает способ регулирования; установлено, что широтно-импульсное регулирование инвертором с частотной подстройкой обеспечивает минимальные значения рабочих токов, а соответственно, максимальное значение КПД. Подстройка рабочей частоты необходима для обеспечения мягкого включения транзисторов, так как формирует необходимое направление тока, отпирающее обратные диоды включаемых транзисторов. При этом коммутационные процессы, протекающие в инверторе и выпрямителе резонансного преобразователя, и условия обеспечения мягкого включения различны. Показана невозможность вольтодобавочной схемы ограничивать выходной ток при перегрузках, для чего предложено изменение структуры вольтодобавочного преобразователя при помощи дискретных ключей. Проведена экспериментальная проверка полученных результатов, сделаны выводы, обсуждены полученные результаты.

### Ключевые слова:

Электропитание геофизических приборов, энергетическая эффективность, резонансный преобразователь, вольтодобавочный преобразователь, мягкая коммутация.

### Введение

Целью геофизических исследований является изучение геологического разреза скважин и их технического состояния, в этой связи особенную сложность вызывают исследования наклонно-направленных скважин, которые считаются одним из наиболее перспективных направлений в освоении трудноизвлекаемых запасов и находят все большее использование [1–3]. Технология исследования сильно пологих и горизонтальных скважин основана в первую очередь на использовании автономных геофизических приборов, доставляемых с помощью бурового инструмента, поэтому обеспечение их бес-

перебойного питания за счет включения в систему питания аккумулятора часто является необходимым условием работы. К энергоэффективности силового преобразователя предъявляются жесткие требования, которые продиктованы как ограниченным объемом пространства, занимаемого геофизическим прибором в скважине, так и сложными условиями съема тепловых потерь, что требует существенного повышения КПД преобразования. Таким образом, требования к характеристикам DC–DC преобразователей в системах электропитания постоянно повышаются, что заключается в минимизации массы и повышении КПД. При отсут-

ствии необходимости в гальванической развязке и при диапазоне изменения входного напряжения, согласованном с уровнем выходного напряжения, реализация энергетического канала питания нагрузки от аккумулятора может быть выполнена на основе непосредственных [4–6] или вольтодобавочных инверторно-трансформаторных преобразователей [7, 8]. Улучшение энергетических характеристик вольтодобавочного преобразователя обусловлено тем, что высокочастотному преобразованию подвергается только часть потока энергии входного источника. При этом величина преобразуемой мощности определяется диапазоном регулирования, что существенно уменьшает рабочие токи и статические потери в преобразователе. Однако жесткая коммутация транзисторов вызывает дополнительные потери, а также является фактором, сдерживающим повышение частоты преобразования. Кроме того, вызывает проблемы реализация ограничения выходного тока преобразователя при перегрузках, что необходимо для преобразователя энергии аккумулятора, являющегося источником ЭДС.

Другим способом повышения КПД является уменьшение коммутационных потерь транзисторов за счет применения резонансных преобразователей, построенных по топологии DAB (Dual Active Bridge) с последовательным LC контуром, которые неоднократно анализировались в ряде отечественных [9–13] и зарубежных [14–20] работ. Протекание в резонансном контуре синусоидального тока, синфазного с напряжением, создает условия, необходимые для обеспечения мягкой коммутации транзисторов, однако необходим синтез способа регулирования, сохраняющего режим мягкого включения транзисторов во всем диапазоне. В частности, показано, что режим мягкой коммутации в резонансном преобразователе с широтно-импульсным регулированием может быть получен только при адаптивной частотной подстройке, существенно увеличивающейся по мере уменьшения нагрузки, причем указанное увеличение частоты может доходить до неприемлемых на практике значений.

Таким образом, целью настоящей работы является анализ вольтодобавочной топологии резонансного вольтодобавочного преобразователя, определение его энергетических и регулировочных характеристик, обеспечение ограничения выходного тока при перегрузках.

#### Вольтодобавочный резонансный преобразователь в режиме стабилизации выходного напряжения

Схема исследуемого вольтодобавочного резонансного преобразователя приведена на рис. 1, а. Инвертор, построенный по мостовой схеме на транзисторах VT1–VT4, генерирует прямоугольное напряжение с частотой, равной резонансной частоте контура, образованного дросселем  $L$  и конденсатором  $C$ , в результате чего в резонансном контуре начинает протекать синусоидальный ток, синфазный с напряжением. Ток в резонансном контуре являет-

ся общим для инвертора и выпрямителя. Выпрямитель, построенный на транзисторах VT5–VT8, работает синхронно с инвертором, что обеспечивает обратное преобразование и формирование необходимой вольтодобавки к входному напряжению. В рассматриваемой топологии вольтодобавочного преобразователя напряжение аккумулятора должно быть меньше напряжения нагрузки, т. к. MOSFET транзисторы являются ключами с обратной проводимостью, поэтому преобразователь может работать только в повышающем режиме. Соответственно коэффициент трансформации преобразователя может быть определен по выражению

$$K_{\text{тр}} = \frac{U_{\text{AB min}}}{U_{\text{вых}} - U_{\text{AB min}}} \quad (1)$$

и обеспечивает требуемое выходное напряжение при минимальном напряжении аккумулятора, в этом случае обеспечивается максимальная вольтодобавка (рис. 1, б). По мере роста напряжения аккумулятора величина требуемой вольтодобавки, формируемой выпрямителем, уменьшается, что реализуется путем широтно-импульсного регулирования напряжения инвертора. Регулирование реализуется путем фазового опережения управляющих импульсов транзисторов регулируемой стойки инвертора VT1, VT2 относительно нерегулируемой VT3, VT4. В результате чего на такте управления появляется интервал закороченного состояния выхода инвертора и меняется ширина импульса напряжения, прикладываемого к колебательному контуру. При этом транзисторы выпрямителя переключаются синхронно с током нагрузки, что обеспечивает резонанс; диаграммы работы преобразователя при различных значениях напряжения аккумулятора показаны на рис. 1, б–г. Можно отметить, что в процессе регулирования происходит перераспределение напряжений между мостовыми преобразователями, при этом величина тока контура не зависит от напряжения аккумулятора, так как определяется величиной нагрузки.

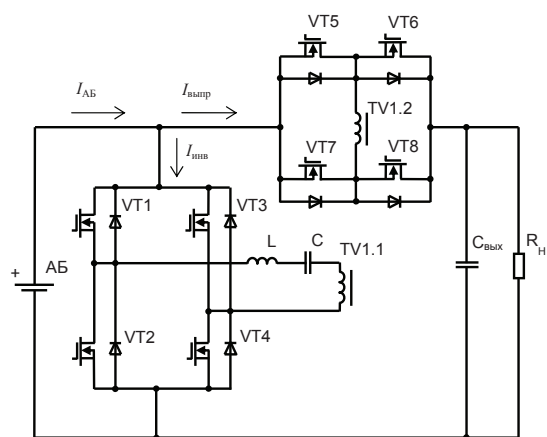
Для оценки эффективности выбранной топологии следует рассмотреть режим работы системы электропитания геофизических приборов, заключающийся в ограничении определенного значения выходной мощности, уровень которой определяется максимальным током аккумулятора  $I_{\text{AB max}}$  и его минимальным напряжением  $U_{\text{AB min}}$

$$P_{\text{вых max}} = U_{\text{AB min}} I_{\text{AB max}}.$$

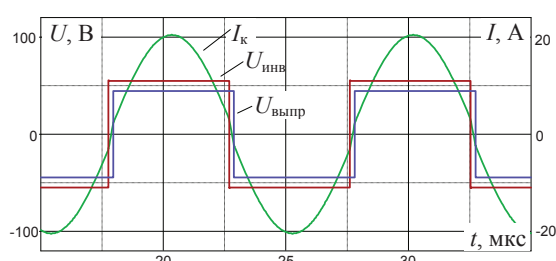
Соответственно при максимальном напряжении аккумулятора, близком к выходному напряжению, разрядный ток аккумулятора не будет превышать максимального тока нагрузки

$$I_{\text{AB}} = \frac{I_{\text{AB max}}}{\sigma U_{\text{AB}}} = I_{\text{н max}},$$

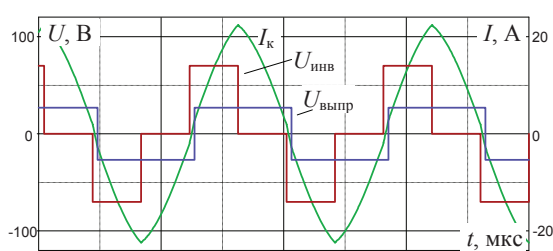
где  $\sigma U_{\text{AB}}$  – относительный диапазон изменения напряжения аккумулятора. Таким образом, можно определить максимальные значения токов транзисторов мостовых преобразователей.



a/a

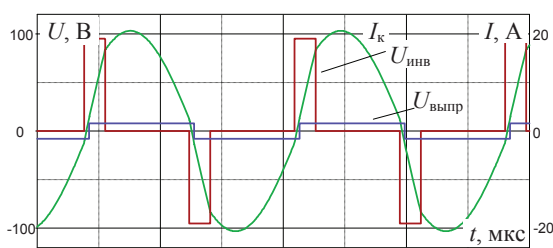


б/б  
 $U_{AB}=60 \text{ B/V}, T=9,85 \text{ мкс/ус}, \gamma=1$



в/в

в/в  
 $U_{AB}=70 \text{ B/V}, T=8 \text{ мкс/ус}, \gamma=0,5$



г/г

г/г  
 $U_{AB}=94 \text{ B/V}, T=8,55 \text{ мкс/ус}, \gamma=0,2$

**Рис. 1.** Вольтодобавочный резонансный преобразователь (а), диаграммы его работы при номинальной нагрузке  $R_n=12 \text{ Ом}$ ,  $L=15 \text{ мкГн}$ ,  $C=0,17 \text{ мкФ}$  (б–г)

**Fig. 1.** Boost type series resonant converter (a), time diagrams at  $R_n=12 \text{ Ohm}$ ,  $L=15 \text{ мкГн}$ ,  $C=0,17 \text{ мкФ}$  (b–d)

Максимальный ток транзисторов выпрямителя равен току нагрузки, т. к. выпрямитель находится в резонансе

$$I_{VT_{\text{выпр}}} = \frac{\pi}{2} I_{\text{вых}},$$

ток транзисторов инвертора может быть найден через коэффициент трансформации

$$I_{VT_{\text{инв}}} = \frac{I_{VT_{\text{выпр}}}}{K_{\text{тр}}} = \frac{\pi}{2} I_{\text{вых}} \frac{U_{\text{вых}} - U_{AB \min}}{U_{AB \min}} = \frac{\pi}{2} I_{\text{вых}} (\sigma U_{AB} - 1).$$

Можно заключить, что значение тока инвертора определяется диапазоном регулирования преобразователя, соответственно энергетически преобразователь наиболее выгоден при узком диапазоне регулирования, при  $\sigma U_{AB} \rightarrow 1$ . Таким образом, токи транзисторов определяются нагрузкой, а не максимальным током аккумулятора. Кроме того, напряжение, прикладываемое к транзисторам выпрямителя, не превышает значения  $U_{\text{вых}} - U_{AB}$ , что также подтверждает эффективность преобразователя именно в узком диапазоне регулирования.

Регулировочная характеристика для представленного преобразователя может быть получена из равенства мощностей инвертора и выпрямителя

$$U_{\text{выпр}} \frac{I_{1k}}{\pi} K_{\text{тр}} = U_{AB} \frac{I_{1k}}{\pi} \int_0^{\pi-\varphi} \sin(\omega t) d\omega t;$$

$$U_{\text{выпр}} = \frac{1}{K_{\text{тр}}} U_{AB} \sin^2 \left( \frac{\pi}{2} - \varphi \right) = \frac{1}{K_{\text{тр}}} U_{AB} \cos^2 \varphi,$$

где  $I_{1k}$  – амплитуда первой гармоники тока контура,  $\varphi = \pi(1-\gamma)$ . Учитывая, что  $U_{\text{вых}} = U_{AB} + U_{\text{выпр}}$ , регулировочная характеристика

$$U_{\text{вых}}(\gamma) = U_{AB} \left( 1 + \frac{1}{K_{\text{тр}}} \cos^2 \varphi \right).$$

При стабилизации выходного напряжения и изменении напряжения аккумулятора характеристика примет вид (рис. 2, а)

$$U_{AB}(\gamma) = \frac{U_{\text{вых}}}{1 + \frac{1}{K_{\text{тр}}} \cos^2 \varphi} = \frac{U_{\text{вых}}}{1 + \frac{1}{K_{\text{тр}}} \sin^2 \frac{\pi\gamma}{2}}, \quad (2)$$

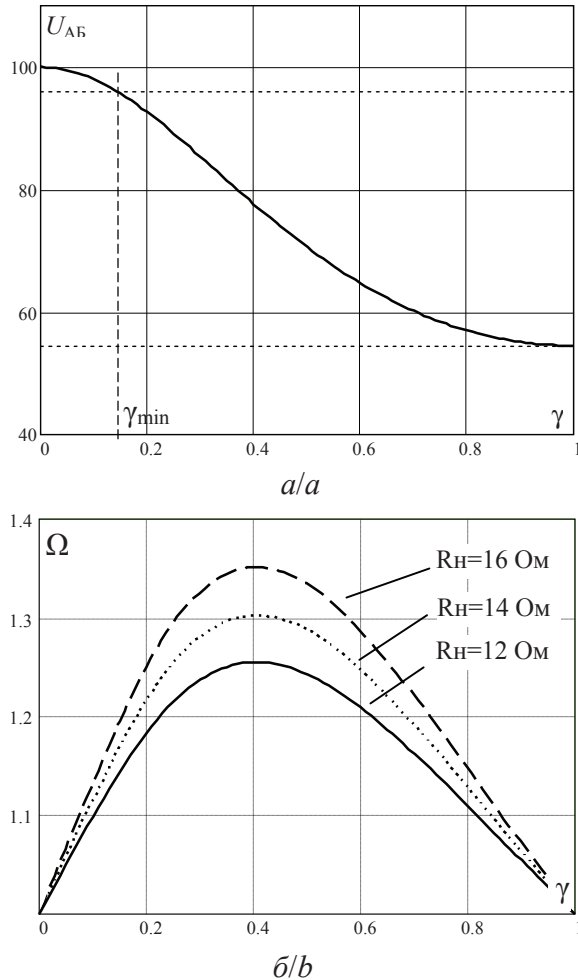
Особенностью резонансных преобразователей является адаптивная подстройка частоты в процессе регулирования, обеспечивающая сохранение резонансного режима работы, минимизацию рекуперации энергии и повышения КПД. Величину частотной подстройки можно определить из угла сдвига основных гармоник тока инвертора и его напряжения, который равен углу регулирования

$$\text{tg}(\varphi) = \frac{\omega L - 1/\omega C}{R_{\text{ac}}},$$

где  $R_{\text{ac}}$  – сопротивление выпрямителя по переменному току. Следует учитывать, что в вольтодобавочной схеме активное сопротивление выпрямителя по переменному току зависит от напряжения аккумулятора

$$R_{ac} = \frac{8}{\pi^2} K_{тр}^2 \frac{U_{выпр}}{I_{вых}} = \frac{8}{\pi^2} K_{тр}^2 \frac{U_{вых} - U_{AB}}{I_{вых}} =$$

$$= \frac{8}{\pi^2} K_{тр}^2 R_H \left( \frac{U_{вых} - U_{AB}}{U_{вых}} \right).$$



**Рис. 2.** Регулировочная характеристика (а) и характеристика частотной подстройки при различных сопротивлениях нагрузки (б) при  $U_{out}=100$  В,  $U_{ABmin}=55$  В,  $K_{тр}=1,2$

**Fig. 2.** Adjustment characteristic (a) and characteristic of frequency tuning at various load resistances (b) at  $U_{out}=100$  V,  $U_{ABmin}=55$  V

Таким образом, угол сдвига гармоник можно выразить

$$\operatorname{tg}(\varphi) = \frac{\pi^2}{8} \cdot \frac{\omega L - 1/\omega C}{R_H} \cdot \frac{1}{K_{тр}^2} \cdot \frac{U_{вых}}{U_{вых} - U_{AB}} =$$

$$= \frac{\pi^2}{8} \cdot \frac{\Omega^2 - 1}{\Omega} \cdot \frac{\rho}{R_H} \cdot \frac{1}{K_{тр}^2} \cdot \frac{U_{вых}}{U_{вых} - U_{AB}}.$$

Полученное выражение совместно с регулировочной характеристикой (2) позволяет получить зависимость

$$\operatorname{tg}(\varphi) = \frac{\pi^2}{8} \cdot \frac{\Omega^2 - 1}{\Omega} \cdot \frac{\rho}{R_H} \cdot \frac{1}{K_{тр}^2} \cdot \left( 1 + \frac{K_{тр}}{\cos^2 \varphi} \right),$$

которая связывает величину частотной подстройки  $\Omega$  с глубиной регулирования при стабилизации выходного напряжения (рис. 2, б). Следует отметить, что частотная подстройка в вольтодобавочной схеме резонансного преобразователя не увеличивается монотонно с уменьшением длительности импульса напряжения, а имеет максимум, величина которого зависит от нагрузки. Это обусловлено увеличением добротности в процессе регулирования, которая в вольтодобавочных схемах не является постоянной.

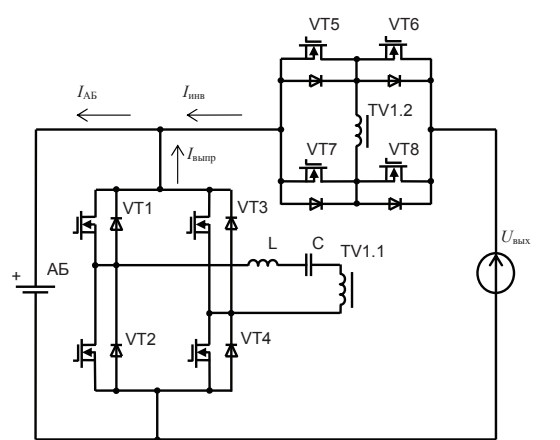
Рассмотрены коммутационные процессы в инверторе и выпрямителе резонансного преобразователя. Условием мягкого включения транзисторов является переход преобразователя в режим рекуперации после выключения транзистора, что инициирует перезаряд паразитных емкостей транзисторов стойки моста. Однако важной особенностью схемы является то, что в инверторе и выпрямителе преобразователя эти процессы происходят по-разному. Отличаются также и условия возникновения перезаряда паразитных емкостей транзисторов, обеспечивающие формирование нулевого напряжения на включаемом транзисторе. Для мягкого включения транзистора инвертора предварительное выключение соседнего по стойке транзистора необходимо произвести до перехода тока резонансного контура через ноль, что обеспечивает разряд емкости включаемого транзистора током, протекающим в прежнем направлении.

Мягкое включение транзисторов выпрямителя осуществляется иначе. В этом случае из-за использования MOSFET транзисторов в инверсном режиме (режиме активного выпрямителя) перезаряд паразитных емкостей транзисторов до смены направления тока невозможен, так как в этом случае ток выключаемого транзистора шунтируется обратным диодом. Поэтому выключение транзисторов необходимо производить после смены направления тока контура. Таким образом, благоприятное включение транзисторов происходит при опережающем ток напряжении инвертора и при отстающем от тока напряжении выпрямителя. Соответственно напряжение выпрямителя должно отставать от напряжения инвертора, что достигается введением фиксированной временной задержки управляющих импульсов транзисторов выпрямителя относительно инвертора (рис. 2).

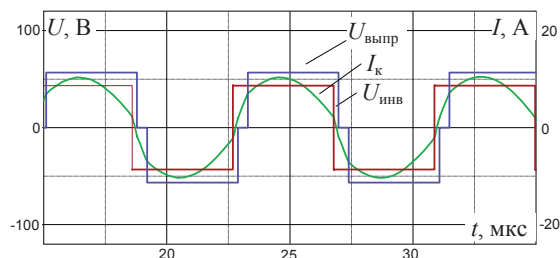
#### Вольтодобавочный резонансный преобразователь в режиме заряда аккумулятора

При наличии на выходной шине питающего напряжения разряд аккумулятора не требуется и вольтодобавочный преобразователь может осуществлять заряд аккумулятора за счет работы в реверсивном режиме. В этом случае мостовые преобразователи меняются функциями, вольтодобавочный мост VT5–VT8 является инвертором, который формирует переменное напряжение амплитудой, равной  $U_{вых} - U_{AB}$ , а мост, подключенный к аккумулятору VT1–VT4, – выпрямителем, напряжение

которого всегда  $U_{AB}$ . При этом как и в режиме разряда энергия поступает на аккумулятор, как по переменному току, так и непосредственно по цепи постоянного тока (рис. 3, а).

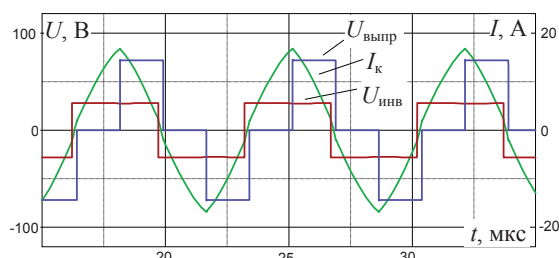


а/а



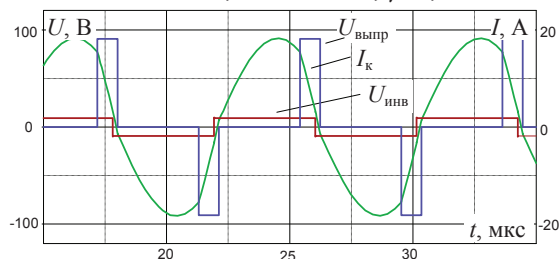
б/б

$U_{AB}=56 \text{ B/V}$ ,  $T=8,2 \text{ мкс/ус}$ ,  $\gamma=0,9$



в/в

$U_{AB}=70 \text{ B/V}$ ,  $T=7 \text{ мкс/ус}$ ,  $\gamma=0,5$



г/г

$U_{AB}=90 \text{ B/V}$ ,  $T=8,22 \text{ мкс/ус}$ ,  $\gamma=0,2$

**Рис. 3.** Вольтодобавочный резонансный преобразователь (а), и диаграммы его работы в режиме стабилизации тока заряда аккумулятора  $I_{AB}=8 \text{ A}$  при  $U_{вх}=100 \text{ В}$  (б–г)

**Fig. 3.** Boost type series resonant converter (a), time diagrams in the mode of stabilization of the battery charge current at  $I_{ab}=8 \text{ A}$ ,  $U_{in}=100 \text{ V}$  (b–d)

Учитывая, что коэффициент трансформации в схеме остался прежним (1), минимальное напряжение аккумулятора в режиме заряда будет соответствовать  $\gamma=1$ . По мере заряда аккумулятора и роста его напряжения напряжение выпрямителя уменьшается, поэтому преобразователь начинает работать в режиме повышения напряжения, что достигается широтно-импульсным регулированием напряжения выпрямителя; диаграммы работы показаны на рис. 3, б, г. Следует отметить, что в режиме разряда тот же самый мост выполняет функции регулируемого инвертора. Регулирование осуществляется аналогично режиму разряда путем фазового сдвига управляющих импульсов транзисторов одной стойки выпрямителя относительно другой, с образованием интервалов закороченного состояния выпрямителя.

Реализация регулирования в режиме заряда аккумулятора существенно отличается от регулирования в разрядном режиме из-за необходимости обеспечения мягкого включения транзисторов. Прежде всего это проявляется в том, что регулирование осуществляется передним фронтом напряжения выпрямителя (рис. 3, б, г), т. е. реализуется переходом выпрямителя из закороченного состояния в режим активного выпрямления. Именно при такой последовательности смены состояний выпрямителя выключаемый транзистором ток будет положительным (встречным обратному диоду), что приведет к перезаряду паразитных емкостей транзисторов регулируемой стойки и созданию условий мягкого включения.

Такой способ регулирования реализуется запаздыванием фазы управляющих импульсов транзисторов регулируемой стойки VT1, VT2 относительно нерегулируемой VT3, VT4, т. е. в направлении, противоположенном режиму разряда. Мягкое включение транзисторов нерегулируемой стойки выпрямителя VT3, VT4 возможно только при их коммутации после смены направления тока резонансного контура, который перезаряжает их паразитные емкости. Так же, как и в режиме разряда, напряжение инвертора должно опережать напряжение выпрямителя, что достигается сдвигом управляющих импульсов на определенный угол, достаточный для протекания процессов коммутации. Диаграммы работы при различных напряжениях аккумулятора при стабилизации зарядного тока на уровне 8А показаны на рис. 3, б, г.

Распределение составляющих зарядного тока зависит от глубины регулирования преобразователя. При минимальном напряжении аккумулятора ( $\gamma \rightarrow 1$ ) соотношение составляющих тока заряда определяется коэффициентом трансформации, ток резонансного контура при этом минимален, как и мощность заряда. По мере роста напряжения  $U_{AB}$  длительность импульсов напряжения выпрямителя уменьшается, что перераспределяет токи в преобразователе, большая часть зарядного тока начинает протекать по постоянной составляющей, ток резонансного контура растет, т. к. увеличивается

зарядная мощность. Максимальное значение напряжения  $U_{AB}$  соответствует максимальному току резонансного контура, однако фактически весь зарядный ток в этом случае поступает в аккумулятор по постоянной составляющей. Таким образом, увеличение тока контура сопровождается уменьшением энергии, передаваемой через звено переменного тока.

Таким образом, в режиме заряда аккумулятора условия обеспечения мягкой коммутации и способ реализации регулирования существенно отличаются от условий разрядного режима, при этом в режиме разряда фазовый сдвиг регулируемой стойки положительный, а в режиме заряда отрицательный.

#### Режим работы резонансного преобразователя при токовых перегрузках

При функционировании системы энергообеспечения геофизических приборов могут быть режимы кратковременных перегрузок, при возникновении которых преобразователь переходит в режим ограничения выходного тока. В таком режиме вы-

ходное напряжение может быть существенно меньше входного, что невозможно реализовать в вольтодобавочной схеме (рис. 1, а) из-за обратных диодов выпрямителя. Поэтому в схему преобразователя введен дискретный ключ SA1, размыкание которого при перегрузке позволяет изменить структуру преобразователя, переводя его из вольтодобавочного в режим классического резонансного преобразователя по топологии двойного моста (Dual Active Bridge), схема преобразователя показана на рис. 4, а.

Особенностью полученной при разомкнутом ключе SA1 схемы преобразователя является устойчивость к токовым перегрузкам. При скачкообразном увеличении нагрузки преобразователь не может быстро подстроить частоту, выходит из резонанса, а полученная при этом реактивная составляющая импеданса резонансного контура препятствует развитию аварийного тока, значение которого определяется выражением

$$I_{\text{fault}} = U_{AB} \sin \frac{\pi \gamma_{\text{fault}}}{2} \cdot \frac{1}{\omega_{\text{fault}} L - 1/\omega_{\text{fault}} C},$$

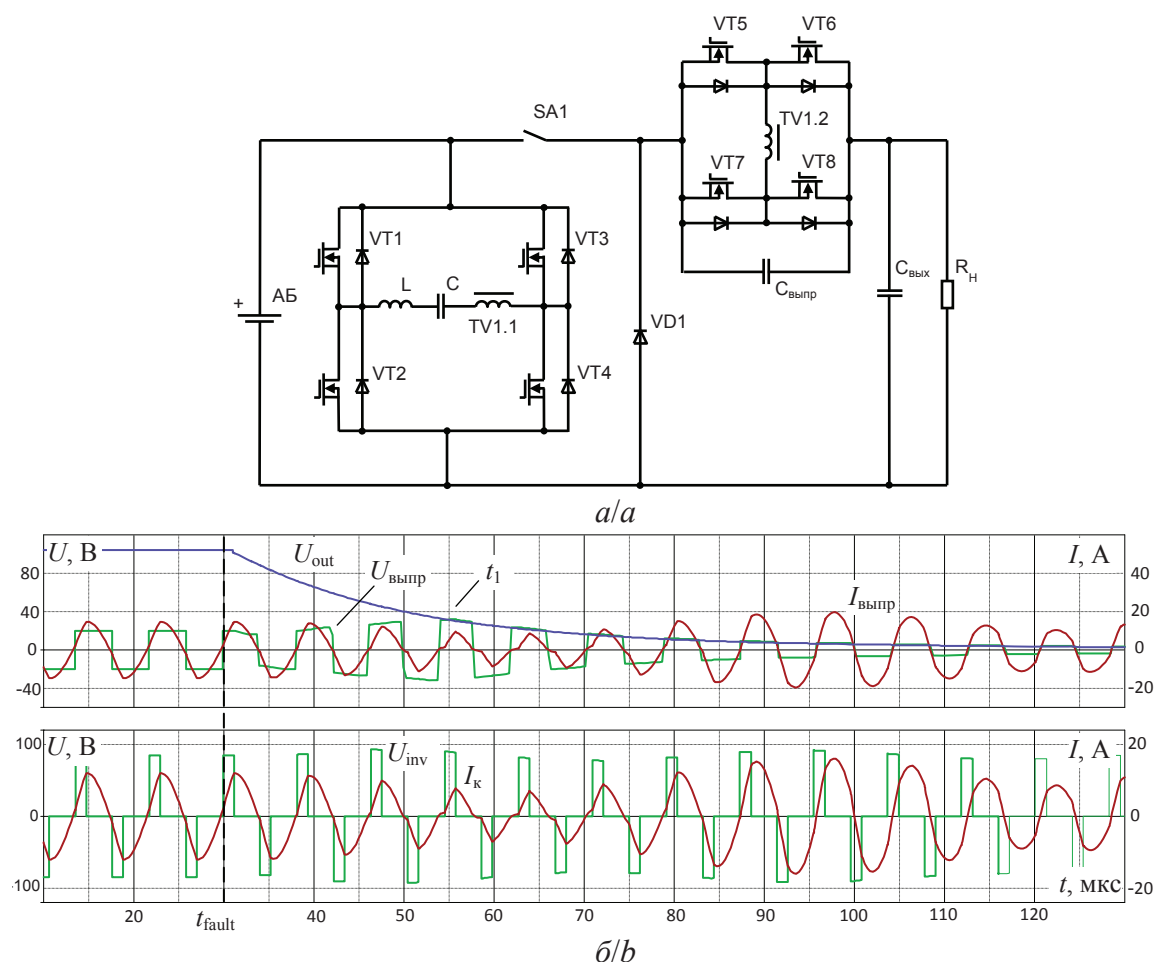


Рис. 4. а) вольтодобавочный резонансный преобразователь с ограничением выходного тока; б) переходный процесс при скачкообразном увеличении нагрузки с 12 до 0,2 Ом

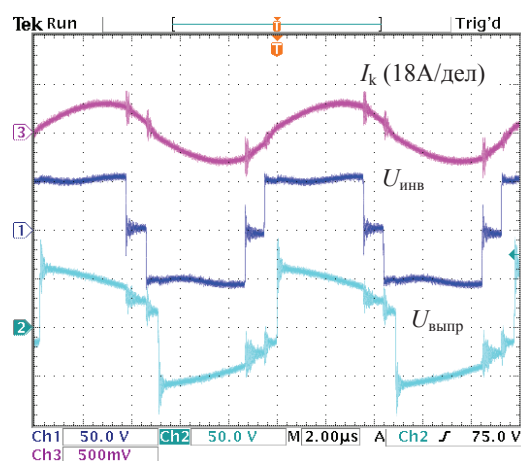
Fig. 4. а) boost type series resonant converter with output current limitation; б) transient process with a sudden increase in load from 12 to 0,2 Ohm

где  $t_{\text{fault}}$  – длительность импульсов напряжения, подаваемого на контур в момент перегрузки;  $\omega_{\text{fault}}$  – частота в момент перегрузки. На рис. 4, б показан переходный процесс при коротком замыкании нагрузки с 12 до 0,2 Ом, изменение нагрузки и размыкание ключа SA1 происходит в момент времени  $t_{\text{fault}}$ .

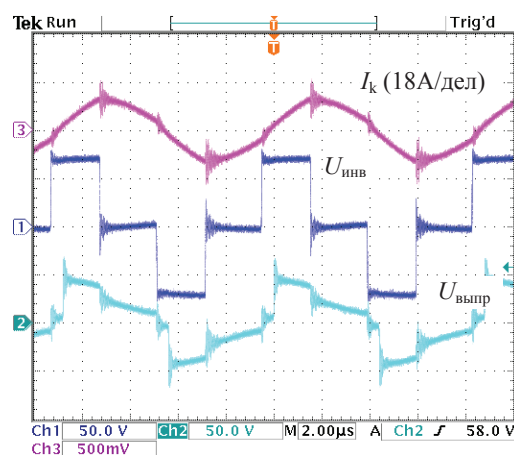
В момент времени  $t_{\text{fault}}$ , после размыкания ключа SA1, прекращается питание нагрузки преобразователем, так как напряжение выходного фильтра выше напряжения выпрямителя, поэтому выходной ток выпрямителя начинает медленно заряжать фильтр выпрямителя  $C_{\text{выпр}}$ . В то же время выходное напряжение  $U_{\text{вых}}$  экспоненциально уменьшается с постоянной времени  $\tau_1 = R_{\text{fault}} - C_{\text{выпр}}$ . В момент времени  $t_1$  напряжение нагрузки становится равным напряжению выпрямителя, и с этого момента преобразователь начинает питать нагрузку. Уменьшение напряжения выпрямителя приводит к увеличению добротности резонансного контура согласно характеристике (рис. 2, б, а), соответственно, к сдвигу первых гармоник тока резонансного контура и напряжения инвертора на угол, близкий к  $\pi/2$ , так как активная составляющая импеданса нагрузки инвертора фактически отсутствует. На рис. 4, б можно заметить, что до изменения нагрузки  $t_{\text{fault}}$  преобразователь находился в квазирезонансном режиме, а после окончания переходного процесса присутствует интервал рекуперации. В таком режиме инвертор не потребляет активной мощности от аккумулятора, ток которого равен нулю. Восстановление номинальной нагрузки автоматически приводит к восстановлению выходного напряжения. Таким образом, режим параметрического токоограничения за счет фазового сдвига тока контура относительно напряжения является важным свойством резонансного преобразователя, существенно повышающим его устойчивость к перегрузкам.

#### Результаты эксперимента вольтодобавочного резонансного преобразователя

Для экспериментальной проверки полученных результатов был спроектирован макетный образец исследуемого вольтодобавочного резонансного преобразователя. Преобразователь выполнен на транзисторах IRFP4668, применен согласующий трансформатор с коэффициентом трансформации  $K_{\text{тр}}=1$  на магнитопроводе ELP38 феррит N87. Резонансный контур представляет собой дроссель, индуктивностью  $L=9$  мкГн на магнитопроводе ELP38 с зазором  $g=1$  мм феррит N87, и резонансный конденсатор, состоящий из 5 конденсаторов K78–26–1000В–0,047 мкФ, с общей емкостью  $C=0,235$  мкФ. На рис. 5, а, б приведены осциллограммы тока резонансного контура, напряжения инвертора и напряжения первичной обмотки трансформатора, подключенного к выпрямителю при стабилизации выходно-



а/а  
 $U_{\text{AB}}=50$  В/В,  $\gamma=0,9$



б/б  
 $U_{\text{AB}}=75$  В/В,  $\gamma=0,46$

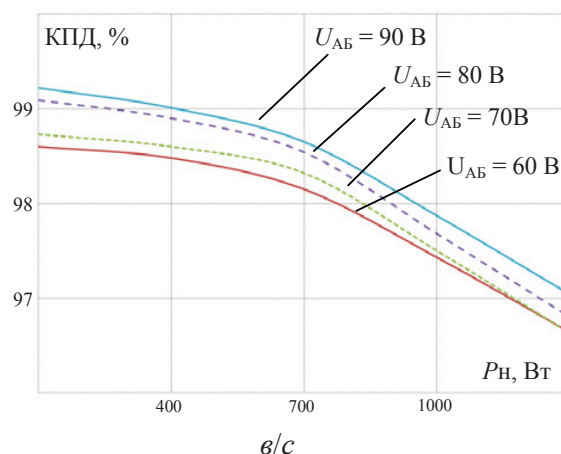


Рис. 5. Осциллограммы выходного напряжения инвертора и тока резонансного контура (а, б), КПД преобразователя (в)

Fig. 5. Oscillograms of the output voltage of the inverter and the current of the resonant circuit (a, b), converter efficiency (c)

го напряжения  $U_{\text{вых}}=100$  В, сопротивлении нагрузки  $R_n=12$  Ом, входном напряжении  $U_{\text{AB}}=50$  В,  $\gamma=0,9$  (рис. 5, а) и  $U_{\text{AB}}=75$  В,  $\gamma=0,46$  (рис. 5, б). Осциллограммы подтверждают сделанные в работе выводы. Показано, что переключение транзисторов нерегулируемой стойки инвертора до перехода тока резонансного контура через ноль приводит к изменению выходного напряжения инвертора, что свидетельствует о перезаряде паразитных емкостей переключаемой пары транзисторов, а соответственно, и об их мягком включении. Транзисторы выпрямителя, наоборот, включаются после перехода тока контура через ноль, что достигается запаздыванием по управлению на 400 нс. Следует отметить существенные искажения формы напряжения первичной обмотки трансформатора, вызванные наличием индуктивности рассеяния трансформатора, являющейся составляющей резонансного контура наряду с резонансным дросселем.

Проведены измерения КПД преобразователя на цифровом анализаторе мощности IntegraVision PA2200 Series Power Analyzers фирмы KEYSIGNT, позволяющем определять энергетические параметры устройств преобразовательной техники с погрешностью до 0,5 %. Зависимость КПД преобразователя от выходной мощности представлена на рис. 5, в. Можно отметить отсутствие зависимости КПД от напряжения аккумулятора, что объясняется тем, что ток резонансного контура определяется током нагрузки и не зависит от глубины регулирования.

## Заключение

Главное преимущество вольтодобавочного резонансного преобразователя состоит в существенном увеличении КПД, который является одним из основных показателей преобразователя, питающего геофизические приборы. В процессе работы удалось одновременно снизить как статические потери в транзисторах за счет применения вольтодобавочной схемы, так и динамические потери за счет резонансного режима работы, позволяющего получить мягкое включение транзисторов. Существенное усложнение управления преобразователем, связанное с необходимостью частотной подстройки по фазовому рассогласованию и введением фиксированного фазового сдвига между инвертором и выпрямителем, в настоящее время не является серьезной проблемой в связи с активным развитием вычислительной техники. Получены аналитические зависимости, связывающие требуемую частотную подстройку с величиной нагрузки.

Важным результатом работы является исследование режимов рекуперации энергии в представленном резонансном преобразователе, что позволило реализовать режим заряда аккумулятора. Показано, что в этом режиме стабилизация зарядного тока производится регулируемым выпрямителем, разработан способ регулирования по переднему фронту напряжения выпрямителя, обеспечивающий мягкое включение транзисторов. С другой стороны, учитывая, что, как правило, зарядные токи аккумулятора гораздо меньше разрядных, к энергетическим показателям режима заряда не предъявляется жестких требований.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аппаратура и оборудование для геофизических исследований нефтяных и газовых скважин. Справочник / А.А. Молчанов, В.В. Лаптев, В.Н. Моисеев, Р.С. Челокьян. – М.: Недра, 1987. – 263 с.
2. Геофизические исследования скважин / В.М. Добрынин, Б.Ю. Вендельштейн, Р.А. Резванов, А.Н. Африкан. – М.: ФГУП Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2004. – 400 с.
3. Савич А.Д. Геофизические исследования горизонтальных скважин. Состояние и проблемы // НТВ «Каротажник». – 2010. – Вып. 2. – С. 16–37.
4. Диксон Р.К., Михальченко Г.Я., Михальченко С.Г., Русский В.А., Семенов С.М. Вопросы линеаризации математической модели преобразователя напряжения, применяемого в системах электропитания, работающих на основе возобновляемых источников энергии // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 1. – С. 89–99.
5. Mikhachenko S.G., Apasov V.I. Applying a mathematical model for determining power section ratings of a buck-boost converter // 17<sup>th</sup> International Conference on micro/nanotechnologies and electron devices. – Erlagol, Russia, 2016. – P. 507–511.
6. Mikhachenko G., Mikhachenko S. Bifurcation behavior in multi-parallel interleaved buck converter // International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015. – Omsk, Russia, 2015. – P. 7147147.
7. An AC-link Bidirectional DC-DC Converter with Synchronous Rectifier / Toshiro Hirose, Keisuke Nishimura, Takayuki Kimura, Hirofumi Matsuo // 36<sup>th</sup> Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. – Glendale, AZ, USA, 7–10 November 2010. – P. 261–267.
8. Mirsamadi M., Taherbaneh M., Rezaie A.H. Efficiency improvement of a DC-DC converter used in Series-Connected Boost Converters // Electrical Power & Energy Conference (EPEC). – Halifax, NS, Canada, 25–27 August 2010. – P. 5697196.
9. Розанов Ю.К., Никифоров А.А. Высокочастотная коммутация электрических цепей с резонансными контурами – перспективное направление преобразовательной техники // Электротехника. – 1990. – № 6. – С. 20–28.
10. Глебов Б.А., Жигачев В.А. Мостовой резонансный DC/DC-преобразователь с фазовым управлением силовыми транзисторами // Практическая силовая электроника. – 2015. – № 1 (57). – С. 29–35.
11. Огородников Д.Н., Ярославцев Е.В. Анализ однофазного параллельного резонансного инвертора со стабилизированным квазисинусоидальным выходным напряжением // Известия томского политехнического университета. – 2009. – Т. 315. – № 4. – С. 120–124.
12. Земан С.К., Казанцев Ю.М., Осипов А.В. Согласование параметров индуктора и преобразователя частоты с помощью последовательно-параллельного резонансного контура // Индукционный нагрев. – 2013. – № 2. – С. 25–32.
13. Земан С.К., Осипов А.В. Многоячейковые регулируемые резонансные преобразователи частоты с многозонной модуляцией в системах высокочастотного индукционного нагрева // Электротехника. – 2006. – № 4. – С. 49–56.
14. Chen W., Rong P., Lu Z.Y. Snubberless bidirectional DC-DC converter with new CLLC resonant tank featuring minimized switch-

- ing loss // IEEE Trans. Ind. Electron. – 2010. – V. 57. – № 9. – P. 3075–3086.
15. Minimum current operation of bidirectional dual-bridge series resonant DC/DC converters / L. Corradini, D. Seltzer, D. Bloomquist, R. Zane, D. Maksimovic, B. Jacobson // IEEE Trans. Power Electron. – 2012. – V. 27. – № 7. – P. 3266–3276.
16. De Doncker R.W.A.A., Divan D.M., Kheraluwala M.H. A three phase soft-switched high-power-density DC/DC converter for high power applications // IEEE Transaction on Industry Applications. – 1991. – V. 27. – № 1. – P. 63–73.
17. Jang Y., Jovanovic M.M. A New PWM ZVS Full-Bridge Converter // IEEE Trans. Power Electron. – 2007. – V. 22. – P. 987–994.
18. Mikhachenko S.G., Stolyarova A.A. Analysis of Resonant Converters at Wide Input Voltage Range // 17<sup>th</sup> International conference on micro/nanotechnologies and electron devices. – Erlagol, Russia, 2016. – P. 512–517.
19. Oggier G.G., Garcia G.O., Oliva A.R. Switching Control Strategy to Minimize Dual Active Bridge Converter Losses // IEEE Trans. Power Electron. – 2009. – V. 24. – № 7. – P. 1826–1838.
20. Watson R., Lee F.C. Analysis, design and experimental results of a 1-kW FB-ZVS-PWM converter employing magamp secondary side control // IEEE Trans. Ind. Electron. – 1998. – V. 45. – № 5. – P. 806–814.

Поступила 27.10.2017 г.

#### Информация об авторах

**Осипов А.В.**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник НИИ Космических технологий Томского университета систем управления и радиоэлектроники.

**Ярославцев Е.В.**, кандидат технических наук, доцент отделения электронной инженерии Инженерной школы неразрушающего контроля и безопасности Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Буркин Е.Ю.**, кандидат технических наук, доцент отделения электронной инженерии Инженерной школы неразрушающего контроля и безопасности Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Свиридов В.В.**, заведующий лабораторией отделения электронной инженерии Инженерной школы неразрушающего контроля и безопасности Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 621.314

**BOOST TYPE SERIES RESONANT CONVERTER WITH FLEXIBLE STRUCTURE FOR POWER SUPPLIES****Aleksandr V. Osipov<sup>1</sup>,**  
ossan@mail.ru**Evgeniy V. Yaroslavtsev<sup>2</sup>,**  
yaroslavtsev@tpu.ru**Evgeniy Yu. Burkin<sup>2</sup>,**  
burkin@mail.ru**Vitaliy V. Sviridov<sup>2</sup>,**  
vvsviridov@yandex.ru<sup>1</sup> Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics,  
40, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.<sup>2</sup> National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

**Relevance.** Geophysical research quality highly depends on power supply system, which, in its turn, has to provide uninterrupted power, for instance by means of accumulator battery. Specifically, continuity of supply is important for borehole logging during directional drilling which requires autonomous (self-powered) equipment. Converter powering geophysical equipment operates at high temperatures, where heat removal is impeded, makes the enhancement of the converter efficacy of utter importance. In that regard boost type topologies converting a part of a total power flow are preferred, especially in non-isolated power supply systems. However hard commutation in such topologies impairs an efficiency thus justifying development of boost type resonant converter.

**The aim** of the research is to develop resonant boost type converter of high efficiency and to investigate one's power and control properties.

**Methods:** electrotechnique fundamentals, linear equations theory, along with the modern simulation software, computational and mathematical modeling techniques.

**Results.** The authors have analysed DC–DC resonant bridge converter with the boost link in voltage regulation mode powered by the battery as well as in a battery charge mode. The paper demonstrates high efficiency of a narrow battery voltage range. The control mode has substantial influence on operating parameters. Variable frequency PWM keeps relatively low value of operating current thus providing maximum efficiency. Frequency variation required to stay in soft commutation mode by guaranteeing current direction at turn-on instance. Soft commutation transitions are however different for the inverter and synchronous rectifier. Inability of boost topology to limit output current at overload is shown and topological solution is proposed to overcome it using auxiliary switches. The results are proven using hardware prototype. The paper introduces the conclusions as well as discussion of the results.

**Key words:**

Geophysical equipment power supply, energy efficiency, resonant converter, boost converter, soft commutation.

**REFERENCES**

1. Molchanov A.A., Laptev V.V., Moiseev V.N., Chekolyan R.S. *Apparatura i oborudovanie dlya geofizicheskikh issledovaniy neftnykh i gazovykh skvazhin. Spravochnik* [Equipment for geophysical studies of oil and gas wells. Directory]. Moscow, Nedra Publ., 1987. 263 p.
2. Dobrynin V.M., Vendelshteyn B.Yu., Rezvanov R.A., Afrikan A.N. *Geofizicheskie issledovaniya skvazhin* [Well logging]. Moscow, Neft i gaz Publ. RGU nefti i gaza im. I. M. Gubkina, 2004. 400 p.
3. Savich A.D. *Geofizicheskie issledovaniya gorizontalnykh skvazhin. Sostoyanie i problemi* [Geophysical studies of horizontal wells. Status and problems]. NTV «Karotazhnik», 2010, vol. 2, pp. 16–37.
4. Dixon R.C., Mikhachenko G.Ya., Mikhachenko S.G., Ruskin V.A., Semenov S.M. Issues of linearization of a two-phase boost DC-DC converter applied in the power supply systems operating on renewable energy sources. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 1, pp. 89–99. In Rus.
5. Mikhachenko S.G., Apasov V.I. Applying a mathematical model for determining power section ratings of a buck-boost converter. *17<sup>th</sup> International Conference on micro/nanotechnologies and electron devices*. Erlagol, Russia, 2016. pp. 507–511.
6. Mikhachenko G., Mikhachenko S. Bifurcation behavior in multi-parallel interleaved buck converter. *International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015*. Omsk, Russia, 2015. pp. 7147147.
7. Toshiro Hirose, Keisuke Nishimura, Takayuki Kimura, Hirofumi Matsuo. An AC-link Bidirectional DC-DC Converter with Synchronous Rectifier. *36<sup>th</sup> Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*. Glendale, AZ, USA, 7–10 November 2010. pp. 261–267.
8. Mirsamadi M., Taherbaneh M., Rezaie A.H. Efficiency improvement of a DC-DC converter used in Series-Connected Boost Converters. *Electrical Power & Energy Conference (EPEC)*. Halifax, NS, Canada, 25–27 August 2010. pp. 5697196.
9. Rozanov Yu.K., Nikiforov A.A. High-frequency switching of electrical circuits with resonant circuits is a promising trend in converter technology. *Electrical Engineering*, 1990, no. 6, pp. 20–28. In Rus.
10. Glebov B.A., Zhigachev B.A. Bridge resonant DC/DC converter with phase-controlled power transistors. *Practical power electronics*, 2015, no. 1 (57), pp. 29–35. In Rus.

11. Ogorodnikov D.N., Yaroslavl'tsev E.V. Analysis of a single-phase parallel resonant inverter with a stabilized quasi-sinusoidal output voltage. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2009, vol. 315, no. 4, pp. 120–124. In Rus.
12. Zeman S.K., Kazantsev Yu.M., Osipov A.V. Heating inductor and frequency converter parameter conditioning by using of series-parallel resonance circuit. *Induction heating*, 2013, no. 2, pp. 25–32. In Rus.
13. Zeman S.K., Osipov A.V. Many cellular controlled resonance frequency converter with multizone modulation in highfrequency induction heating systems. *Electrical Engineering*, 2006, no. 4, pp. 49–56. In Rus.
14. Chen W., Rong P., Lu Z.Y. Snubberless bidirectional DC-DC converter with new CLLC resonant tank featuring minimized switching loss. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2010, vol. 57, no. 9, pp. 3075–3086.
15. Corradini L., Seltzer D., Bloomquist D., Zane R., Maksimovic D., Jacobson B. Minimum current operation of bidirectional dual-bridge series resonant DC/DC converters. *IEEE Trans. Power Electron.*, 2012, vol. 27, no. 7, pp. 3266–3276.
16. De Doncker R.W.A.A., Divan D.M., Kheraluwala M.H. A three phase soft-switched high-power-density DC/DC converter for high power applications. *IEEE Transaction on Industry Applications*, 1991, vol. 27, no. 1, pp. 63–73.
17. Jang Y., Jovanovic M.M. A New PWM ZVS Full-Bridge Converter. *IEEE Trans. Power Electron.*, 2007, vol. 22, pp. 987–994.
18. Mikhalechenko S.G., Stolyarova A.A. Analysis of Resonant Converters at Wide Input Voltage Range. *17<sup>th</sup> International conference on micro/nanotechnologies and electron devices*. Erlagol, Russia, 2016. pp. 512–517.
19. Oggier G.G., Garcia G.O., Oliva A.R. Switching Control Strategy to Minimize Dual Active Bridge Converter Losses. *IEEE Trans. Power Electron*, 2009, vol. 24, no. 7, pp. 1826–1838.
20. Watson R., Lee F.C. Analysis, design and experimental results of a 1-kW FB-ZVS-PWM converter employing magamp secondary side control. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 1998, vol. 45, no. 5, pp. 806–814.

Received: 27 October 2017.

#### Information about the authors

**Aleksandr V. Osipov**, Cand. Sc., senior researcher, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics.

**Evgeniy V. Yaroslavl'tsev**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Evgeniy Yu. Burkin**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Vitaliy V. Sviridov**, head of the laboratory, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 550.46

## ВРЕМЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ВОД В ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ВАСЮГАНСКОГО БОЛОТА (ЗАПАДНАЯ СИБИРЬ)

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

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

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

**Актуальность работы.** Анализ изменений химического состава болотных вод является важной частью исследований изменений окружающей среды и климата при проведении экологического мониторинга при добыче нефти и газа, нормировании воздействий на водные объекты и оценке эффективности рекультивации загрязненных земель.

**Цель работы:** выявление закономерностей многолетних и внутригодовых изменений химического состава болотных вод деятельного горизонта торфяной залежи восточной части Васюганского болота.

**Методы исследования:** ландшафтно-геохимический и статистические методы, методы определения химического состава болотных вод, термодинамические расчеты.

**Результаты и выводы.** Выполнен анализ временных изменений химического состава вод восточного участка Васюганского болота (Западная Сибирь, бассейн реки Обь, Томская область) в пределах трёх внутриболотных экосистем (мезотрофной окраины, олиготрофного грядово-мочажинного комплекса и рьяма – олиготрофного сосново-сфагново-кустарничкового болота). Показано, что в течение 2003–2017 гг. статистически значимые однонаправленные изменения химического состава болотных вод в деятельном горизонте торфяной залежи отсутствуют. Наблюдаемые колебания гидрохимических показателей обусловлены изменчивостью атмосферного увлажнения, которое в годовом разрезе периода 1965–2016 гг. остаётся статистически постоянным. Гидрохимический режим мезотрофной окраины отличается наибольшими изменчивостью минерализации болотных вод и зависимостью от величины атмосферного увлажнения, а гидрохимический режим рьяма – наименьшим влиянием атмосферного увлажнения. Общими чертами гидрохимического режима всех трёх экосистем является определённое уменьшение минерализации в период весеннего половодья и увеличение соединений N, P, Si и микроэлементов в зимнюю межень.

### Ключевые слова:

Васюганское болото, болотные воды, химический состав, многолетние изменения, внутригодовые изменения.

### Введение

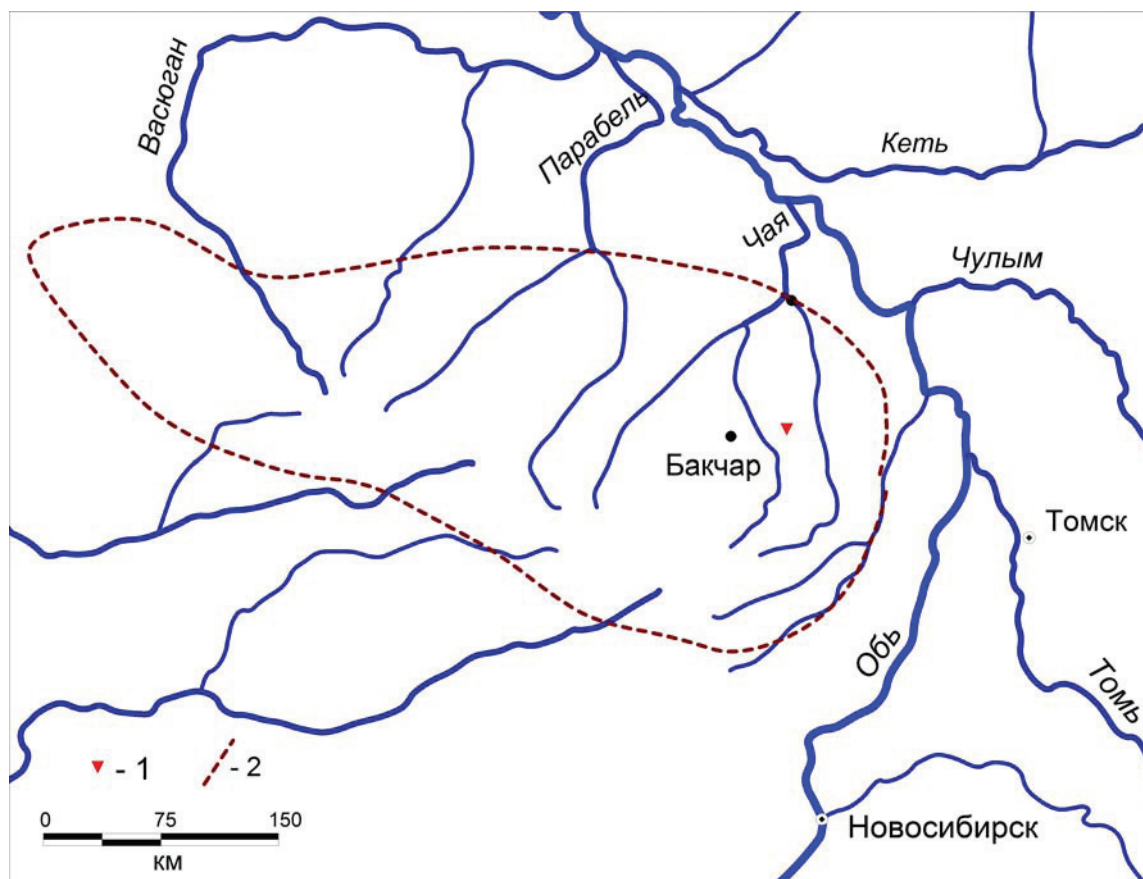
Васюганское болото – одно из самых больших в мире – расположено в Обь-Иртышском междуречье на площади не менее 52 тыс. км<sup>2</sup>, причём это значение следует рассматривать как приближённую оценку из-за сложной структуры болота и его продолжающегося расширения, сопровождающегося приростом торфяной залежи в среднем на 1 мм/год [1–3]. Васюганское болото играет очень важную роль в формировании условий жизнедеятельности населения и функционировании природно-территориальных комплексов Западной Сибири [4–6], что определяет актуальность комплексного исследования болота, в том числе и химического состава болотных вод, закономерностей его пространственно-временных изменений.

Ниже приведены результаты обобщения материалов исследований в рамках решения последней задачи, выполненных в течение 2003–2017 гг. в Томском политехническом университете (ТПУ) совместно с коллегами из Томского государственного университета (ТГУ), акционерного общества «Томскгеомониторинг» (АО «Томскгеомониторинг») и ряда других организаций. Объектом исследования является восточный участок Васюганского болота (рис. 1), соответствующий водосбору реки Ключ (элемента системы «река Ключ – река Бакчар – река Чая – река Обь – Карское море») и

расположенный примерно в 160 км от г. Томска [7, 8].

На реке Ключ у с. Полынянка с 1972 по 1997 г. действовал водомерный пост Росгидромета. Там же с 1990-х гг. проводятся гидрологические и гидрохимические наблюдения специалистами Сибирского научно-исследовательского института торфа СО РАН (СибНИИТ СО РАН), ТГУ, Томского государственного педагогического университета (ТГПУ) и Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (ИМКЭС СО РАН). Также следует отметить, что на прилегающей территории Васюганского болота (участок Васюганского торфяного месторождения № 5) были выполнены геологоразведочные работы на торф и комплекс работ по изучению тяжёлых металлов в торфах, в 1960 г. специалистами Института леса организован биогеоценотический стационар «Плотниково», а непосредственно на водосборе реки Ключ с 1990-х гг. функционируют стационары СибНИИТ СО РАН, ТГПУ и ИМКЭС СО РАН [5, 9–15].

Особенностью указанных выше исследований является сосредоточенность пунктов гидрологических и гидрохимических наблюдений в основном на участках распространения мезотрофных и евтрофных болотных экосистем и прилегающих к ним олиготрофных участках, в той или иной мере



**Рис. 1.** Схема размещения исследуемого участка Васюганского болота: 1 – участок гидрохимических наблюдений; 2 – границы основной части болота

**Fig. 1.** Layout of the researched site of the Vasyugan mire: 1 is the site of hydrochemical researches; 2 are the borders of the basic part of the Vasyugan mire

испытывающих дренирующее влияние реки Ключ. Следовательно, использование полученных на этих участках данных для изучения широко распространённых в таёжной зоне Западной Сибири процессов современного заболачивания путём подтопления лесов и олиготрофизации торфяной залежи (в отсутствие русловой сети) предполагает ряд допущений и оговорок, причём не всегда очевидных и требующих дополнительного обоснования. С учётом этого в ТПУ с 2003 г. проводятся наблюдения по профилю, расположенному на водоразделе рек Ключ и Гавриловка (элемент системы «река Гавриловка – река Икса – река Чая – река Обь – Карское море»).

По данным геологоразведочных работ, на прилегающем с юга участке Васюганского торфяного месторождения № 5 максимальная глубина торфа составляет 5,3 м, средняя глубина – 1,95 м; торфа – верховые, переходные, низинные, смешанные; средние значения степени разложения торфа 22 %, зольности 6 %, влажности 90,1 %. Непосредственно на исследуемом профиле преобладают верховые и переходные торфа; глубина торфяной залежи – до 4,5 м, в среднем – 2,8 м. Граница водосбора реки Ключ в пределах рассматриваемого

участка (93 км по автодороге Томск–Бакчар) совпадает к мезотрофной окраиной на границе с заболоченным лесом, которая (по мере удаления от границы водосбора по направлению к истокам реки Ключ) сменяется сосново-сфагново-кустарничковым болотом – рямом, а затем грядово-мочажинным (ГМК) и грядово-мочажинно-озерковым (ГМОК) комплексами с включениями топей. Далее (за пределами исследуемого участка), по мере приближения к руслу реки Ключ, происходит замена ГМК и ГМОК в основном на «рям», а затем на мезотрофные и евтрофные внутриболотные экосистемы и, наконец, заболоченный лес (в долине реки Ключ). Более подробное описание участка приведено в работе [7, 8].

#### Объекты и методика исследования

Целью исследования является выявление закономерностей многолетних и внутригодовых изменений химического состава болотных вод деятельного горизонта торфяной залежи водораздельного участка Васюганского болота, характеризующегося преобладанием процессов олиготрофизации торфяной залежи. Основные задачи исследования: 1) выявление изменений химического состава бо-

лотных вод деятельного горизонта в течение 2003–2017 гг., внутри года и по мере удаления от границы исследуемого участка болота и заболоченного смешанного леса; 2) выявление связей между гидрохимическими показателями болотных вод и элементами водного баланса. Соответственно, методика исследования включала: 1) проведение полевых и лабораторных работ по отбору проб болотных вод из деятельного горизонта торфяной залежи; 2) статистический анализ гидрохимических и метеорологических данных, включавший корреляционный и регрессионный анализ, проверку на однородность по среднему (критерий Стьюдента) и дисперсии (критерий Фишера); 3) расчёты индексов насыщения болотных вод относительно ряда минералов и органо-минеральных соединений (на основе метода констант с использованием уравнения Дэвиса для определения коэффициентов активности заряженных частиц [7]).

Отбор проб болотных вод проводился в период с апреля 2003 г. по март 2017 г. В сентябре 2003 г., декабре 2013 и 2015 гг., апреле 2015 г. и октябре 2016 г. были выполнены исследования с наибольшим охватом всех внутриболотных экосистем, а в остальные периоды преимущественно опробовались болотные воды в пределах мезотрофной окраины и рям – олиготрофного сосново-сфагново-кустарничкового болота. Мезотрофная окраина представляет собой мезотрофную слабо облесённую топь и мезотрофное сосново-сфагново-кустарничковое болото.

Общее количество проб болотных вод, отобранных в пределах мезотрофной окраины – 20, в рям – 21, в грядово-мочажинном комплексе – 10. Кроме того, в 2015–2017 гг. в рям было отобрано 3 пробы снега, а также привлечены данные наблюдений АО «Томскгеомониторинг» на скважине № 110р государственной сети мониторинга недр, расположенной примерно в 36 км от исследуемого участка (рис. 1; водовмещающие отложения четвертичного возраста, средняя глубина залегания подземных вод – 7,3 м, минимальная – 5,6 м, максимальная – 9,9 м; использованы результаты определения pH, содержания главных ионов, Fe, Si,  $\text{NH}_4^+$  в 66 пробах).

В пробах болотных и снеговых вод проводилось определение значений pH (потенциометрический метод), перманганатной (ПО) и бихроматной (БО) окисляемости, содержания  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{CO}_2$  (титриметрический),  $\text{SO}_4^{2-}$  (турбидиметрический), Si,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ , фосфаты, Fe (фотометрический, масс-спектрометрический с индуктивно-связанной плазмой с использованием масс-спектрометра NexION 300D),  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  (ионная хроматография), Zn, Cu, Al (инверсионно-вольтамперометрический, атомно-абсорбционный, масс-спектрометрический с индуктивно-связанной плазмой). Лабораторные работы выполнены в аккредитованных лабораториях ТПУ и АО «Томскгеомониторинг». Более подробные сведе-

ния о методике полевых и лабораторных работ приведены в [7, 8].

Обработка полученных данных включала в себя: оценивание статистических параметров, в том числе погрешностей определения среднего арифметического  $\delta_A$  и коэффициента корреляции  $\delta_r$  по формулам (1, 2); корреляционный и регрессионный анализ; проверку на однородность по среднему с использованием критерия Стьюдента  $K_S$  (3), по дисперсии – с помощью критерия Фишера  $K_F$  (4), на случайность – по критерию Питмена  $K_P$  (5) с использованием линейной модели тренда (6) при уровне значимости 5 %:

$$\delta_A \approx \frac{\sigma}{\sqrt{N}}, \quad (1)$$

$$\delta_r \geq 2 \frac{1-r_{xy}^2}{\sqrt{N-1}}, \quad (2)$$

$$K_S = \frac{|A_x - A_y|}{\sqrt{N_x D_x + N_y D_y}} \sqrt{\frac{N_x N_y (N_x + N_y - 2)}{N_x + N_y}}, \quad (3)$$

$$K_F = \frac{\max(D_x; D_y)}{\min(D_x; D_y)}, \quad (4)$$

$$K_P = k_1 \sqrt{\frac{D_t}{D_z}} \sqrt{\frac{N-2}{1-k_1 \sqrt{\frac{D_t}{D_z}}}}, \quad (5)$$

$$Z = k_1 t + k_2, \quad (6)$$

где  $N$ ,  $\sigma$  и  $D$  – объём, стандартное отклонение и дисперсия величины  $Z$ ;  $N_x$ ,  $N_y$ ,  $A_x$ ,  $A_y$ ,  $D_x$ ,  $D_y$  – объёмы, средние арифметические и дисперсии сравниваемых выборок  $x$  и  $y$ ;  $D_t$  – дисперсия временной координаты  $t$  (количество дней с 01.01.1900 г.);  $k_1$  и  $k_2$  – коэффициенты регрессии;  $r_{xy}$  – коэффициент корреляции между значениями  $x$  и  $y$ . Гипотеза об однородности сравниваемых выборок не отвергается, если фактические значения  $K_S$  и  $K_F$  меньше критических. Уравнение связи принимается удовлетворительным, если значения коэффициентов регрессии по модулю больше удвоенной погрешности их определения, а квадрат корреляционного отношения  $R^2$  больше 0,36 [16–18].

#### Результаты исследования и их обсуждение

В пределах рассматриваемого участка Васюганского болота по мере удаления от границы с заболоченным лесом выделяются три основные внутриболотные экосистемы: 1) мезотрофная окраина (полоса вдоль заболоченного леса шириной до 200 м со средней глубиной торфяной залежи около 1 м); 2) рям – олиготрофное сосново-сфагново-кустарничковое болото (на участке от 200 до 900 м от границы болота со средней глубиной торфяной залежи 2,8 м); ГМК – грядово-мочажинный комплекс (на участке от 900 до 1900 м от границы бо-

лота и леса со средней глубиной торфяной залежи 3 м). Болотные воды деятельного горизонта всех трёх экосистем по классификации О.А. Алёкина [19] – пресные с очень малой минерализацией, содержат значительное количество органических веществ и продуктов их трансформации (табл. 1).

Проверка на однородность по среднему и дисперсии показала, что, во-первых, болотные воды рьяма и ГМК в целом за многолетний период с 2003 по 2017 гг. сопоставимы между собой по минерализации, перманганатной окисляемости, содержанию  $\text{NH}_4^+$ , Si, Al, Cu, фосфатов, но статистически различаются по величине pH (табл. 1, 2). Также выявлены отличия болотных вод в рьяме и ГМК от мезотрофной окраины. Они, предположительно, связаны с большей изменчивостью минерализации и содержаний ряда элементов на границе леса и болота, которая, в свою очередь, определяется более значительными колебаниями уровней болотных вод. Например, в осенний период 2016 г. в районе ближайшей метеостанции Бакчар (в 36 км от исследуемого участка) выпало атмосферных осадков в среднем за сентябрь–ноябрь в количестве 24 мм/месяц при среднемноголетнем значении (за 1986–2016 гг.) 42 мм/месяц. Из-за недостаточного осеннего увлажнения в конце зимнего периода 2017 г. (21 марта) в мезотрофной окраине (50 м от границы болота) зафиксировано отсутствие гравитационных болотных вод при том, что уровень болотных вод в ГМК находился в диапазоне от 0,25 м (в мочажине – сразу под промерзшим слоем) до 0,35 м (в гряде), а в рьяме – в 0,37 м от поверхности.

Во-вторых, болотные воды даже мезотрофной окраины по химическому составу заметно ближе к снеготалым, а не к грунтовым водам, что свидетельствует о преобладании олиготрофизации торфяной залежи практически на всём исследуемом участке Васюганского болота. Статистический анализ показал, что минерализация вод наиболее обводнённых внутриболотных экосистем в целом возрастает с ростом атмосферного увлажнения (табл. 3) и, как следствие, некоторого увеличения водного стока. Причём наибольшее влияние этого фактора характерно для мезотрофной окраины, для которой получено уравнение связи (7):

$$\Sigma_{mi} = -0,354P + 0,022P^2; R^2 = 0,63, \quad (7)$$

где  $P$  – сумма атмосферных осадков на метеостанции Бакчар за месяц календарного года (мм/месяц), в котором проводился отбор пробы болотной воды. Для ГМК (с учётом проб воды и в гряде, и в мочажине) получена линейная зависимость (8), а для рьяма статистически значимое уравнение связи подобрать не удалось:

$$\Sigma_{mi} = 0,576P; R^2 = 0,47. \quad (8)$$

Следует отметить, что для рек обычно наблюдается обратная, чаще всего степенная зависимость между расходами и минерализацией воды [19]. Подобное несоответствие между речными и болотны-

ми водами объясняется, как показано в [20], тем, что общее описание связи между интенсивностью водообмена и минерализацией воды имеет вид (9), а между коэффициентами вариации гидрологических и гидрохимических показателей – вид (10):

$$Y = X^{k_3} \exp\left(\frac{k_4}{k_5}(X^{k_5} - 1)\right), \quad (9)$$

$$Cv_C \approx |k_3 + k_4| Cv_Q, \quad (10)$$

где  $k_0, k_1, k_2$  – эмпирические коэффициенты;  $Y=C/C_0$  и  $X=Q/Q_0$  – модульные коэффициенты концентрации и расхода воды;  $C_0$  и  $Q_0$  – математическое ожидание концентрации вещества и расхода воды;  $Cv_C$  и  $Cv_Q$  – коэффициенты вариации концентрации вещества и расхода воды. Для рек бассейна Оби большая часть наблюдений соответствует кривой спада по уравнению (9), а наиболее заметные изменения химического состава природных вод происходят на стадиях формирования склонового и подземного стока [20].

Судя по результатам корреляционного и регрессионного анализа с учётом данных о взаимосвязях атмосферных осадков и проточности болота [21], для болотных вод исследуемого участка Васюганья характерно именно увеличение минерализации болотных вод при повышении атмосферного увлажнения за счёт усиления выноса веществ из деятельного горизонта торфяной залежи до момента, когда резко увеличиваются проточность (сток в торфяной залежи за единицу времени через единицу длины контура стекания) и вклад ультрапресных снеготалых или дождевых вод. После этого следует ожидать некоторое уменьшение или стабилизацию минерализации болотных вод (в зависимости от особенностей пространственного распределения фильтрационных свойств торфяной залежи), причём в разных внутриболотных экосистемах влияние атмосферного увлажнения на химический состав болотных вод будет неодинаковым.

Отметим, что подобный механизм формирования химического состава болотных вод наблюдается не только на исследуемом участке Васюганского болота, но и в других болотных районах мира [22–24]. В целом наилучшая связь с атмосферным увлажнением характерна для внутриболотных экосистем с топяным подтипом торфяной залежи и максимальной однородностью микроландшафта, наихудшая – для лесного подтипа торфяной залежи (рьям), что, видимо, объясняется более значительным биогенным регулированием за счёт транспирации и большей контрастности фильтрационных свойств в корневом слое в лесном фитоценозе.

Гидрохимические наблюдения на болотах весьма трудоёмки. Как следствие, количество проб болотных вод обычно незначительно, а их отбор часто проводится неравномерно в течение года. В связи с этим указанные выше особенности фор-

**Таблица 1.** Средние значения гидрохимических показателей болотных, снеготалых и подземных вод в восточной части Васюганского болота

**Table 1.** Average values of hydrochemical parameters of mire, snow and ground waters in east part of the Vasyugan mire

| Показатель<br>Index                                      | Объект<br>Object      | Весеннее половодье<br>Spring flood | Летне-осенняя межень<br>Summer-autumn low water | Зимняя межень<br>Winter low water | Год<br>Year  |
|----------------------------------------------------------|-----------------------|------------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------|--------------|
| рН, единицы<br>pH/Units                                  | МО/MSOB*              | 3,89±0,12                          | 4,70±0,46                                       | 4,02±0,33                         | 4,24±0,22    |
|                                                          | Рям/гуам              | 3,95±0,13                          | 4,49±0,32                                       | 4,28±0,19                         | 4,31±0,15    |
|                                                          | ГМК/HRC               | –                                  | 5,25±0,59                                       | 4,73±0,18                         | 4,89±0,21    |
|                                                          | Снег/snow             | –                                  | –                                               | 7,04±0,26                         | 7,04±0,26    |
|                                                          | Скважина 110р/HW 110р | 7,24±0,16                          | 7,20±0,11                                       | 7,14±0,17                         | 7,19±0,08    |
| $\Sigma_{ми}$ , мг/дм <sup>3</sup><br>mg/dm <sup>3</sup> | МО/MSOB*              | 16,3±10,3                          | 31,5±14,3                                       | 19,7±5,80                         | 22,8±5,80    |
|                                                          | Рям/гуам              | 21,8±9,6                           | 20,8±4,8                                        | 19,4±3,4                          | 20,3±2,7     |
|                                                          | ГМК/HRC               | –                                  | 30,5±3,0                                        | 22,3±5,3                          | 24,8±3,9     |
|                                                          | Снег/snow             | –                                  | –                                               | 17,6±3,8                          | 17,6±3,8     |
|                                                          | Скважина 110р/HW 110р | 348,7±29,9                         | 324,5±13,8                                      | 343,1±22,1                        | 335,6±11,4   |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , –/–/–                     | МО/MSOB*              | 2,870±0,639                        | 4,428±1,285                                     | 5,692±1,552                       | 4,932±0,848  |
|                                                          | Рям/гуам              | 4,328±1,360                        | 3,695±1,721                                     | 4,625±1,107                       | 4,197±0,820  |
|                                                          | ГМК/HRC               | –                                  | 1,393±0,078                                     | 3,022±1,437                       | 2,534±1,013  |
|                                                          | Снег/snow             | –                                  | –                                               | 0,772±0,536                       | 0,772±0,536  |
|                                                          | Скважина 110р/HW 110р | 0,928±0,213                        | 0,472±0,094                                     | 1,328±0,545                       | 0,833±0,182  |
| P*, –/–/–                                                | МО/MSOB*              | 0,017±0,015                        | 0,020±0,008                                     | 0,083±0,053                       | 0,055±0,028  |
|                                                          | Рям/гуам              | 0,019±0,011                        | 0,032±0,016                                     | 0,083±0,025                       | 0,067±0,019  |
|                                                          | ГМК/HRC               | –                                  | 0,018±0,011                                     | 0,092±0,038                       | 0,070±0,028  |
|                                                          | Снег/snow             | –                                  | –                                               | 0,018±0,017                       | 0,018±0,017  |
|                                                          | Скважина 110р/HW 110р | –                                  | –                                               | –                                 | –            |
| Si, –/–/–                                                | МО/MSOB*              | 1,61±1,23                          | 2,82±0,36                                       | 5,62±0,99                         | 4,14±0,63    |
|                                                          | Рям/гуам              | 3,89±3,15                          | 2,61±0,66                                       | 3,57±0,36                         | 3,37±0,39    |
|                                                          | ГМК/HRC               | –                                  | 2,33±0,77                                       | 2,86±0,45                         | 2,70±0,37    |
|                                                          | Снег/snow             | –                                  | –                                               | 0,05±0,02                         | 0,05±0,02    |
|                                                          | Скважина 110р/HW 110р | 4,17±1,27                          | 2,33±1,27                                       | 2,75±1,27                         | 2,90±1,27    |
| Fe, –/–/–                                                | МО/MSOB*              | 1,317±0,509                        | 2,431±0,628                                     | 2,551±0,442                       | 2,367±0,312  |
|                                                          | Рям/гуам              | 2,003±0,510                        | 2,096±0,347                                     | 1,759±0,274                       | 1,810±0,199  |
|                                                          | ГМК/HRC               | –                                  | 2,310±0,270                                     | 1,328±0,244                       | 1,622±0,235  |
|                                                          | Снег/snow             | –                                  | –                                               | 0,018±0,005                       | 0,018±0,005  |
|                                                          | Скважина 110р/HW 110р | 1,907±0,749                        | 3,13±0,797                                      | 3,538±0,889                       | 2,944±0,488  |
| Al, мкг/дм <sup>3</sup><br>mkg/dm <sup>3</sup>           | МО/MSOB*              | –                                  | 294,9±102,1                                     | 750,4±352,0                       | 627,6±286,2  |
|                                                          | Рям/гуам              | –                                  | 236,2±105,8                                     | 537,6±99,8                        | 494,5±90,6   |
|                                                          | ГМК/HRC               | –                                  | 284,8±20,7                                      | 762,3±222,0                       | 656,2±183,5  |
|                                                          | Снег/snow             | –                                  | –                                               | 15,7±5,8                          | 15,7±5,8     |
|                                                          | Скважина 110р/HW 110р | –                                  | –                                               | –                                 | –            |
| Cu, то же<br>(the same)                                  | МО/MSOB*              | –                                  | 1,1±0,4                                         | 3,7±0,8                           | 2,6±0,6      |
|                                                          | Рям/гуам              | –                                  | 2,9±0,9                                         | 4,8±1,1                           | 4,2±0,8      |
|                                                          | ГМК/HRC               | –                                  | 1,5±0,3                                         | 3,7±1,0                           | 3,1±0,7      |
|                                                          | Снег/snow             | –                                  | –                                               | 1,1±0,2                           | 1,1±0,2      |
|                                                          | Скважина 110р/HW 110р | –                                  | –                                               | –                                 | –            |
| Zn, –/–/–                                                | МО/MSOB*              | –                                  | 17,3±7,0                                        | 53,7±16,8                         | 36,2±11,0    |
|                                                          | Рям/гуам              | –                                  | 21,2±2,5                                        | 37,8±6,7                          | 31,7±5,4     |
|                                                          | ГМК/HRC               | –                                  | 17,2±3,7                                        | 69,0±25,8                         | 53,5±19,4    |
|                                                          | Снег/snow             | –                                  | –                                               | 8,5±2,1                           | 8,5±2,1      |
|                                                          | Скважина 110р/HW 110р | –                                  | –                                               | –                                 | –            |
| ПО, мгО/дм <sup>3</sup><br>PO, mgO/dm <sup>3</sup>       | МО/MSOB*              | 48,87±3,90                         | 102,51±21,43                                    | 96,58±10,69                       | 93,07±9,66   |
|                                                          | Рям/гуам              | 88,20±4,56                         | 97,59±14,88                                     | 100,74±5,95                       | 96,48±4,83   |
|                                                          | ГМК/HRC               | –                                  | 136,11±54,11                                    | 92,86±6,61                        | 105,84±16,10 |
|                                                          | Снег/snow             | –                                  | –                                               | 0,69±0,07                         | 0,69±0,07    |
|                                                          | Скважина 110р/HW 110р | 3,59±0,42                          | 3,04±0,25                                       | 3,47±0,39                         | 3,29±0,19    |

Примечание: прочерк означает отсутствие данных или количество проб менее трёх; МО – мезотрофная окраина болота; рям – сосново-сфагново-кустарничковое болото; ГМК – грядово-мочажинный комплекс; скважина 110р – режимная скважина для наблюдений за составом подземных вод у с. Бакчар;  $\Sigma_{ми}$  – сумма главных ионов ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ); P\* – фосфор фосфатов; ПО – перманганатная окисляемость.

Note: «–» means absence of the data or quantity of samples less than three; MSOB is the mesotrophic border of an oligotrophic bog; ryam (Russian) is the oligotrophic, pine-dwarf-shrub-sphagnum raised bog; HRC is the hollow-ridge complex – mire type which combines low elongated ridges and hollows between them; HW 110p is the regime hydrogeological well 110p near the Bakchar settlement;  $\Sigma_{ми}$  is the sum of concentration of the main ions ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ); P\* is the phosphorus of phosphates; PO is the permanganate oxidability (chemical oxygen consumption with potassium permanganate/permanganate index).

**Таблица 2.** Результаты статистического анализа данных о составе снеготалых, подземных и болотных вод

**Table 2.** Results of the statistical analysis of data on composition of snow, ground and mire waters

| Сравниваемые объекты/Compared objects |                   | Показатель/Index | pH   | $\Sigma_{mi}$ | $NH_4^+$ | P*   | Si    | Fe    | Al    | Cu   | Zn   | ПО/ПО |
|---------------------------------------|-------------------|------------------|------|---------------|----------|------|-------|-------|-------|------|------|-------|
| МО/MSOV                               | Рям/Ryam          | $K_S/K_{S,5\%}$  | 0,13 | 0,19          | 0,30     | 0,17 | 0,51  | 0,73  | 0,23  | 0,71 | 0,18 | 0,06  |
|                                       |                   | $K_F/K_{F,5\%}$  | 0,87 | 1,73          | 0,41     | 0,77 | 0,92  | 0,95  | 2,35  | 0,67 | 1,04 | 0,36  |
|                                       | ГМК/HRC           | $K_S/K_{S,5\%}$  | 0,87 | 0,11          | 0,81     | 0,16 | 0,76  | 0,75  | 0,04  | 0,22 | 0,36 | 0,09  |
|                                       |                   | $K_F/K_{F,5\%}$  | 0,60 | 1,20          | 0,38     | 0,45 | 1,36  | 0,95  | 0,67  | 0,42 | 0,75 | 0,76  |
|                                       | Скв. 110р/HW 110р | $K_S/K_{S,5\%}$  | 7,73 | 7,87          | 3,55     | –    | 0,35  | 0,34  | –     | –    | –    | 11,10 |
|                                       |                   | $K_F/K_{F,5\%}$  | 1,23 | 5,07          | 3,42     | –    | 2,72  | 3,06  | –     | –    | –    | 197,5 |
|                                       | Снег/Snow         | $K_S/K_{S,5\%}$  | 2,20 | 0,16          | 0,87     | 0,24 | 1,21  | 1,34  | 0,49  | 0,61 | 0,56 | 1,79  |
|                                       |                   | $K_F/K_{F,5\%}$  | 0,13 | 0,39          | 0,42     | 0,41 | 208,9 | 583,5 | 214,5 | 0,53 | 2,66 | 103,0 |
| Рям/Ryam                              | ГМК/HRC           | $K_S/K_{S,5\%}$  | 1,05 | 0,44          | 0,57     | 0,03 | 0,52  | 0,27  | 0,40  | 0,46 | 0,55 | 0,03  |
|                                       |                   | $K_F/K_{F,5\%}$  | 0,28 | 0,28          | 0,38     | 0,41 | 0,58  | 0,41  | 0,78  | 0,39 | 2,89 | 0,68  |
|                                       | Скв. 110р/HW 110р | $K_S/K_{S,5\%}$  | 4,24 | 37,79         | 0,37     | –    | 0,19  | 0,89  | –     | –    | –    | 2,25  |
|                                       |                   | $K_F/K_{F,5\%}$  | 0,57 | 22,26         | 3,39     | –    | 6,74  | 7,34  | –     | –    | –    | 176,7 |
|                                       | Снег/Snow         | $K_S/K_{S,5\%}$  | 3,12 | 0,17          | 0,73     | 0,47 | 1,52  | 1,58  | 1,08  | 0,81 | 0,90 | 1,86  |
|                                       |                   | $K_F/K_{F,5\%}$  | 0,06 | 0,09          | 0,42     | 0,19 | 88,09 | 248,7 | 28,55 | 1,28 | 0,76 | 92,12 |
|                                       | Скв. 110р/HW 110р | $K_S/K_{S,5\%}$  | 5,17 | 5,57          | 1,38     | –    | 0,04  | 0,56  | –     | –    | –    | 19,73 |
|                                       |                   | $K_F/K_{F,5\%}$  | 0,47 | 14,68         | 2,05     | –    | 9,68  | 7,10  | –     | –    | –    | 47,47 |
| ГМК/HRC                               | Снег/Snow         | $K_S/K_{S,5\%}$  | 2,17 | 0,40          | 0,39     | 0,41 | 1,62  | 1,56  | 0,83  | 0,61 | 0,53 | 2,91  |
|                                       |                   | $K_F/K_{F,5\%}$  | 0,06 | 0,09          | 0,30     | 0,24 | 41,31 | 166,2 | 75,41 | 0,85 | 7,54 | 30,15 |

Примечание:  $K_S/K_{S,5\%}$  и  $K_F/K_{F,5\%}$  – отношение фактического и критического значений (при уровне значимости 5 %) критериев Стьюдента и Фишера; остальные обозначения приведены в примечании к табл. 1.

Note:  $K_S/K_{S,5\%}$  and  $K_F/K_{F,5\%}$  are the ratios of actual and critical values (at a significance value of 5 %) of Student and Fisher criteria; other designations are resulted in the note in table 1.

мирования гидрохимического режима болота необходимо учитывать при анализе многолетних изменений химического состава болотных вод деятельного горизонта внутриболотных экосистем. Так, анализ на однородность данных гидрохимических наблюдений на исследуемом участке Васюганского болота за 2003–2017 гг. позволил выявить статистически значимое уменьшение дисперсии суммарного содержания главных ионов ( $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $HCO_3^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $Cl^-$ ) в водах мезотрофной окраины (рис. 2). Однако отбор проб с наиболее высокими содержаниями растворённых солей в 2003 и 2006 гг. проводился в месяцы с повышенным атмосферным увлажнением, а проверка данных метеонаблюдений на метеостанции Бакчар за 1965–2016 гг. не позволила выявить нарушений однородности годовых сумм атмосферных осадков. Таким образом, пока нет достоверных оснований для утверждения о существенном изменении основных гидрохимических показателей болотных вод на исследуемом участке в течение 2003–2017 гг.

Внутри года минимальные значения многих гидрохимических показателей достаточно часто приурочены к периоду весеннего половодья, когда состав болотных вод наиболее близок к составу талых вод, а максимальные – как к зимней, так и летней межени (табл. 1). В первом случае ключевую роль играет разбавление болотных вод снеготалыми. В последнем же случае, видимо, следует обращать больше внимания на приуроченность пробоотбора к стадии вегетативного цикла. В частности, имеющиеся материалы позволяют предположить, что повышенные концентрации  $NH_4^+$ , Si и

фосфатов в зимнюю межень связаны, скорее всего, с разложением остатков макро- и микрофлоры [7, 23]. В то же время при изучении внутригодового распределения гидрохимических показателей болотных вод необходимо учитывать удалённость от суходола, определяющую в общих чертах приток минеральных веществ. Последние подвергаются воздействию кислых болотных вод, что в ряде случаев приводит к повышению в болотных водах валовых содержаний химических элементов и их растворённых форм [24–31].

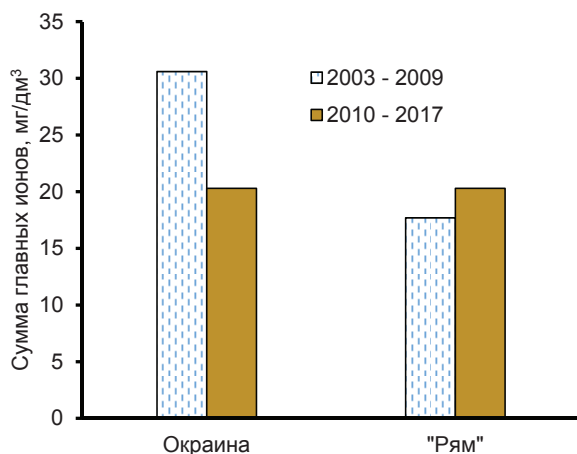
**Таблица 3.** Статистически значимые коэффициенты корреляции между гидрохимическими показателями болотных вод и месячными значениями атмосферного увлажнения по данным метеостанции Бакчар

**Table 3.** Statistically significant factors of correlation between hydrochemical parameters of bog waters and monthly values of atmospheric humidifying according to the Bakchar meteorological station

| Экосистема<br>Ecosystem     | Гидрохимические показатели/Indexes |               |          |    |       |
|-----------------------------|------------------------------------|---------------|----------|----|-------|
|                             | pH                                 | $\Sigma_{mi}$ | $NH_4^+$ | Fe | ПО/ПО |
| Мезотрофная окраина<br>MSOV | 0,64                               | 0,71          | –0,44    | –  | 0,45  |
| Рям/Ryam                    | 0,38                               | 0,43          | –0,47    | –  | –     |
| ГМК/HRC                     | –                                  | 0,70          | –        | –  | 0,65  |

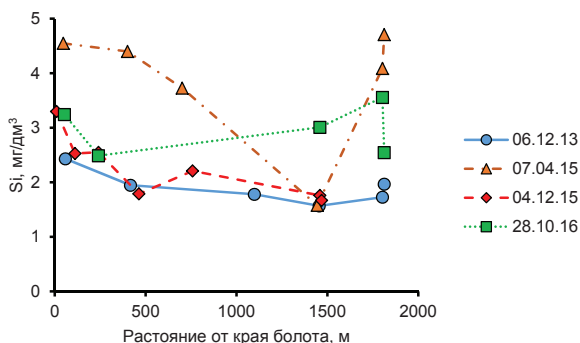
Дальнейшее перераспределение химических элементов во внутриболотных экосистемах связано с особенностями фильтрационного потока в торфяной залежи. В частности, изменение концентраций кремния в болотных водах деятельного слоя на исследуемом участке Васюганского болота может объясняться, с одной стороны, выщелачи-

ванием первичных и трансформаций вторичных алюмосиликатов и ряда других минералов, содержащихся в частицах, поступающих в болото из атмосферного воздуха [23, 31] и с водным стоком с суши дола на окраину болота. Косвенным подтверждением этого предположения является, например, разная степень насыщения болотных вод относительно кварца в весенний период в ряме и мезотрофной окраине (рис. 3, 4). В этот период в ряме основным источником кремния с большой вероятностью является атмосферный аэрозоль, а в мезотрофной окраине – атмосферный аэрозоль и приток с суши дола. Но в последнем случае содержание кремния в среднем меньше, чем в ряме, а воды ненасыщены относительно целого ряда минералов, включая кварц (относительно которого болотные воды обычно несколько перенасыщены или близки к равновесию; рис. 4). С другой стороны, в результате достаточно резкого изменения фильтрационных свойств и биогенного потребления происходит накопление кремния в ГМК.



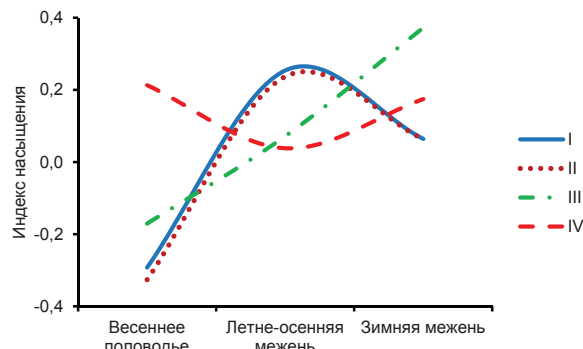
**Рис. 2.** Изменение средних значений суммы главных ионов в болотных водах исследуемого участка Васюганского болота (в мезотрофной окраине  $K_f/K_{f.5} \% = 1,3$ )

**Fig. 2.** Change of average values of the sum of the main ions concentrations in mire waters of the researched site of the Vasyugan mire (mesotrophic border;  $K_f/K_{f.5} \% = 1,3$ )



**Рис. 3.** Изменение концентраций Si в болотных водах 06.12.2013 г., 07.04.2015 г., 04.12.2015 г., 28.10.2016 г.

**Fig. 3.** Change of Si concentration in mire waters at 06.12.2013, 07.04.2015, 04.12.2015, 28.10.2016



**Рис. 4.** Внутригодовое изменение среднесезонных индексов насыщения болотных вод относительно соединений кальция и гуминовых кислот ( $CaГК = Ca^{2+} + ГК$ ) и кварца ( $SiO_2 + 2H_2O = H_4SiO_4^0$ ): I – CaГК, мезотрофная окраина; II – CaГК, рям; III –  $SiO_2$ , мезотрофная окраина; IV –  $SiO_2$ , рям

**Fig. 4.** Intra-annual change of average indexes of saturation of marsh waters concerning connections of calcium and humic acids ( $CaГК = Ca^{2+} + ГК$ ) and quartz ( $SiO_2 + 2H_2O = H_4SiO_4^0$ ): I – CaГК, mesotrophic border; II – CaГК, ryam; III –  $SiO_2$ , mesotrophic border; IV –  $SiO_2$ , ryam

Определённую роль в формировании уровней содержания ряда металлов, возможно, играет и гуматный барьер [32], способствующий выведению из раствора их соединений с гуминовыми кислотами во всех изученных внутриболотных экосистемах в межень, особенно в летне-осеннюю, когда (предположительно, в результате разложения растительных остатков) болотные воды становятся перенасыщенными относительно ряда органо-минеральных соединений (рис. 4).

#### Закключение

Анализ данных многолетних гидрохимических наблюдений на водораздельном участке Васюганского болота в районе села Полынянка (Томская область) показал, что, во-первых, в течение 2003–2017 гг. статистически значимые однонаправленные изменения химического состава болотных вод в деятельном горизонте торфяной залежи отсутствуют. Наблюдаемые колебания гидрохимических показателей обусловлены изменчивостью атмосферного увлажнения, которое в годовом разрезе периода 1965–2016 гг. остаётся статистически постоянным.

Во-вторых, в структуре исследуемого участка Васюганского болота выделяются три основных внутриболотных экосистемы – мезотрофная окраина, рям и ГМК. Гидрохимический режим мезотрофной окраины отличается наибольшими изменчивостью минерализации болотных вод и зависимостью от величины атмосферного увлажнения, а гидрохимический режим рья характеризуется наименьшим влиянием атмосферного увлажнения. Общими чертами гидрохимического режима всех трёх экосистем является определённое уменьшение минерализации в период весеннего половодья и увеличение соединений азота, фосфора, кремния и микроэлементов в зимнюю межень.

В-третьих, характер внутригодового распределения гидрохимических показателей определяется совместным влиянием водного режима, биохимических процессов и, предположительно, наличием гуматного барьера. Водный режим исследуемого участка, в пределах которого преобладает олиготрофизация болота, определяется преимущественно жидкими атмосферными осадками и снеготаянием. Биохимические процессы определяют перераспределение в болотных водах в зависимости от стадии вегетационного цикла содержания органических и биогенных веществ. Органические вещества образуют с металлами как коллоидные

комплексы, накапливающиеся в водной среде в отсутствие значимого стока, так и малорастворимые соединения [26, 28]. Это потенциально может способствовать ограничению роста минерализации болотных вод даже в условиях сильной их ненасыщенности относительно веществ, поступающих в болото с атмосферным аэрозолем, при минерализации растительных остатков или с водопритоканом из заболоченного леса на мезотрофную окраину.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 17-05-00042 и Томского политехнического университета (проект ВИУ\_VAF\_144\_2014).*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нейштадт М.И. Болота Обь-Иртышского междуречья // Природные условия освоения междуречья Обь-Иртыш / отв. ред. М.И. Нейштадт, Г.Д. Рихтер. – М.: АН СССР, Институт географии, 1972. – С. 322–346.
2. Пологова Н.Н., Лапшина Е.Д. Накопление углерода в торфяных залежах Большого Васюганского болота // Большое Васюганское болото. Современное состояние и процессы развития / под ред. М.В. Кабанова. – Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2002. – С. 174–179.
3. Eurasian Mires of the Southern Taiga Belt: Modern Features and Response to Holocene Palaeoclimate / T. Minayeva, W. Bleuten, A. Sirin, E.D. Lapshina // Wetlands and Natural Resource Management. Ecological Studies. V. 190 / Eds. J.T.A. Verhoeven, B. Beltman, R. Bobbink, D.F. Whigham. – Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2006. – P. 315–341.
4. Болотные системы Западной Сибири и их природоохранное значение / О.Л. Лисс, Л.И. Абрамова, Н.А. Аветов, Н.А. Березина, Л.И. Инишева, Т.В. Курнишкова, З.А. Слук, Т.Ю. Толпышева, Н.К. Шведчикова / под ред. В.Б. Куваева. – Тула: Гриф и К°, 2001. – 584 с.
5. Васюганское болото (природные условия, структура и функционирование) / Л.И. Инишева, А.А. Земцов, О.Л. Лисс, С.М. Новиков, Н.Г. Инишев / под ред. Л.И. Инишевой. – Томск: ЦНТИ, 2003. – 212 с.
6. Great Vasyugan Mire: landscape structure and peat deposit structure features / A.E. Berezin, V.A. Bazanov, A.A. Skugarev, T.A. Rybina, N.V. Parshina // International Journal of Environmental Studies. – 2014. – V. 71. – № 5. – P. 618–623. URL: <http://dx.doi.org/10.1080/00207233.2014.942537> (дата обращения 14.10.2017).
7. Гидрогеохимические условия формирования олиготрофных болотных экосистем / О.Г. Савичев, А.К. Мазуров, И.П. Семилетов, В.А. Базанов, Н.В. Гусева, А.А. Хвощевская, Н.Г. Наливайко // Известия РАН. Серия географическая. – 2016. – № 5. – С. 60–69. URL: <http://dx.doi.org/10.15356/0373-2444-2016-5-60-69> (дата обращения 03.11.2017).
8. Eckstein Y., Savichev O.G., Pasechnik E.Yu. Two decades of trends in ground water chemical composition in The Great Vasyugan Mire, Western Siberia, Russia // Environmental Earth Sciences. – 2015. – № 1. – P. 3–15. DOI: 10.1007/s12665-014-3908-z.
9. Среднее содержание некоторых элементов-примесей в торфах юго-восточной части Западно-Сибирской плиты / С.И. Арбузов, В.С. Архипов, В.К. Бернатонис, В.А. Бобров, С.Г. Маслов, А.М. Межибор, Ю.И. Прейс, Л.П. Рихванов, А.Ф. Судыко, А.И. Сысо // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 315. – № 1. – С. 44–48.
10. Оценка потоков минерального вещества по свойствам торфяных отложений Бакчарского болота (южная тайга Западной Сибири) / Ю.И. Прейс, В.А. Бобров, В.В. Будашкина, В.М. Гавшин // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 316. – № 1. – С. 43–47.
11. Veretennikova E.E. Lead in the natural peat cores of ridge-hollow complex in the taiga zone of West Siberia // Ecological Engineering. – 2015. – V. 80. – P. 100–107.
12. Modes of occurrence of rare earth elements in peat from Western Siberia / S.I. Arbuzov, S.G. Maslov, R.B. Finkelman, A.M. Mezhibor, S.S. Plenok, M.G. Blokhin, E.V. Peregudina // Journal of Geochemical Exploration. – 2017. – V. 10. – P. 1–22. URL: <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.10.012> (дата обращения 12.10.2017).
13. Храмов А.А., Валуцкий В.И. Лесные и болотные фитоценозы восточного Васюганья (структура и биологическая продуктивность) / отв. ред. А.В. Кумина. – Новосибирск: Наука. Сибирское отделение, 1977. – 222 с.
14. Бахнов В.К. Почвообразование. Взгляд в прошлое и настоящее. Биосферные аспекты. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. – 117 с.
15. Торфяные ресурсы Томской области и их использование / Л.И. Инишева, В.С. Архипов, С.Г. Маслов, Л.С. Михантьева. – Новосибирск: Сибирское отделение РАСХН, 1995. – 88 с.
16. Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models. P. I – A discussion of principles // Journal of Hydrology. – 1970. – № 10 (3). – P. 282–290.
17. Пособие по определению расчётных гидрологических характеристик / под ред. Т.С. Шмидта. – Л.: Гидрометеониздат, 1984. – 448 с.
18. Христофоров А.В. Надёжность расчётов речного стока. – М.: МГУ, 1993. – 168 с.
19. Алёкин О.А. Основы гидрохимии. – Л.: Гидрометеорологическое изд-во, 1970. – 444 с.
20. Савичев О.Г., Нгуен В.Л. О методике определения фоновых и аномальных значений гидрохимических показателей // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов – 2015. – Т. 326. – № 9. – С. 133–142.
21. Иванов К.Е. Водобмен в болотных ландшафтах. – Л.: Гидрометеониздат, 1975. – 280 с.
22. Prevost M. Streamflow, water quality and substrate conditions of a drained black spruce peatland, Quebec, Canada // International Peat Journal. – 1999. – V. 9. – P. 21–36.
23. Калужный И.Л. Общие черты формирования гидрохимического режима и химического состава вод эвтрофных болотных массивов // Водное хозяйство России. – 2016. – № 3. – С. 30–46.
24. Vegetation characteristics and eco-hydrological processes in a pristine mire in the Ob River valley (Western Siberia) / A.M. Schipper, R. Zeefat, F. Tanneberger, J.P. van Zuidam, W. Hahne, S.A. Schep, S. Loos, W. Bleuten, H. Joosten, E.D. Lapshina, M.J. Wassen // Plant Ecol. – 2007. – V. 12. – P. 1–15. DOI: 10.1007/s11258-006-9253-x.

25. Крайнов С.Р., Рыженко Б.Н., Швец В.М. Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты / отв. ред Н.П. Лавёров. – М.: Наука, 2004. – 677 с.
26. Геологическая эволюция и самоорганизация системы вода – порода: в 5 т. Т. 2. Система вода–порода в условиях зоны гипергенеза / С.Л. Шварцев, Б.Н. Рыженко, В.А. Алексеев, Е.М. Дутова, И.А. Кондратьева, Ю.Г. Копылова, О.Е. Лепокурова / отв. ред. Б.Н. Рыженко. – Новосибирск: СО РАН, 2007. – 389 с.
27. Мотузова Н.В. Соединения микроэлементов в почвах. Системная организация, экологическое значение, мониторинг. – М.: ЛИБРОКОМ, 2013. – 168 с.
28. Авессаломова И.А., Дьяконов К.Н., Савенко А.В. Геохимические ловушки на пути аниогенных элементов (на примере таёжных ландшафтов Восточно-Европейской равнины) // Вестник Моск. ун-та. Сер. 5. География. – 2012. – № 1. – С. 29–35.
29. Ecohdrological analysis of a groundwater influenced blanket bog: occurrence of *Schoenus nigricans* in Roundstone Bog, Connemara, Ireland / A.P. Grootjans, G. Hensgens, R. Hogenboom, B. Aarts, J. Manschot, J.G.M. Roelofs // Mires and Peat. – 2016. – V. 18 (10). – P. 1–13.
30. Hydrological landscape settings of base-rich fen mires and fen meadows: an overview / A.P. Grootjans, E.B. Adema, W. Bleuten, H. Joosten, M. Madaras, M. Janáková // Applied Vegetation Science. – 2006. – V. 9. – P. 175–184.
31. Shotyk W. Peat bog archives of atmospheric metal deposition: geochemical evaluation of peat profiles, natural variations in metal concentration, and metal enrichment factors // Environmental Reviews. – 1996. – V. 4. – P. 149–183.
32. Ephraim J.H., Allard B. Metal Ion Binding by Humic Substances // Modelling in Aquatic Chemistry / Eds. I. Grenthe, I. Puigdomenech. – Paris, France: OECD, Nuclear Energy Agency, 1997. – P. 207–244.

*Поступила 13.12.2017 г.*

#### **Информация об авторах**

**Савичев О.Г.**, доктор географических наук, профессор Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Мазуров А.К.**, доктор геолого-минералогических наук, первый проректор, профессор Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 550.46

## CHANGES OF CHEMICAL COMPOSITION OF WATERS IN EAST PART OF THE VASYUGAN MIRE (WESTERN SIBERIA)

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

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

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

**Relevance.** Studies of changes in chemical composition of mire waters is the important part of research of environment and climate changes at ecological monitoring at oil and gas exploration, limitation of anthropogenous influences on water objects and efficiency of estimation of contaminated lands reclamation.

**The aim** of the research is to reveal the long-term and intraannual changes of chemical composition of mire waters in east part of the Vasyugan mire.

**Methods:** landscape-geochemical and statistical methods, methods of definition of chemical composition of mire waters, thermodynamic calculations.

**Results and conclusions.** The authors have analyzed the time changes in chemical composition of waters of east part of the Vasyugan mire (the Western Siberia, the Ob river basin, the Tomsk region) within the limits of three intramire ecosystems (mesotrophic border of ryam; ryam (Russian) – oligotrophic pine-dwarf-shrub-sphagnum raised bog; hollow-ridge complex – mire type which combines ridges and hollows). It is shown that for 2003–2017 there were no statistically significant changes of chemical composition of mire waters in active horizon of a peat deposit. Observable fluctuations of hydrochemical parameters are caused by variability of atmospheric humidity which remains statistically constant in an annual section of the period of 1965–2016. Hydrochemical regime of mesotrophic border differs in the highest variability of total dissolved solids of mire waters and dependence on atmospheric precipitation value, and hydrochemical regime of ryam is characterized by the least influence of atmospheric precipitation. The common features of hydrochemical regime of all of three ecosystems is the certain reduction of mineralization during spring flood and increase in N-, P-, Si-substances and microelements in winter low water.

### Key words:

The Vasyugan mire, mire waters, chemical composition, long-term changes, intraannual changes.

The research was financially supported by the RFBR grants no. 17–05–00042 and 13–05–98045 and Tomsk Polytechnic University (project BNY\_VAF\_144\_2014).

### REFERENCES

1. Neyshtadt M.I. Bolota Ob-Irtyshskogo mezhdurechya [Bogs of the Ob-Irtysh interfluvial] *Prirodnye usloviya osvoeniya mezhdurechya Ob-Irtysh* [Natural conditions of the development interfluvies Ob and Irtysh]. Eds. M.I. Neyshtadt, G.D. Rihter. Moscow, Institut geografii AN SSSR Publ., 1972. pp. 322–346.
2. Pologova N.N., Lapshina E.D. Nakoplenie ugleroda v torfyanykh zalezakh Bolshogo Vasuganskogo bolota [Carbon accumulation in peat bog deposits of the Great Vasyugan]. *Bolshoe Vasuganskoe boloto. Sovremennoe sostoyanie i protsessy razvitiya* [Big Vasyugan bog. Current status and development]. Tomsk, Institute of Atmospheric Optics SB RAS Publ., 2002. pp. 174–179.
3. Minayeva T., Bleuten W., Sirin A., Lapshina E.D. Eurasian Mires of the Southern Taiga Belt: Modern Features and Response to Holocene Palaeoclimate. *Wetlands and Natural Resource Management. Ecological Studies*. Vol. 190. Eds. J.T.A. Verhoeven, B. Beltman, R. Bobbink, D.F. Whigham. Berlin Heidelberg, Springer-Verlag, 2006. pp. 315–341.
4. Liss O.L., Abramova L.I., Avetov N.A. *Bolotnye sistemy Zapadnoy Sibiri i ikh prirodookhrannoe znachenie* [Bog of Western Siberia and their conservation value]. Tula, Grif i K° Publ., 2001. 584 p.
5. Inisheva L.I., Zemtsov A.A., Liss O.L., Novikov S.M., Inishev N.G. *Vasyuganskoe boloto (prirodnye usloviya, struktura i funkcionirovaniye)* [The Vayugan mire (an environment, structure and functioning)]. Ed. by L.I. Inisheva. Tomsk, CSTI Publ., 2003. 212 p.
6. Berezin A.E., Bazanov V.A., Skugarev A.A., Rybina T.A., Parshina N.V. Great Vasyugan Mire: landscape structure and peat deposit structure features. *International Journal of Environmental Studies*, 2014, vol. 71, no. 5, pp. 618–623. Available at: <http://dx.doi.org/10.1080/00207233.2014.942537> (accessed 14 October 2017).
7. Savichev O.G., Mazurov A.K., Semiletov I.P., Bazanov V.A., Guseva N.V., Khvashchevskaya A.A., Nalivaiko N.G. Hydrogeochemical conditions of formation of oligotrophic bog ecosystems. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*, 2016, no. 5, pp. 60–69. Available at: <http://dx.doi.org/10.15356/0373-2444-2016-5-60-69> (accessed 03 November 2017). In Rus.
8. Eckstein Y., Savichev O.G., Pasechnik E.Yu. Two decades of trends in ground water chemical composition in The Great Vasyugan Mire, Western Siberia, Russia. *Environmental Earth Sciences*, 2015, no. 1, pp. 3–15. DOI: 10.1007/s12665-014-3908-z.
9. Arbuzov S.I., Arkhipov V.S., Bernatonis V.K., Bobrov V.A., Maslov S.G., Mezhibor A.M., Preis Yu.I., Rikhvanov L.P., Sudyko A.F., Syso A.I. Average content of several elements-admixtures in peats of south-east part of Western-Siberian plate. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2009, vol. 315, no. 1, pp. 44–48. In Rus.
10. Preiss Yu.I., Bobrov V.A., Budashkina V.V., Gavshin V.M. Estimation of streams of mineral substance on properties of peat sediments of the Bakchar mire (a southern taiga zone of the Western Siberia). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2010, vol. 316, no. 1, pp. 43–47. In Rus.

11. Veretennikova E.E. Lead in the natural peat cores of ridge-hollow complex in the taiga zone of West Siberia. *Ecological Engineering*, 2015, vol. 80, pp. 100–107.
12. Arbuzov S.I., Maslov S.G., Finkelman R.B., Mezhibor A.M., Ilenok S.S., Blokhin M.G., Peregudina E.V. Modes of occurrence of rare earth elements in peat from Western Siberia. *Journal of Geochemical Exploration*, 2017, no. 10, pp. 1–22. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.10.012> (accessed 12 October 2017).
13. Khranov A.A., Valucky V.I. *Lesnye i bolotnye fitotsenozy vostochnogo Vasyuganiya (struktura i biologicheskaya produktivnost')* [Forest and mire phytocenoses of east part of the Vasyugan mire (structure and biological efficiency). Ed. by A.V. Kuminov. Novosibirsk, Nauka Publ., 1977. 222 p.
14. Bakhnov V.K. *Pochvoobrazovanie. Vzgl'yad v proshloe i nastoyashchee. Biosfernye aspekty* [Soil formation. A view in the past and the present. Biospheric aspects]. Novosibirsk, Siberian Branch of the Russian Academy of Science Publ. house, 2002. 117 p.
15. Inisheva L.I., Arkhipov V.S., Maslov S.G., Mikhantjeva L.S. *Torfyanye resursy Tomskoy oblasti i ikh ispolzovanie* [Peat resources of Tomsk region and their use]. Novosibirsk, Siberian Branch of the Russian Academy of Agrarian Science Publ. house, 1995. 88 p.
16. Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models. P. I – A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 1970, no. 10 (3), pp. 282–290.
17. *Posobie po opredeleniyu rasschetnykh gidrologicheskikh kharakteristik* [Manual in definition of hydrological characteristics]. Ed. by T.S. Schmidt. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1984. 448 p.
18. Khristophorov A.V. *Nadezhnost' raschetov rechnogo stoka* [Reliability of calculations of a river flow]. Moscow, Moscow State University Publ., 1993. 168 p.
19. Alekin O.A. *Osnovy gidrokhimii* [Bases of hydrochemistry]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1970. 444 p.
20. Savichev O.G., Nguen V.L. The technique for determining background and extreme values of hydrogeochemical parameters. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2015, vol. 326, no. 9, pp. 133–142. In Rus.
21. Ivanov K.E. *Vodoobmen v bolotnykh landschaftakh* [Water exchange in mire landscapes]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1975. 280 p. In Rus.
22. Prevost M. Streamflow, water quality and substrate conditions of a drained black spruce peatland, Quebec, Canada. *International Peat Journal*, 1999, vol. 9, pp. 21–36.
23. Kalyuzhny I.L. The common features of formation of a hydrochemical regime and chemical composition of eutropic fen waters. *Vodnoe khozyaistvo Rossii*, 2016, no. 3, pp. 30–46. In Rus.
24. Schipper A.M., Zeefat R., Tanneberger F., Van Zuidam J.P., Hahne W., Schep S.A., Loos S., Bleuten W., Joosten H., Lapshina E.D., Wassen M.J. Vegetation characteristics and eco-hydrological processes in a pristine mire in the Ob River valley (Western Siberia). *Plant Ecol.*, 2007, no. 12, pp. 1–15. DOI: 10.1007/s11258-006-9253-x.
25. Kraynov S.R., Ryzhenko B.N., Shvets V.M. *Geokhimiya podzemnykh vod: teoreticheskie, prikladnye i ekologicheskie aspekty* [Geochemistry of ground waters: theoretical, applied and environmental aspects]. Moscow, Nauka Publ., 2004. 677 p. In Rus.
26. Shvartsev S.L., Ryzhenko B.N., Alekseev V.A., Dutova E.M., Kondratieva I.A., Kopylova Yu.G., Lepokurova O.E. *Geologicheskaya evolyutsiya i samoorganizatsiya sistemy voda–poroda. T. 1. Sistema voda–poroda v usloviyakh zony gipergeneza* [Geological evolution and self-organizing of water–rock system. V. 1. Water–rock system in conditions of a zone of active water exchange]. Ed. by B.N. Ryzhenko. Novosibirsk, Siberian Branch of the Russian Academy of Science Publ. house, 2007. 389 p.
27. Motuzova N.V. *Soedineniya mikroelementov v pochvakh. Sistemnaya organizatsiya, ekologicheskoe znachenie, monitoring* [Microelements in soils. System organization, ecological value, monitoring]. Moscow, LIBROCOM Publ., 2013. 168 p. In Rus.
28. Avesalomova I.A., Diakonov K.N., Savenko A.V. Geochemical traps on a path of anionogenous elements (by example of taiga landscapes of East European plain). *Vestnik Moskov. univer.*, 2012, no. 1, pp. 29–35. In Rus.
29. Grootjans A.P., Hensgens G., Hogenboom R., Aarts B., Manschot J., Roelofs J.G.M. Ecohydrological analysis of a groundwater influenced blanket bog: occurrence of *Schoenus nigricans* in Roundstone Bog, Connemara, Ireland. *Mires and Peat*, 2016, vol. 18 (10), pp. 1–13.
30. Grootjans A.P., Adema E.B., Bleuten W., Joosten H., Madaras M., Janáková M. Hydrological landscape settings of base-rich fen mires and fen meadows: an overview. *Applied Vegetation Science*, 2006, vol. 9, pp. 175–184.
31. Shotyk W. Peat bog archives of atmospheric metal deposition: geochemical evaluation of peat profiles, natural variations in metal concentration, and metal enrichment factors. *Environmental Reviews*, 1996, vol. 4, pp. 149–183.
32. Ephraim J.H., Allard B. Metal Ion Binding by Humic Substances. *Modelling in Aquatic Chemistry*. Eds. I. Grenthe, I. Puigdomenech. Paris, France, OECD, Nuclear Energy Agency, 1997. pp. 207–244.

Received: 13 December 2017.

#### Information about the authors

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

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

УДК 553.98(571)

## РЕКОНСТРУКЦИИ ГЕОТЕРМИЧЕСКОГО РЕЖИМА НЕФТЕМАТЕРИНСКОЙ КИТЕРБЮТСКОЙ СВИТЫ АРКТИЧЕСКОГО РЕГИОНА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ПАЛЕОКЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ

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

Прохорова Полина Николаевна<sup>1</sup>,  
prokhorova.polina1988@gmail.com

Стоцкий Виталий Валерьевич<sup>1</sup>,  
Stotskiy\_VV@sibmail.com

Фомин Александр Николаевич<sup>2</sup>,  
fominan@ipgg.sbras.ru

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

<sup>2</sup> Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,  
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Ак. Коптюга, 3.

**Актуальность.** Арктические районы Западной Сибири, ставшие приоритетным регионом изучения и поисков, имеют уникальные палеоклиматические особенности, инверсионную седиментацию в палеоген-неогене, значительные вариации характеристик нефтематеринских отложений. Это обуславливает необходимость совершенствовать схемы и определять параметры количественной оценки ресурсов углеводородов объемно-генетическим методом, основанным на палеореконструкциях геотермического режима материнских отложений.

**Цель исследования:** выявить и оценить влияние факторов палеоклимата – векового хода температур на земной поверхности и неоплейстоценовых толщ мерзлоты, ледниковых покровов – на расчетный геотермический режим нефтематеринской нижнеюрской китербютской свиты.

**Объект исследования:** китербютские отложения мезозойско-кайнозойского разреза, вскрытые глубокими скважинами на площадях Малоямальского, Арктического и Бованенковского месторождений (п-ов Ямал).

**Методика** исследования базируется на оригинальном компьютерном палеотемпературном моделировании, учитывающем параметры седиментационной истории и истории теплофизических свойств осадочной толщи, включающей вечномерзлые породы и ледники, и не требующем априорных сведений о величинах и природе глубинного теплового потока.

**Результаты** исследования на представительных мезозойско-кайнозойских разрезах месторождений, расположенных в южном, центральном и северном районах п-ва Ямал, позволили сделать выводы и дать рекомендации. Учет палеоклимата обуславливает наиболее точную термическую историю материнских отложений, увеличение расчетного палеотемпературного максимума в истории китербютских отложений на 5–18 °С. При определении ресурсов китербютских нефтей объемно-генетическим методом на землях арктического региона рекомендуется применять индивидуальный для территории «арктический» вековой ход температур и учитывать динамику толщи неоплейстоценовой мерзлоты мощностью 300–600 м. Отмечено незначительное влияние ледникового покрова на реконструкции термического режима китербютских отложений. В случае неучета мерзлоты и палеоклиматического хода температур расчетные ресурсы углеводородов могут быть занижены от 30 % до 3-х раз. Достоверность выводов уверенно контролируется геофизическим критерием «невязки», сопоставлением с экспериментальными данными о тепловом потоке на территории исследований, согласованностью с данными бурения и испытания скважин.

### Ключевые слова:

Палеоклимат, геотермический режим, нефтематеринские китербютские отложения, ресурсы, п-ов Ямал.

### Введение

Важнейшей задачей, стоящей перед нефтегазовой геологией и геофизикой, является изучение перспектив нефтегазоносности арктических районов Западной Сибири [1, 2].

Количественная оценка перспектив нефтегазоносности – оценка плотности ресурсов углеводородов, районирование территорий – выполняется объемно-генетическим методом (бассейновое моделирование). Количество генерированных углеводородов рассчитывается на основе реконструкции геотемпературного режима нефтематеринских отложений [2–9]. В зарубежной литературе – это

часть первая моделирования осадочных бассейнов и нефтегазовых систем, названная «basin modeling».

Регионы Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции имеют уникальные палеоклиматические особенности: 1) мезозойско-кайнозойский вековой ход температур, индивидуальный для региональных палеоклиматических зон; 2) разномасштабные процессы формирования и деградации неоплейстоценовых толщ вечномерзлых пород; 3) зонально и периодически формирующиеся позднечетвертичные ледниковые покровы. Похолодание в плейстоцене на земной поверхности, форми-

рование и деградация мощных толщ многолетне-мерзлых пород, ледниковых покровов могли приводить к снижению, существенной нестационарности температурного поля во всем осадочном разрезе [10].

В зарубежные программно-математические комплексы бассейнового моделирования PetroMod и Temis [11], применяемые для определения ресурсов углеводородов Приенисейской и Арктической областей Западной Сибири [2, 12], температуры на поверхности осадочной толщи включены как граничное условие. Здесь динамика векового хода температур формируется автоматически, в зависимости от географических координат территории исследований, с учетом только *теоретически* рассчитанной орбитальной солярной составляющей.

Известный отечественный комплекс бассейнового моделирования ГАЛО [13], используемый для моделирования термической истории осадочных бассейнов Западной Сибири и других нефтегазоносных провинций, тоже учитывает вековой ход температур на поверхности Земли. Применяемый здесь вековой ход температур, основанный на *экспериментальных* данных, можно условно назвать «стандартным», т. к. он применяется единообразно для разных региональных палеоклиматических зон Сибири.

В публикации Арктической экспедиции IODP 302 [14] приводятся результаты построения и анализа геотермической модели в пределах Хребта Ломоносова. Для учета палеоклиматического фактора авторами построен и применен «местный» (для района Хребта Ломоносова) вековой ход температур на земной поверхности, начиная со 100 млн лет назад. Для этого использовались *экспериментальные* данные – результаты палинологического анализа и изотопного анализа углерода органического вещества. Авторы публикации заключили, что эволюционирование температур на земной поверхности оказывает большое влияние на зрелость нефтематеринской породы: в зависимости от временных вариаций поверхностных температур могут быть большие или меньшие объемы получаемых УВ.

Недавно [15, 16] объектом исследований был геотермический режим нефтематеринской баженовской свиты ( $J_3 + K_1bg$ ), которая является основным источником формирования залежей углеводородов (УВ) в ловушках верхнеюрского и мелового нефтегазоносных комплексов (НГК). Результаты выполненных геотермических исследований на Ростовцевском, Средне-Ямальском и Арктическом месторождениях п-ва Ямал показали актуальность количественной оценки и учета роли мезозойско-кайнозойского климата и, в частности, установленного по *экспериментальным* данным «арктического» векового хода температур на земной поверхности, многолетнемерзлых пород неоплейстоцена и ледников в позднечетвертичное время. Учет палеоклимата дает увеличение расчетного палеотемпературного максимума в истории ма-

теринских отложений на 10–13 °С, обуславливает наиболее точную термическую историю материнских баженовских отложений, а следовательно, обеспечивает наибольшую расчетную плотность ресурсов генерированных нефтей. В случае неучета толщ вечной мерзлоты и палеоклиматического хода температур расчетные ресурсы УВ могут быть занижены до 40–50 %.

Вместе с тем представляет несомненный интерес для исследований геотермический режим китербютской свиты ( $J_{kt}$ ), временного аналога тогурской [15], являющейся источником формирования залежей УВ в ловушках нижнеюрского и, возможно, доюрского НГК. Глинистая толща китербютская, обладающая нефтематеринским потенциалом, формируется во времена бореальных трансгрессий в ранней юре – тоаре [17].

В отличие от южных и центральных районов Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции [18], баженовские отложения в арктическом регионе существенно варьируют как по концентрациям рассеянного органического вещества (РОВ), нередко уменьшаясь до 1–2 %, так и по типу РОВ, переходя к гумусово-сапропелевому типу. Тогда как РОВ китербютской свиты арктических районов имеет более стабильные концентрации (база данных ИНГ СО РАН).

*Основная цель исследования* – дальнейшая аргументация существенного влияния факторов палеоклимата на расчетный геотермический режим нефтематеринских свит, определяющий подсчет плотности ресурсов. Для этого выполнены палеотемпературные исследования китербютских отложений, вскрытых глубокими скважинами на Малоямальском, Арктическом и Бованенковском месторождениях п-ова Ямал.

#### О методике исследований

Для исследования применен метод палеотемпературного моделирования, основанный на численном решении уравнения теплопроводности горизонтально-слоистого твердого тела с подвижной верхней границей, реализованный в оригинальном программном обеспечении [19–21].

В математическую модель непосредственно включены: климатический вековой ход температур на земной поверхности, как краевое условие, и палеотемпературы из определений отражательной способности витринита (ОСВ), как «наблюдаемые». Краевое условие, определяемое температурой поверхности осадконакопления, задается в виде кусочно-линейной функции «арктического» векового хода температур на поверхности Земли [15]. Для перехода от ОСВ (в интервале  $R_{\text{от}}^0 = 0,5–0,8$  %) к соответствующей геотемпературе используется хорошо апробированный способ [22].

В модели палеотектонические реконструкции в строгой математической форме непосредственно сопряжены с палеотемпературными реконструкциями. Скорость осадконакопления может быть нулевой и отрицательной, что позволяет учиты-

вать перерывы осадконакопления и денудацию. Наличие перерывов в осадконакоплении и величины денудации выявляются путем многовариантных расчетов при различных сценариях тектоно-седиментационной истории и последующего выбора сценария, отвечающего критериям оптимальности и достоверности [23].

Параметрически осадочная толща описывается мощностями стратиграфических комплексов, для каждого из которых заданы теплопроводность, температуропроводность, плотность тепловыделения радиоактивных источников в породах и время осадконакопления. Формирование, существование, деградация толщи многолетнемерзлых пород и ледниковых покровов учитываются как своеобразные динамичные литолого-стратиграфические комплексы, обладающие аномально высокими значениями теплопроводности и температуропроводности [16].

*Объектом палеотемпературного моделирования является осадочный разрез представительной глубокой скважины.* Такие скважины выбраны по следующим критериям, выполняемым одновременно: 1) наличие замеров пластовых температур, используемых в качестве «наблюденных» для палеотемпературного моделирования; 2) наличие ощутимых притоков флюида при испытании пластов, что повышает достоверность пластовых температур; 3) наличие определений геотемператур по ОСВ.

Параметризация осадочного разреза, вскрытого скважиной, определяющая параметры седиментационной и теплофизической модели, принимается в соответствии со стратиграфической разбивкой скважины по «Каталогу литолого-стратиграфических разбивок скважин» (база данных ИНГТ СО РАН).

*Расчет палеотемператур состоит из двух этапов.* На первом по распределению температур, «наблюденных» в точках разреза скважины, рассчитывается тепловой поток через поверхность основания осадочного чехла, т. е. *решается обратная задача геотермии.* На втором этапе, с известным значением теплового потока, *решаются прямые задачи геотермии* – непосредственно рассчитываются температуры в заданных точках осадочной толщи (в том числе в материнских свитах) на заданные моменты геологического времени.

*Оценка плотности генерации нефтей материнской свитой* осуществляется следующим образом. Решение прямых задач геотермии для скважины выполняется на ключевые моменты геологического времени, соответствующие временам начала/завершения формирования каждой свиты, перекрывающей материнскую. Балансовая модель процессов нефтегазообразования [24] позволяет по геотемпературному критерию выполнить выделение и пространственно-временную идентификацию очагов интенсивного образования нефтей из РОВ материнских отложений: с 85 °С вхождение материнских пород в главную зону нефтеобразова-

ния (ГЗН) для аквагенного РОВ, с 95 °С – для террагенного РОВ.

Таким образом, для материнской свиты *рассчитывается интегральный показатель плотности генерации нефтей  $R$*  (в усл. ед.) [8]. Расчетное значение плотности генерации напрямую зависит от времени нахождения материнской свиты в ГЗН и от геотемператур ГЗН. Оценка плотности генерации выполняется в условных единицах, что является корректным для последующего сопоставления результатов вариантов моделирования.

*Основным критерием оптимальности результатов палеотемпературного моделирования* выступает оптимальная согласованность («невязка») максимума расчетных геотемператур с «наблюденными» температурами «максимального палеотермометра» – с температурами, определенными по ОСВ. В той же степени важна оптимальная «невязка» расчетных геотемператур с «наблюденными» пластовыми температурами. Оптимальная «невязка» – это средняя квадратичная разность расчетных и наблюдаемых значений, равная погрешности наблюдений [25–27]. Эта погрешность порядка  $\pm 2^\circ\text{C}$ .

*Важным критерием достоверности результатов палеотемпературного моделирования* является согласованность расчетных значений плотности теплового потока с данными *экспериментального* определения плотности теплового потока на территории исследований [28].

*В качестве критерия достоверности результатов моделирования и расчетов* плотности генерации принята степень согласованности очагов интенсивной генерации УВ, выделяемых по геотемпературному критерию в материнских свитах, с установленной геологоразведкой нефтегазоносностью недр [29].

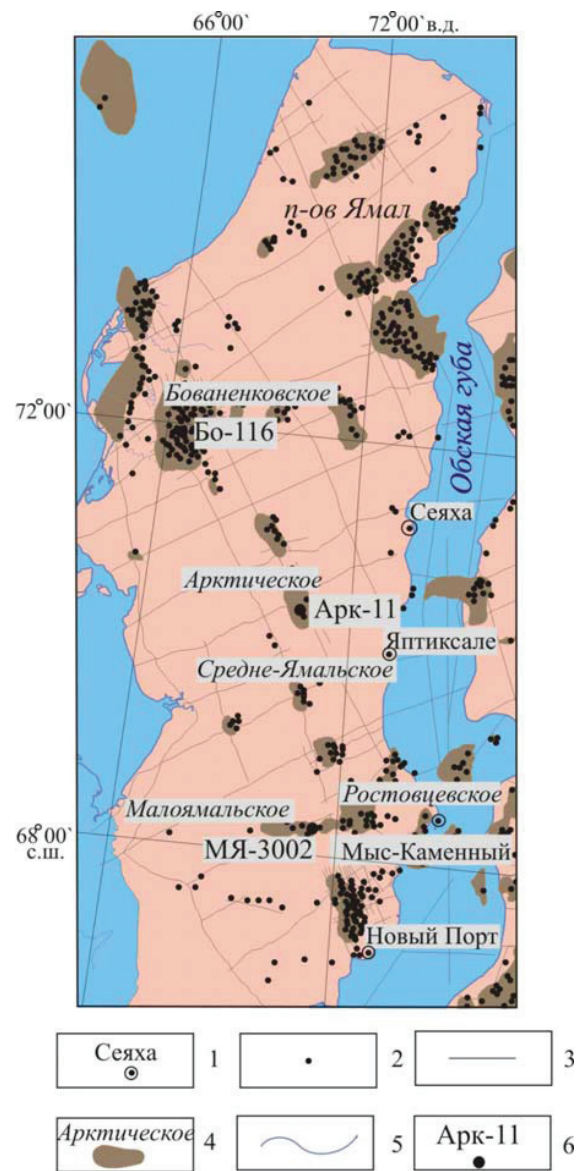
Обратная задача решается в условиях квазипостоянства значения плотности теплового потока из основания осадочного чехла Западной Сибири начиная с юрского времени [10, 30]. Поэтому неизвестный геодинамический параметр – значение плотности теплового потока – для принятой модели определяется однозначно.

Решение обратной задачи выполняется в рамках параметрического описания седиментационной истории и истории теплофизических свойств только осадочной толщи, без привлечения сведений о геодинамике ниже основания осадочного разреза. Вместе с тем общеизвестна сложность и неоднозначность определения теплового потока из основания осадочной толщи, базирующегося на моделях рифтинга литосферы [31].

Так как в математическую модель непосредственно включены палеотемпературы из ОСВ, как «наблюденные», то никаких отдельных вариационных «калибровок  $R_0$ » [11], «калибровок модели» [13] по температурам ОСВ выполнять не требуется.

Примененный расчет плотности генерации нефтей (через интегральный показатель  $R$ , усл. ед.) не является заменяющим расчеты [11, 32, 33] объемной плотности генерации УВ ( $\text{кг/м}^3$ ), выполняе-

мые с использованием параметров нефтематеринской толщи и параметров «макрореактора». Расчет  $R$  – это рабочий инструмент для оценок вариантов моделирования геотермического режима нефтематеринских отложений в разрезе скважины (сопоставление по относительному значению параметра).



**Рисунок.** Обзорная схема территории исследований: 1 – населенный пункт и его название; 2 – поисково-разведочная скважина; 3 – сейсмический профиль работ МОГТ 2D; 4 – контур месторождения и его название (объекты экспериментальных исследований); 5 – гидрография и береговая линия; 6 – моделируемая скважина и ее индекс: МЯ-3002 – Малоямальская 3002; Арк-11 – Арктическая 11, Бо-116 – Бованенковская 116

**Figure.** Review scheme of the studied area: 1 is the locality and its name; 2 is the exploration well; 3 is the seismic profile of works MOGT 2D; 4 is the contour of the field and its name (objects of experimental research); 5 is the hydrography and coastline; 6 is the well simulated and its index: МЯ-3002 – Maloyamalskaya 3002, Арк-11 – Ark-ticheskaya 11, Бо-116 – Bovanenkovskaya 116

## Объект исследований

Моделирование палеогеотемпературных условий нефтематеринских китербютских отложений выполнено для геолого-геофизических и палеоклиматических условий арктических районов Западной Сибири на площадях глубокого бурения 3-х месторождений углеводородов п-ова Ямал (рисунок). Исследования проведены на месторождениях, расположенных в пределах Нурминского мегавала субмеридионального простирания [34]: Малоямальское, Арктическое и Бованенковское.

Осадочный мезозойско-кайнозойский чехол территории исследования начинает формироваться в ранней юре. Во времена бореальных трансгрессий формируется глинистая толща китербютская ( $J_{1kt}$ ), обладающая нефтематеринским потенциалом. К концу волжского века трансгрессия моря расширилась, идет накопление баженовской свиты ( $J_3+K_1bg$ ), обогащенной органическим веществом (табл. 1).

Начиная с апт-сеномана морской режим господствует до начала эоцена. Раскрытие котловины Арктического бассейна приводит к смене знака вертикальных тектонических движений, и наступает позднеэоценовая регрессия. Анализ мощностей палеоген-неогена [35–37] показывает, что кровля люлинвора (ирбита) могла быть подвергнута денудации. При этом мощность размытого слоя могла достигать 700 м.

Результаты многовариантных палеотектонических и палеотемпературных реконструкций [23] в пределах Малоямальской площади показывают, что накопление шло до середины миоцена (18,5 млн л. назад, формирование абросимовской свиты) и за 4 млн л. в раннебищеульское время, отложения абросимовской, туртасской, новомихайловской, атлымской, тавдинской, нюрольской, ирбитской, серовской и тибейсалинской свит (358 м) были размыты. В пределах Арктической площади в раннебищеульское время, за 4 млн л. были размыты отложения абросимовской, туртасской, новомихайловской, атлымской, тавдинской и нюрольской свит (535 м). В пределах Бованенковской площади в раннебищеульское время, за 4 млн л. были размыты отложения абросимовской, туртасской, новомихайловской, атлымской, тавдинской, нюрольской, ирбитской, серовской и тибейсалинской свит (238 м).

Ингрессиям бореального моря в среднем миоцене – раннем плиоцене, с конца бищеульского времени и до конца новопортовского, обязаны накопления осадков толщиной 113–143 м, которые в последующий этап положительных тектонических движений [38], за 1,3 млн л. денудировались. С началом позднего миоцена идет накопление плиоцен-четвертичных озерно-аллювиальных осадков.

В качестве примера параметризации осадочно-го разреза, вскрытого скважиной, определяющей параметры оптимальной седиментационной и теплофизической модели, приводится скважина Бованенковская 116 (табл. 2).

**Таблица 1.** Характеристика разрезов скважин Малоямальского, Арктического и Бованенковского месторождений  
**Table 1.** Characteristic of well sections of Maloyamalskoye, Arcticheskoye and Bovanenkovskoye fields

| Характеристики<br>Characteristics                                                                                                                                                       | Значение/Value                                                                                        |                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                          |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                                                                                         | Скважина/Well                                                                                         |                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                          |
|                                                                                                                                                                                         | Малоямальская 3002<br>Maloyamalskaya 3002                                                             | Арктическая 11<br>Arcticheskaya 11                                                                                                                       | Бованенковская 116<br>Bovanenkovskaya 116                                                                                                                                                                                                |
| Забой, м/Bottom, m                                                                                                                                                                      | 2751                                                                                                  | 3624                                                                                                                                                     | 3388                                                                                                                                                                                                                                     |
| Отложения на забое (свита)<br>Sediments at the bottom (suite)                                                                                                                           | Китебютская (J1t)<br>Kiterbyutskaya                                                                   | Левинская (J1lv)<br>Levinskaya                                                                                                                           | Палеозой<br>Paleozoic                                                                                                                                                                                                                    |
| Кровля китебютской свиты (J1kt), м<br>Roof of the Kiterbyutsk suite (J1kt), m                                                                                                           | 2645                                                                                                  | 3495                                                                                                                                                     | 3093                                                                                                                                                                                                                                     |
| Мощность китебютской свиты, м<br>Power of the Kiterbyutsk suite, m                                                                                                                      | 106                                                                                                   | 39                                                                                                                                                       | 68                                                                                                                                                                                                                                       |
| Кровля баженовской свиты (J3+K1bg), м<br>Roof of the Bazhenov suite (J3+K1bg), m                                                                                                        | 2219                                                                                                  | 2792                                                                                                                                                     | 2522                                                                                                                                                                                                                                     |
| Мощность баженовской свиты, м<br>Power of the Bazhenov suite, m                                                                                                                         | 21                                                                                                    | 16                                                                                                                                                       | 15                                                                                                                                                                                                                                       |
| Мощность палеогеновых отложений<br>в современном разрезе, м<br>Capacity of the Paleogene deposits<br>in the modern section, m                                                           | 120                                                                                                   | 223                                                                                                                                                      | 35                                                                                                                                                                                                                                       |
| Мощность неоген-четвертичных<br>отложений в современном разрезе, м<br>Capacity of the Neogene-Quaternary<br>deposits in the modern section, m                                           | 260                                                                                                   | 280                                                                                                                                                      | 212                                                                                                                                                                                                                                      |
| Размыв палеоген-неогеновых отложений<br>(14,5–18,5 млн лет назад), м<br>Scour of the Paleogene-Neogene deposits<br>(14,5–18,5 million years ago), m                                     | 358                                                                                                   | 535                                                                                                                                                      | 238                                                                                                                                                                                                                                      |
| Размыв неогеновых отложений<br>(4,1–5,4 млн лет назад), м<br>Scour of the Neogene deposits<br>(4,1–5,4 million years ago), m                                                            | 113                                                                                                   | 113                                                                                                                                                      | 143                                                                                                                                                                                                                                      |
| Мощность вечномёрзлых пород<br>в плиоцен-квартере (0,52–0,18 млн лет<br>назад), м<br>Capacity of the permafrost rocks in the<br>Pliocene-Quaternary<br>(0,52–0,18 million years ago), m | 600                                                                                                   | 600                                                                                                                                                      | 600                                                                                                                                                                                                                                      |
| Мощность вечномёрзлых пород в плио-<br>цен-квартере (0,18–0,0 млн лет назад), м<br>Capacity of permafrost rocks in the Plio-<br>cene-Quaternary (0,18–0,0 million years<br>ago), m      | 300                                                                                                   | 300                                                                                                                                                      | 300                                                                                                                                                                                                                                      |
| Мощность ледникового покрова в нео-<br>плейстоцене (0,18–0,13 млн лет назад), м<br>Capacity of glacial cover in the Neo-Pleisto-<br>cene (0,18–0,13 million years ago), m               | 500                                                                                                   | 500                                                                                                                                                      | 500                                                                                                                                                                                                                                      |
| Мощность ледникового покрова в нео-<br>плейстоцене (0,13–0,05 млн лет назад), м<br>Capacity of glacial cover in the Neo-Pleisto-<br>cene (0,13–0,05 million years ago), m               | 1500                                                                                                  | 1500                                                                                                                                                     | 1500                                                                                                                                                                                                                                     |
| Мощность ледникового покрова в нео-<br>плейстоцене (0,05–0,015 млн лет назад), м<br>Capacity of glacial cover in the Neo-Pleisto-<br>cene (0,05–0,015 million years ago), m             | 500                                                                                                   | 500                                                                                                                                                      | 500                                                                                                                                                                                                                                      |
| Результаты испытаний нижнеюрских<br>пластов (свита; пласт; тип флюида;<br>дебит, м³/сут)<br>Test results of the Early Jurassic layers<br>(suite; layer; fluid type; output, m³/d)       | Надояхская; Ю10;<br>вода с пленкой нефти;<br>33<br>Nadoyakhskaya; Yu10;<br>water with an oil film; 33 | Надояхская; Ю10; сухо<br>Nadoyakhskaya; Yu10; dry<br>Шараповская; Ю11; сухо<br>Sharapovskaya; Yu11; dry<br>Левинская; Ю12; сухо<br>Levinskaya; Yu12; dry | Вымская; Ю6; нефть с газом; 2,5<br>Vymskaya; Yu6; oil with gas; 2,5<br>Надояхская; Ю10; слабогазонасыщенная<br>Nadoyakhskaya; Yu10; poorly gas-saturated<br>Левинская; Ю12; слабогазонасыщенная<br>Levinskaya; Yu12 poorly gas-saturated |

Окончание табл. 1

Table 1

| Характеристики<br>Characteristics                                                                                                                                                                                 | Значение/Value                                                                                                                                                                  |                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                              |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                                                                                                                   | Скважина/Well                                                                                                                                                                   |                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                              |
|                                                                                                                                                                                                                   | Малоямалская 3002<br>Maloyamalskaya 3002                                                                                                                                        | Арктическая 11<br>Arcticheskaya 11                                                                                    | Бованенковская 116<br>Bovanenkovskaya 116                                                                                                                                                    |
| Измеренные пластовые температуры<br>(свита; глубина замера, м;<br>температура, °C)<br>Measured reservoir temperatures<br>(suite; measurement depth;<br>temperature, °C)                                           | Малышевская<br>Malyshevskaya; 2312; 67,5<br>Малышевская<br>Malyshevskaya; 2355; 69<br>Леонтьевская<br>Leontyevskaya; 2392; 75<br>Леонтьевская<br>Leontyevskaya; 2552; 76        | Надояхская<br>Nadoyakhskaya;<br>3383; 119<br>Левинская Levinskaya;<br>3533; 125<br>Левинская Levinskaya;<br>3560; 126 | Малышевская<br>Malyshevskaya; 2610; 94<br>Малышевская<br>Malyshevskaya; 2657; 97<br>Вымская/Vymskaya; 2795; 103<br>Надояхская<br>Nadoyakhskaya; 3050; 113<br>Левинская/Levinskaya; 3235; 120 |
| «Измеренные» температуры по ОСВ<br>(глубина отбора, м; ( $R^0_{vr}$ );<br>температура, °C)<br>Measured temperatures by reflective ability<br>of a vitrinite (selection depth; ( $R^0_{vr}$ );<br>temperature, °C) | 1917; (0,5); 80<br>1922; (0,51); 81<br>1937; (0,50); 80<br>2300; (0,57); 90<br>2315; (0,57); 90<br>2323; (0,57); 90<br>2339; (0,58); 91<br>2373; (0,59); 92<br>2407; (0,59); 92 | 2000; (0,65); 100<br>2500; (0,80); 120                                                                                | 2615; (0,8); 120                                                                                                                                                                             |

Примечание. Данные испытаний глубоких скважин изучены и сведены из «Каталога литолого-стратиграфических разбивок» (материалы Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, г. Новосибирск). ОСВ определены в Лаборатории геохимии нефти и газа Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН (г. Новосибирск).

Note. Test data of deep wells are studied and consolidated from «The catalog of the lithologic-stratigraphic breakdowns» (materials of Institute of oil and gas geology and geophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science, Novosibirsk). Vitrinite reflectivity values (VRV) are defined in the Laboratory of geochemistry of oil and gas of the Institute of oil and gas geology and geophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk).

Таблица 2. Пример параметрического описания седиментационной истории и теплофизических свойств осадочной толщи, вскрытой скважиной Бованенковская 116

Table 2. Parametrical description of sedimentation history and thermophysical properties of sedimentary thickness opened by the Bovanenkovskaya 116 well

| Свита, толща<br>(стратиграфия)<br>Suite, strata<br>(stratigraphy) | Мощность,<br>м<br>Thickness,<br>m | Возраст,<br>млн л назад<br>Age, million<br>years ago | Время накопле-<br>ния, млн л<br>Accumulation time,<br>million years | Плотность,<br>г/см <sup>3</sup><br>Density,<br>g/cm <sup>3</sup> | Теплопровод-<br>ность, Вт/м·град<br>Thermal conducti-<br>vity, W/m-deg | Температуропро-<br>водность, м <sup>2</sup> /с<br>Heat diffusivity,<br>m <sup>2</sup> /s | Тепловыделе-<br>ние, Вт/м <sup>3</sup><br>Heat genera-<br>tion, W/m <sup>3</sup> |
|-------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| Неоплейстоцен<br>Neo-Pleistocene Q-N <sub>2</sub>                 | –                                 | 0,015–0,00                                           | 0,015                                                               | –                                                                | –                                                                      | –                                                                                        | –                                                                                |
|                                                                   | –500                              | 0,02–0,015                                           | 0,005                                                               | 0,92                                                             | 2,25                                                                   | 1,2e-006                                                                                 | 1,22e-007                                                                        |
|                                                                   | –                                 | 0,04–0,02                                            | 0,02                                                                | –                                                                | –                                                                      | –                                                                                        | –                                                                                |
|                                                                   | –1000                             | 0,05–0,04                                            | 0,01                                                                | 0,92                                                             | 2,25                                                                   | 1,2e-006                                                                                 | 1,22e-007                                                                        |
|                                                                   | –                                 | 0,120–0,050                                          | 0,070                                                               | –                                                                | –                                                                      | –                                                                                        | –                                                                                |
|                                                                   | +1000                             | 0,130–0,120                                          | 0,010                                                               | 0,92                                                             | 2,25                                                                   | 1,2e-006                                                                                 | 1,22e-007                                                                        |
|                                                                   | –                                 | 0,177–0,130                                          | 0,047                                                               | –                                                                | –                                                                      | –                                                                                        | –                                                                                |
|                                                                   | +500                              | 0,182–0,177                                          | 0,005                                                               | 0,92                                                             | 2,25                                                                   | 1,2e-006                                                                                 | 1,22e-007                                                                        |
|                                                                   | 300                               | 0,18215–0,1820                                       | 0,00015                                                             | 2,10                                                             | 2,09                                                                   | 1,05e-006                                                                                | 1,22e-006                                                                        |
|                                                                   | 300                               | 0,1823–0,18215                                       | 0,00015                                                             | 2,10                                                             | 1,3                                                                    | 7e-007                                                                                   | 1,22e-006                                                                        |
|                                                                   | –600                              | 0,1826–0,1823                                        | 0,0003                                                              | –                                                                | –                                                                      | –                                                                                        | –                                                                                |
|                                                                   | –                                 | 0,5167–0,1826                                        | 0,3341                                                              | –                                                                | –                                                                      | –                                                                                        | –                                                                                |
|                                                                   | 600                               | 0,5197–0,5167                                        | 0,003                                                               | 2,10                                                             | 2,09                                                                   | 1,05e-006                                                                                | 1,22e-006                                                                        |
|                                                                   | –600                              | 0,520–0,5197                                         | 0,0003                                                              | –                                                                | –                                                                      | –                                                                                        | –                                                                                |
| Квартер+плиоцен Q-N <sub>2</sub><br>Quarter+Pliocene              | 212                               | 4,1–0,520                                            | 3,58                                                                | 2,04                                                             | 1,29                                                                   | 6,5e-007                                                                                 | 1,1e-006                                                                         |
| N <sub>1-2</sub>                                                  | –143                              | 4,1–5,4                                              | 1,3                                                                 |                                                                  |                                                                        |                                                                                          |                                                                                  |
| Новопортовская N <sub>1-2</sub><br>Novoportovskaya                | 80                                | 5,4–8,4                                              | 3                                                                   | 2,08                                                             | 1,33                                                                   | 7e-007                                                                                   | 1,2e-006                                                                         |
| Таволжанская N <sub>1</sub><br>Tavolzanskaya                      | 25                                | 8,4–12,5                                             | 4,1                                                                 | 2,08                                                             | 1,33                                                                   | 7e-007                                                                                   | 1,2e-006                                                                         |

**Продолжение табл. 2.**

**Table 2**

| Свита, толща<br>(стратиграфия)<br>Suite, strata<br>(stratigraphy)         | Мощность,<br>м<br>Thickness,<br>m | Возраст,<br>млн л назад<br>Age, million<br>years ago | Время накопле-<br>ния, млн л<br>Accumulation time,<br>million years | Плотность,<br>г/см <sup>3</sup><br>Density,<br>g/cm <sup>3</sup> | Теплопровод-<br>ность, Вт/м·град<br>Thermal conducti-<br>vity, W/m·deg | Температуропро-<br>водность, м <sup>2</sup> /с<br>Heat diffusivity,<br>m <sup>2</sup> /s | Тепловыделе-<br>ние, Вт/м <sup>3</sup><br>Heat genera-<br>tion, W/m <sup>3</sup> |
|---------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| Бищеульская <i>bsch N<sub>1</sub></i><br>Bishcheulskaya                   | 38                                | 12,5–14,5                                            | 2                                                                   | 2,08                                                             | 1,33                                                                   | 7e-007                                                                                   | 1,2e-006                                                                         |
| <i>N<sub>1</sub></i>                                                      | –238                              | 14,5–18,5                                            | 4                                                                   |                                                                  |                                                                        |                                                                                          |                                                                                  |
| Абросимовская <i>N<sub>1</sub></i><br>Abrosimovskaya                      | 10                                | 18,5–23,0                                            | 4,5                                                                 | 2,08                                                             | 1,33                                                                   | 7e-007                                                                                   | 1,2e-006                                                                         |
| Туртасская <i>tur P<sub>3</sub></i><br>Turtasskaya                        | 20                                | 23,0–28,0                                            | 5                                                                   | 2,08                                                             | 1,33                                                                   | 7e-007                                                                                   | 1,2e-006                                                                         |
| Новомихайловская<br><i>nvm P<sub>3</sub></i><br>Novomikhaylovskaya        | 15                                | 28,0–30,0                                            | 2                                                                   | 2,08                                                             | 1,33                                                                   | 7e-007                                                                                   | 1,2e-006                                                                         |
| Атлымская <i>atl P<sub>3</sub></i><br>Atlymskaya                          | 37                                | 30,0–34,0                                            | 4                                                                   | 2,08                                                             | 1,33                                                                   | 7e-007                                                                                   | 1,2e-006                                                                         |
| Тавдинская <i>tv P<sub>2</sub></i><br>Tavdinskaya                         | 50                                | 34,0–42,6                                            | 8,6                                                                 | 2,08                                                             | 1,33                                                                   | 7e-007                                                                                   | 1,2e-006                                                                         |
| Нюрольская <i>nl P<sub>2</sub></i><br>Nyurolskaya                         | 37                                | 42,6–50,4                                            | 7,8                                                                 | 2,08                                                             | 1,33                                                                   | 7e-007                                                                                   | 1,2e-006                                                                         |
| Ирбитская <i>P<sub>2</sub>ir</i><br>Irbitskaya                            | 5                                 | 50,4–55,0                                            | 4,6                                                                 | 2,09                                                             | 1,35                                                                   | 7e-007                                                                                   | 1,2e-006                                                                         |
| Серовская <i>P<sub>2</sub>sr</i><br>Sеровskaya                            | 20                                | 55,0–58,0                                            | 3                                                                   | 2,09                                                             | 1,35                                                                   | 7e-007                                                                                   | 1,2e-006                                                                         |
| Тибейсалинская <i>P<sub>2</sub>tb</i><br>Tibeyalsinskaya                  | 44                                | 58,0–63,7                                            | 5,7                                                                 | 2,09                                                             | 1,35                                                                   | 7e-007                                                                                   | 1,2e-006                                                                         |
| Ганькинская <i>K<sub>2</sub>+P<sub>2</sub>gn</i><br>Gankinskaya           | 35                                | 63,7–73,0                                            | 9,3                                                                 | 2,11                                                             | 1,37                                                                   | 7e-007                                                                                   | 1,25e-006                                                                        |
| Березовская <i>K<sub>2</sub>b</i><br>Berezovskaya                         | 279                               | 73,0–89,0                                            | 16                                                                  | 2,15                                                             | 1,41                                                                   | 7,5e-007                                                                                 | 1,25e-006                                                                        |
| Кузнецовская <i>K<sub>2</sub>kz</i><br>Kuznetsovskaya                     | 37                                | 89,0–92,0                                            | 3                                                                   | 2,18                                                             | 1,43                                                                   | 8e-007                                                                                   | 1,25e-006                                                                        |
| Марресалинская<br><i>K<sub>2</sub>-K<sub>1</sub>mr</i><br>Marresalinskaya | 523                               | 92,0–102,0                                           | 10                                                                  | 2,26                                                             | 1,49                                                                   | 8e-007                                                                                   | 1,25e-006                                                                        |
| Яронгская <i>K<sub>1</sub>jar</i><br>Yarongskaya                          | 168                               | 102–108,5                                            | 6,5                                                                 | 2,39                                                             | 1,6                                                                    | 8e-007                                                                                   | 1,25e-006                                                                        |
| Танопчинская <i>K<sub>1</sub>tn</i><br>Tanopchinskaya                     | 746                               | 108,5–133,2                                          | 24,7                                                                | 2,44                                                             | 1,62                                                                   | 8e-007                                                                                   | 1,25e-006                                                                        |
| Ахская <i>K<sub>1</sub>ah</i><br>Akhsakaya                                | 522                               | 133,2–142,7                                          | 9,5                                                                 | 2,44                                                             | 1,64                                                                   | 8e-007                                                                                   | 1,25e-006                                                                        |
| Баженовская <i>J<sub>3</sub>+K<sub>1</sub>bg</i><br>Bazhenovskaya         | 15                                | 142,7–149,3                                          | 6,6                                                                 | 2,42                                                             | 1,62                                                                   | 8e-007                                                                                   | 1,3e-006                                                                         |
| Абалакская <i>nr J<sub>2</sub></i><br>Abalakskaya                         | 83                                | 149,3–161,7                                          | 12,4                                                                | 2,42                                                             | 1,62                                                                   | 8e-007                                                                                   | 1,3e-006                                                                         |
| Малышевская <i>J<sub>2</sub>ml</i><br>Malyshvskaya                        | 84                                | 161,7–171,0                                          | 9,3                                                                 | 2,45                                                             | 1,63                                                                   | 8e-007                                                                                   | 1,3e-006                                                                         |
| Леонтьевская <i>J<sub>2</sub>ln</i><br>Leontyevskaya                      | 90                                | 171,0–173,0                                          | 2                                                                   | 2,47                                                             | 1,65                                                                   | 8e-007                                                                                   | 1,3e-006                                                                         |
| Вымская <i>vm J<sub>2</sub></i><br>Vymskaya                               | 143                               | 173,0–175,0                                          | 2                                                                   | 2,45                                                             | 1,63                                                                   | 8e-007                                                                                   | 1,3e-006                                                                         |
| Лайдинская <i>ld J<sub>2</sub></i><br>Laidinskaya                         | 83                                | 175,0–177,0                                          | 2                                                                   | 2,47                                                             | 1,65                                                                   | 8e-007                                                                                   | 1,3e-006                                                                         |
| Надояхская <i>nd J<sub>2</sub>+J<sub>1</sub></i><br>Nadoyakhskaya         | 73                                | 177,0–182,5                                          | 5,5                                                                 | 2,45                                                             | 1,63                                                                   | 8e-007                                                                                   | 1,3e-006                                                                         |

Окончание табл. 2.

Table 2

| Свита, толща<br>(стратиграфия)<br>Suite, strata<br>(stratigraphy) | Мощность,<br>м<br>Thickness,<br>m | Возраст,<br>млн л назад<br>Age, million<br>years ago | Время накопле-<br>ния, млн л<br>Accumulation time,<br>million years | Плотность,<br>г/см <sup>3</sup><br>Density,<br>g/cm <sup>3</sup> | Теплопровод-<br>ность, Вт/м-град<br>Thermal conducti-<br>vity, W/m-deg | Температуропро-<br>водность, м <sup>2</sup> /с<br>Heat diffusivity,<br>m <sup>2</sup> /s | Тепловыделе-<br>ние, Вт/м <sup>3</sup><br>Heat genera-<br>tion, W/m <sup>3</sup> |
|-------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| Китербютская <i>kt J<sub>1</sub></i><br>Kiterbutskaya             | 68                                | 182,5–184,0                                          | 1,5                                                                 | 2,47                                                             | 1,65                                                                   | 8e-007                                                                                   | 1,3e-006                                                                         |
| Шараповская <i>shr J<sub>1</sub></i><br>Sharapovskaya             | 85                                | 184,0–186,0                                          | 2                                                                   | 2,45                                                             | 1,63                                                                   | 8e-007                                                                                   | 1,3e-006                                                                         |
| Левинская <i>lv J<sub>1</sub></i><br>Levinskaya                   | 111                               | 186,0–186,70                                         | 0,7                                                                 | 2,47                                                             | 1,65                                                                   | 8e-007                                                                                   | 1,3e-006                                                                         |
| Зимняя <i>zm J<sub>1</sub></i><br>Zimnyaya                        | 13                                | 186,7–200,2                                          | 13,5                                                                | 2,45                                                             | 1,63                                                                   | 8e-007                                                                                   | 1,3e-006                                                                         |
| Мощность разреза, м<br>Power section, m                           | 3370                              |                                                      |                                                                     |                                                                  |                                                                        |                                                                                          |                                                                                  |

Примечание. Коричневой заливкой показаны времена накопления нефтематеринских баженовской и китербютских свит и их параметрическое описание. Серой показаны размывы палеоген-неогеновых отложений. Синей заливкой показаны времена формирования, существования и деградации толщи мерзлоты, светло-синей – времена формирования, существования и деградации толщи ледников.

Note. Accumulation time of Bazhenov and Kiterbutsk petromaternal suites and its parametric description are filled with brown. Erosion of the Paleogene-Neogene deposits is filled with grey. Times of formation, existence and degradation of the permafrost thickness are filled with blue. Times of formation, existence and degradation of glaciers thickness is filled with dark blue.

# Реконструкции геотермического режима китербютской свиты

В работах [15, 16] выполнен анализ влияния палеоклиматических факторов на результаты палеотектонических и палеотемпературных реконструкций осадочного разреза, включающего *верхнеюрскую баженовскую свиту*, для глубоких скважин Ростовцевского, Средне-Ямального и Арктического месторождений. В настоящей статье выполняется детальный анализ влияния полного комплекса палеоклиматических факторов (мезозойско-кайнозойского векового хода температур на поверхности Земли, векового хода мощностей неоплейстоценовой мерзлоты и векового хода мощностей позднечетвертичных ледниковых покровов) на геотермический режим *нижнеюрской китербютской свиты*, на примере скважины Бованенковская 116, с последующим сводным анализом по скважинам Малоямального, Арктического и Бованенковского месторождений (рисунок).

Количественное определение влияния палеоклимата на расчетный геотермический режим и на оценку степени реализации генерационного потенциала материнских китербютских отложений выполняется на основе анализа вариабельности результатов пяти вариантов палеотемпературных реконструкций. *Вариант 1* – без учета факторов палеоклимата. *Вариант 2* – учет «стандартного» векового хода температур [13, 39], без учета неоплейстоценовой мерзлоты и ледников. *Вариант 3* – учет «арктического» векового хода температур [15], без учета неоплейстоценовой мерзлоты и ледников. *Вариант 4* – учет «арктического» векового хода температур, учет динамики неоплейстоценовой мерзлоты [15], без учета ледников. *Вариант 5* – учет «арктического» векового хода температур, учет динамики неоплейстоценовой мерзлоты и динамики ледников [16].

Анализ расчетных значений плотности теплового потока из основания осадочного разреза (табл. 3) показывает следующее. В вариантах 1, 3,

Примечание. Вариант 1 – без учета факторов палеоклимата. Вариант 2 – учет «стандартного» векового хода температур, без учета неоплейстоценовой мерзлоты и ледников. Вариант 3 – учет «арктического» векового хода температур, без учета мерзлоты и ледников. Вариант 4 – учет «арктического» векового хода температур и динамики неоплейстоценовой мерзлоты. Вариант 5 – учет «арктического» векового хода температур, динамики неоплейстоценовой мерзлоты и ледникового покрова. Коричневой заливкой показаны температуры главной фазы нефтеобразования (ГФН), темно-коричневой заливкой – палеотемпературный максимум ГФН. Серой заливкой обозначены времена размыва палеоген-неогеновых отложений

Note. Variant 1 – excluding paleoclimate factors. Variant 2 – considering «standard» secular variation of temperatures, without Neo-Pleistocene permafrost and glaciers. Variant 3 – considering «arctic» secular variation of temperatures, without permafrost and glaciers. Variant 4 – considering «arctic» secular variation of temperatures and dynamics of Neo-Pleistocene permafrost. Variant 5 – considering «arctic» secular variation of temperatures and dynamics of Neo-Pleistocene permafrost and the glacial cover. The temperatures of the major oil generation zone (MOGZ) is filled with brown, the paleotemperature maxima MOGZ is filled with dark-brown, the times of Paleogene-Neogene sediment erosion is filled with grey.

**Таблица 3.** Расчетные геотемпературы китербютской свиты в разрезе скважины Бованенковская 116

**Table 3.** Calculated geotemperatures of the Kiterbyutsk suite in the well section Bovanenkovskaya 116

| Время, млн л назад<br>Time, million years ago                                                                          | «Стандартный» ход, °C<br>«Standard» century<br>course, °C | «Арктический» ход, °C<br>The «Arctic»<br>secular variation, °C | Мощность мерзлых<br>пород, м<br>Capacity of permafrost<br>rocks, m | Мощность ледника, м<br>Capacity of glaciers, m | Глубина положения ки-<br>тербютской свиты, м<br>Basement depth of<br>Kiterbyutsk suite h, m | Геотемпературы китербютской свиты, °C<br>Geotemperatures of Kiterbyutsk suite, °C |     |     |     |                                   |                                                                                                                                                          |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                        |                                                           |                                                                |                                                                    |                                                |                                                                                             | Вариант/Variant                                                                   |     |     |     |                                   |                                                                                                                                                          |
|                                                                                                                        |                                                           |                                                                |                                                                    |                                                |                                                                                             | 5                                                                                 |     |     |     |                                   |                                                                                                                                                          |
|                                                                                                                        |                                                           |                                                                |                                                                    |                                                |                                                                                             | 1                                                                                 | 2   | 3   | 4   | Геотемпературы<br>Geotemperatures | Глубина положения китербютской<br>свиты, м (учет ледникового покрова)<br>Basement depth of Kiterbyutsk suite, m<br>(taking into account a glacial cover) |
| 0                                                                                                                      | 0                                                         | -4                                                             | 300                                                                | -                                              | 3127                                                                                        | 118                                                                               | 116 | 116 | 115 | 115                               | 3111                                                                                                                                                     |
| 0,015                                                                                                                  | -2                                                        | -10                                                            | 300                                                                | -                                              | 3126                                                                                        | 118                                                                               | 116 | 115 | 115 | 114                               | 3110                                                                                                                                                     |
| 0,02                                                                                                                   | -3                                                        | -8                                                             | 300                                                                | 500                                            | 3126                                                                                        | 118                                                                               | 115 | 115 | 115 | 113                               | 3610                                                                                                                                                     |
| 0,030                                                                                                                  | -4                                                        | -5                                                             | 300                                                                | 500                                            | 3125                                                                                        | 118                                                                               | 115 | 116 | 114 | 113                               | 3609                                                                                                                                                     |
| 0,04                                                                                                                   | -2                                                        | -6                                                             | 300                                                                | 500                                            | 3125                                                                                        | 118                                                                               | 115 | 115 | 114 | 112                               | 4109                                                                                                                                                     |
| 0,050                                                                                                                  | -1                                                        | -7                                                             | 300                                                                | 1500                                           | 3125                                                                                        | 118                                                                               | 116 | 116 | 114 | 111                               | 4608                                                                                                                                                     |
| 0,070                                                                                                                  | -4                                                        | -4                                                             | 300                                                                | 1500                                           | 3123                                                                                        | 118                                                                               | 116 | 115 | 113 | 109                               | 4609                                                                                                                                                     |
| 0,110                                                                                                                  | -4                                                        | -5                                                             | 300                                                                | 1500                                           | 3121                                                                                        | 118                                                                               | 116 | 115 | 112 | 107                               | 4609                                                                                                                                                     |
| 0,120                                                                                                                  | -2                                                        | -6                                                             | 300                                                                | 1500                                           | 3121                                                                                        | 118                                                                               | 116 | 114 | 111 | 107                               | 4609                                                                                                                                                     |
| 0,130                                                                                                                  | -1                                                        | -7                                                             | 300                                                                | 500                                            | 3120                                                                                        | 118                                                                               | 116 | 114 | 111 | 106                               | 3609                                                                                                                                                     |
| 0,150                                                                                                                  | -4                                                        | -6                                                             | 300                                                                | 500                                            | 3119                                                                                        | 118                                                                               | 117 | 114 | 111 | 106                               | 3608                                                                                                                                                     |
| 0,177                                                                                                                  | -6                                                        | -7                                                             | 300                                                                | 500                                            | 3118                                                                                        | 118                                                                               | 116 | 114 | 122 | 106                               | 3607                                                                                                                                                     |
| 0,1820                                                                                                                 | -6                                                        | -7                                                             | 300                                                                | -                                              | 3118                                                                                        | 118                                                                               | 116 | 114 | 119 | 106                               | 3108                                                                                                                                                     |
| 0,1826                                                                                                                 | -7                                                        | -7                                                             | 600                                                                | -                                              | 3118                                                                                        | 118                                                                               | 116 | 114 | 112 | 106                               | 3087                                                                                                                                                     |
| 0,200                                                                                                                  | -7                                                        | -8                                                             | 600                                                                | -                                              | 3117                                                                                        | 118                                                                               | 117 | 114 | 111 | 106                               | 3107                                                                                                                                                     |
| 0,240                                                                                                                  | -10                                                       | -9                                                             | 600                                                                | -                                              | 3115                                                                                        | 118                                                                               | 117 | 113 | 111 | 106                               | 3107                                                                                                                                                     |
| 0,5167                                                                                                                 | -6                                                        | -10                                                            | 600                                                                | -                                              | 3100                                                                                        | 114                                                                               | 118 | 112 | 119 | 114                               | 3089                                                                                                                                                     |
| 0,5197                                                                                                                 | -5                                                        | -11                                                            | -                                                                  | -                                              | 3100                                                                                        | 117                                                                               | 118 | 112 | 126 | 114                               | 2907                                                                                                                                                     |
| 0,520                                                                                                                  | -5                                                        | -11                                                            | -                                                                  | -                                              | 3100                                                                                        | 117                                                                               | 118 | 112 | 118 | 114                               | 3127                                                                                                                                                     |
| 1,8                                                                                                                    | -3                                                        | -13                                                            | -                                                                  | -                                              | 3034                                                                                        | 114                                                                               | 116 | 109 | 115 | 110                               | 3051                                                                                                                                                     |
| 3,2                                                                                                                    | -2                                                        | +5                                                             | -                                                                  | -                                              | 2962                                                                                        | 111                                                                               | 113 | 120 | 126 | 121                               | 2968                                                                                                                                                     |
| 4,1                                                                                                                    | +3                                                        | +4                                                             | -                                                                  | -                                              | 2915                                                                                        | 110                                                                               | 113 | 119 | 125 | 120                               | 2915                                                                                                                                                     |
| 4,9                                                                                                                    | +5                                                        | +4                                                             | -                                                                  | -                                              | 3003                                                                                        | 113                                                                               | 116 | 121 | 127 | 123                               | 3003                                                                                                                                                     |
| 5,4                                                                                                                    | +5                                                        | +4                                                             | -                                                                  | -                                              | 3058                                                                                        | 115                                                                               | 119 | 124 | 130 | 125                               | 3058                                                                                                                                                     |
| 8,4                                                                                                                    | +9                                                        | +5                                                             | -                                                                  | -                                              | 2978                                                                                        | 112                                                                               | 117 | 118 | 127 | 122                               | 2978                                                                                                                                                     |
| 10                                                                                                                     | +9                                                        | +6                                                             | -                                                                  | -                                              | 2968                                                                                        | 111                                                                               | 117 | 122 | 127 | 123                               | 2968                                                                                                                                                     |
| 12,5                                                                                                                   | +10                                                       | +6                                                             | -                                                                  | -                                              | 2953                                                                                        | 110                                                                               | 118 | 121 | 127 | 122                               | 2953                                                                                                                                                     |
| 14,5                                                                                                                   | +10                                                       | +6                                                             | -                                                                  | -                                              | 2915                                                                                        | 110                                                                               | 118 | 121 | 126 | 122                               | 2915                                                                                                                                                     |
| 18,5                                                                                                                   | +11                                                       | +7                                                             | -                                                                  | -                                              | 3153                                                                                        | 120                                                                               | 127 | 132 | 138 | 133                               | 3153                                                                                                                                                     |
| 23                                                                                                                     | +4                                                        | +8                                                             | -                                                                  | -                                              | 3143                                                                                        | 119                                                                               | 122 | 132 | 138 | 133                               | 3143                                                                                                                                                     |
| 28                                                                                                                     | +8                                                        | +8                                                             | -                                                                  | -                                              | 3123                                                                                        | 118                                                                               | 124 | 131 | 137 | 132                               | 3123                                                                                                                                                     |
| 30                                                                                                                     | +10                                                       | +9                                                             | -                                                                  | -                                              | 3108                                                                                        | 117                                                                               | 125 | 131 | 137 | 132                               | 3108                                                                                                                                                     |
| 34                                                                                                                     | +11                                                       | +9                                                             | -                                                                  | -                                              | 3071                                                                                        | 116                                                                               | 126 | 130 | 136 | 131                               | 3071                                                                                                                                                     |
| 35                                                                                                                     | +14                                                       | +9                                                             | -                                                                  | -                                              | 3065                                                                                        | 116                                                                               | 128 | 130 | 135 | 130                               | 3065                                                                                                                                                     |
| 42,6                                                                                                                   | +20                                                       | +12                                                            | -                                                                  | -                                              | 3021                                                                                        | 114                                                                               | 133 | 131 | 136 | 131                               | 3021                                                                                                                                                     |
| 50                                                                                                                     | +21                                                       | +15                                                            | -                                                                  | -                                              | 2986                                                                                        | 112                                                                               | 132 | 132 | 137 | 132                               | 2986                                                                                                                                                     |
| 50,4                                                                                                                   | +21                                                       | +15                                                            | -                                                                  | -                                              | 2984                                                                                        | 112                                                                               | 132 | 132 | 137 | 132                               | 2984                                                                                                                                                     |
| 55                                                                                                                     | +21                                                       | +15                                                            | -                                                                  | -                                              | 2979                                                                                        | 112                                                                               | 131 | 132 | 137 | 133                               | 2979                                                                                                                                                     |
| 58                                                                                                                     | +20                                                       | +16                                                            | -                                                                  | -                                              | 2959                                                                                        | 111                                                                               | 130 | 132 | 136 | 132                               | 2959                                                                                                                                                     |
| 63,7                                                                                                                   | +19                                                       | +16                                                            | -                                                                  | -                                              | 2915                                                                                        | 109                                                                               | 127 | 130 | 135 | 130                               | 2915                                                                                                                                                     |
| 70                                                                                                                     | +19                                                       | +16                                                            | -                                                                  | -                                              | 2891                                                                                        | 108                                                                               | 126 | 128 | 134 | 129                               | 2891                                                                                                                                                     |
| 73                                                                                                                     | +19                                                       | +15                                                            | -                                                                  | -                                              | 2880                                                                                        | 107                                                                               | 126 | 127 | 133 | 128                               | 2880                                                                                                                                                     |
| 85                                                                                                                     | +19                                                       | +13                                                            | -                                                                  | -                                              | 2671                                                                                        | 98                                                                                | 117 | 116 | 121 | 116                               | 2671                                                                                                                                                     |
| 89                                                                                                                     | +20                                                       | +13                                                            | -                                                                  | -                                              | 2601                                                                                        | 95                                                                                | 115 | 113 | 118 | 114                               | 2601                                                                                                                                                     |
| 92                                                                                                                     | +20                                                       | +13                                                            | -                                                                  | -                                              | 2564                                                                                        | 94                                                                                | 113 | 111 | 116 | 112                               | 2564                                                                                                                                                     |
| 100                                                                                                                    | +22                                                       | +15                                                            | -                                                                  | -                                              | 2146                                                                                        | 77                                                                                | 98  | 95  | 99  | 96                                | 2146                                                                                                                                                     |
| 102                                                                                                                    | +22                                                       | +15                                                            | -                                                                  | -                                              | 2041                                                                                        | 73                                                                                | 94  | 91  | 95  | 92                                | 2041                                                                                                                                                     |
| 108,5                                                                                                                  | +22                                                       | +15                                                            | -                                                                  | -                                              | 1873                                                                                        | 67                                                                                | 87  | 85  | 88  | 85                                | 1873                                                                                                                                                     |
| 120                                                                                                                    | +22                                                       | +16                                                            | -                                                                  | -                                              | 1526                                                                                        | 54                                                                                | 75  | 72  | 75  | 73                                | 1526                                                                                                                                                     |
| 134                                                                                                                    | +21                                                       | +15                                                            | -                                                                  | -                                              | 1083                                                                                        | 34                                                                                | 59  | 55  | 57  | 55                                | 1083                                                                                                                                                     |
| 135                                                                                                                    | +22                                                       | +15                                                            | -                                                                  | -                                              | 1028                                                                                        | 32                                                                                | 57  | 52  | 55  | 53                                | 1028                                                                                                                                                     |
| 142,5                                                                                                                  | +22                                                       | +15                                                            | -                                                                  | -                                              | 616                                                                                         | 22                                                                                | 44  | 38  | 39  | 38                                | 616                                                                                                                                                      |
| Расчетный тепловой поток из основания, мВт/м <sup>2</sup><br>Estimation heat flow from the basement, mW/m <sup>2</sup> |                                                           |                                                                |                                                                    |                                                |                                                                                             | 57                                                                                | 56  | 59  | 62  | 60                                |                                                                                                                                                          |

4 и 5 тепловой поток увеличивается на 1–3–6–4 мВт/м<sup>2</sup> по отношению к расчетному значению теплового потока *варианта 2* – 56 мВт/м<sup>2</sup>.

Анализ термической истории тогурской свиты (табл. 3) в разрезе скважины Бованенковская 116 свидетельствует о том, что в *варианте 1* (без учета всех факторов палеоклимата) материнская свита «пережила» самую короткую и самую «холодную» главную фазу нефтеобразования (ГФН).

В *вариантах 2, 3, 4 и 5* (с учетом факторов палеоклимата) китербютская свита имеет «богатые» термические истории ГФН. Главные фазы нефтеобразования этих вариантов имеют разные значения абсолютных максимумов палеотемператур.

В *варианте 4* присутствие толщи вечномерзлых пород, обладающих высокими значениями

теплопроводности и температуропроводности, приводит к максимальным расчетным значениям плотности теплового потока, что, в свою очередь, приводит к наибольшей продолжительности ГФН, увеличивает расчетные геотемпературы материнских отложений до максимальных значений.

Отметим, что доучет ледникового покрова (*вариант 5*) мало повлиял и на величину расчетного значения плотности теплового потока из основания, и на интенсивность и продолжительность ГФН.

Сопоставление расчетных и «наблюдаемых» геотемператур для 3-х скважин приведено в табл. 4. Так как «наблюдаемые» (измеренные) температуры (включая определенные по ОСВ) имеют погрешность порядка  $\pm 2$  °С, то *варианты 1 и*

**Табл. 4.** Сопоставление измеренных и расчетных геотемператур китербютской свиты в скважинах Малоямальского, Арктического и Бованенковского месторождений

**Table 4.** Comparison of the measured and calculated geotemperatures of the Kiterbyutsk suite in the wells of Low-Yamal, Arctic and Bovanenkovsk fields

| Глубина, м<br>Depth, m                                                                 | Измеренные температуры, °C<br>Measured temperatures, °C | Способ измерения<br>Measurement method | Вариант/Variant   |                        |                   |                        |                   |                        |                   |                        |                   |                        |
|----------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|----------------------------------------|-------------------|------------------------|-------------------|------------------------|-------------------|------------------------|-------------------|------------------------|-------------------|------------------------|
|                                                                                        |                                                         |                                        | 1                 |                        | 2                 |                        | 3                 |                        | 4                 |                        | 5                 |                        |
|                                                                                        |                                                         |                                        | Значение<br>Value | Разница<br>Discrepancy | Значение<br>Value | Разница<br>Discrepancy | Значение<br>Value | Разница<br>Discrepancy | Значение<br>Value | Разница<br>Discrepancy | Значение<br>Value | Разница<br>Discrepancy |
| Скважина Малоямальская 3002/Maloyamalskaya 3002 well                                   |                                                         |                                        |                   |                        |                   |                        |                   |                        |                   |                        |                   |                        |
| 2312                                                                                   | 67,5                                                    | пластовые/in-place                     | 81                | +14                    | 74                | +6                     | 72                | +4                     | 68                | 0                      | 73                | +5                     |
| 2355                                                                                   | 69                                                      | пластовые/in-place                     | 83                | +14                    | 81                | +12                    | 73                | +4                     | 69                | 0                      | 74                | +5                     |
| 2391                                                                                   | 75                                                      | пластовые/in-place                     | 84                | +9                     | 76                | +1                     | 74                | -1                     | 70                | -5                     | 75                | 0                      |
| 2552                                                                                   | 76                                                      | пластовые/in-place                     | 89                | +13                    | 81                | +5                     | 79                | +3                     | 75                | -1                     | 80                | +4                     |
| 1917                                                                                   | 80                                                      | по OCB/on OSV                          | 73                | -7                     | 76                | -4                     | 77                | -3                     | 79                | -1                     | 77                | -3                     |
| 1922                                                                                   | 81                                                      | по OCB/on OSV                          | 73                | -8                     | 76                | -5                     | 77                | -4                     | 79                | -2                     | 77                | -4                     |
| 1937                                                                                   | 81                                                      | по OCB/on OSV                          | 73                | -8                     | 77                | -4                     | 78                | -3                     | 79                | -2                     | 78                | -3                     |
| 2300                                                                                   | 90                                                      | по OCB/on OSV                          | 85                | -5                     | 87                | -3                     | 89                | -1                     | 91                | +1                     | 89                | -1                     |
| 2315                                                                                   | 90                                                      | по OCB/on OSV                          | 85                | -5                     | 88                | -2                     | 90                | 0                      | 91                | +1                     | 89                | -1                     |
| 2323                                                                                   | 90                                                      | по OCB/on OSV                          | 86                | -4                     | 88                | -2                     | 90                | 0                      | 92                | +2                     | 89                | -1                     |
| 2339                                                                                   | 91                                                      | по OCB/on OSV                          | 86                | -5                     | 89                | -2                     | 90                | -1                     | 92                | +1                     | 90                | -1                     |
| 2339                                                                                   | 92                                                      | по OCB/on OSV                          | 87                | -5                     | 89                | -3                     | 91                | -1                     | 93                | +1                     | 91                | -1                     |
| 2407                                                                                   | 92                                                      | по OCB/on OSV                          | 88                | -4                     | 91                | -1                     | 92                | 0                      | 94                | +2                     | 92                | 0                      |
| Среднеквадратическое отклонение («невязка»), °C<br>Mean squared error («residual»), °C |                                                         |                                        | ±9                |                        | ±5                |                        | ±3                |                        | ±2                |                        | ±3                |                        |
| Скважина Арктическая 11/Arcticheskaya 11 well                                          |                                                         |                                        |                   |                        |                   |                        |                   |                        |                   |                        |                   |                        |
| 2000                                                                                   | 100                                                     | по OCB/on OSV                          | 91                | -9                     | 97                | -3                     | 99                | -1                     | 102               | +2                     | 100               | 0                      |
| 2500                                                                                   | 120                                                     | по OCB/on OSV                          | 109               | -11                    | 115               | -5                     | 117               | -3                     | 121               | +1                     | 119               | -1                     |
| 3533                                                                                   | 125                                                     | пластовые/in-place                     | 133               | +8                     | 128               | +3                     | 126               | +1                     | 124               | -1                     | 126               | +1                     |
| 3560                                                                                   | 126                                                     | пластовые/in-place                     | 133               | +7                     | 129               | +3                     | 127               | +1                     | 124               | -1                     | 126               | 0                      |
| Среднеквадратическое отклонение («невязка»), °C<br>Mean squared error («residual»), °C |                                                         |                                        | ±9                |                        | ±4                |                        | ±2                |                        | ±1                |                        | ±1                |                        |
| Скважина Бованенковская 116/ Bovanenkovskaya 116 well                                  |                                                         |                                        |                   |                        |                   |                        |                   |                        |                   |                        |                   |                        |
| 2610                                                                                   | 94                                                      | пластовые/in-place                     | 100               | +6                     | 98                | +4                     | 97                | +3                     | 96                | +2                     | 97                | +3                     |
| 2657                                                                                   | 97                                                      | пластовые/in-place                     | 102               | +5                     | 100               | +3                     | 99                | +2                     | 97                | 0                      | 99                | +2                     |
| 2795                                                                                   | 103                                                     | пластовые/in-place                     | 107               | +4                     | 105               | +2                     | 104               | +1                     | 103               | 0                      | 104               | +1                     |
| 3050                                                                                   | 113                                                     | пластовые/in-place                     | 116               | +3                     | 114               | +1                     | 113               | 0                      | 112               | -1                     | 113               | 0                      |
| 2615                                                                                   | 120                                                     | по OCB/on OSV                          | 102               | -18                    | 110               | -10                    | 113               | -7                     | 119               | -1                     | 115               | -5                     |
| Среднеквадратическое отклонение («невязка»), °C<br>Mean squared error («residual»), °C |                                                         |                                        | ±9                |                        | ±5                |                        | ±4                |                        | ±1                |                        | ±3                |                        |

Примечание. Коричневой заливкой показаны варианты оптимальные (приемлемые) по критерию «невязки».

Note. The optimal variants (accepted) by «residual» criterion are filled with brown.

2 решений *нельзя признать приемлемыми*. В этих вариантах «невязки» превышают оптимальное значение в 2 раза и много больше, а в *варианте 1* разница с пластовыми температурами и с температурами по ОСВ достигает 14 и 18 °С.

В случае учета палеоклимата (*варианты 3, 4 и 5*) как «невязки» для пластовых температур, так и сходимость с «максимальным палеотермометром» оптимальны и примерно равноценны. Несколько иные результаты получены для скважины Бованенковская 116. Здесь оптимальным (приемлемым) можно признать, пожалуй, только *вариант 4*.

**Табл. 5.** Расчет интегрального показателя  $R$ , дающего экспресс-оценку плотности генерации китербютских нефтей

**Table 5.** Calculation of the integrated indicator  $R$  giving the express assessment of generation density of Kiterbutski oil

| Вариант палеотемпературного моделирования<br>Variant of paleo temperature modeling | Экспресс-расчет плотности генерации ( $R$ ), усл. ед.<br>Express calculation of generation density ( $R$ ), cu. | Период работы палеоочага млн л назад<br>Work period of the paleohearth, million years ago | Время работы палеоочага, млн л<br>Lifetime of the paleohearth, million years | Расчетная плотность теплового потока из основания осадочного разреза, мВт/м <sup>2</sup><br>Settlement heat flow density from the basis of the sedimentary section, mW/m <sup>2</sup> | Максимальные геотемпературы палеоочага генерации нефти, °С<br>Maximum geotemperatures of oil generation paleohearth, °C |
|------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Скважина Малоямальная 3002/Maloyamalskaya 3002 well                                |                                                                                                                 |                                                                                           |                                                                              |                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                         |
| 1                                                                                  | 13                                                                                                              | 28,0–18,5                                                                                 | 9,5                                                                          | 52                                                                                                                                                                                    | 97                                                                                                                      |
| 2                                                                                  | 48                                                                                                              | 63,7–18,5                                                                                 | 45,2                                                                         | 48                                                                                                                                                                                    | 102                                                                                                                     |
| 3                                                                                  | 48                                                                                                              | 63,7–18,5                                                                                 | 45,2                                                                         | 50                                                                                                                                                                                    | 101                                                                                                                     |
| 4                                                                                  | 49                                                                                                              | 63,7–18,5                                                                                 | 45,2                                                                         | 51                                                                                                                                                                                    | 102                                                                                                                     |
| 5                                                                                  | 48                                                                                                              | 63,7–18,5                                                                                 | 45,2                                                                         | 49                                                                                                                                                                                    | 100                                                                                                                     |
| Скважина Арктическая 11/Arcticheskaya 11 well                                      |                                                                                                                 |                                                                                           |                                                                              |                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                         |
| 1                                                                                  | 107                                                                                                             | 92,0–0                                                                                    | 92,0                                                                         | 56                                                                                                                                                                                    | 140                                                                                                                     |
| 2                                                                                  | 128                                                                                                             | 102,0–0                                                                                   | 102,0                                                                        | 54                                                                                                                                                                                    | 145                                                                                                                     |
| 3                                                                                  | 127                                                                                                             | 100,0–0                                                                                   | 100,0                                                                        | 56                                                                                                                                                                                    | 149                                                                                                                     |
| 4                                                                                  | 132                                                                                                             | 102,0–0                                                                                   | 102,0                                                                        | 58                                                                                                                                                                                    | 154                                                                                                                     |
| 5                                                                                  | 131                                                                                                             | 102,0–0                                                                                   | 102,0                                                                        | 58                                                                                                                                                                                    | 152                                                                                                                     |
| Скважина Бованенковская 116/Bovanenkovskaya 116 well                               |                                                                                                                 |                                                                                           |                                                                              |                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                         |
| 1                                                                                  | 98                                                                                                              | 89,0–0                                                                                    | 89,0                                                                         | 57                                                                                                                                                                                    | 120                                                                                                                     |
| 2                                                                                  | 122                                                                                                             | 100,0–0                                                                                   | 100,0                                                                        | 56                                                                                                                                                                                    | 127                                                                                                                     |
| 3                                                                                  | 123                                                                                                             | 100,0–0                                                                                   | 100,0                                                                        | 59                                                                                                                                                                                    | 132                                                                                                                     |
| 4                                                                                  | 128                                                                                                             | 100,0–0                                                                                   | 100,0                                                                        | 62                                                                                                                                                                                    | 138                                                                                                                     |
| 5                                                                                  | 116                                                                                                             | 92,0–0                                                                                    | 92,0                                                                         | 60                                                                                                                                                                                    | 133                                                                                                                     |

Примечание. Коричневой заливкой показаны варианты оптимальные (приемлемые) по критерию «невязки».

Note. The optimal variants (accepted) by «residual» criterion are filled with brown.

Расчет интегрального показателя  $R$  (табл. 5) – экспресс-расчет плотности генерации китербютских нефтей – дает максимальное или несколько большее значение для *варианта 4*, наиболее приемлемого по критерию «невязки». Максимальный расчетный эффект достигается по причине боль-

шого времени нахождения материнской свиты в ГЗН и наибольших геотемператур ГЗН. В этом варианте, помимо учета «арктического» векового хода температур на дневной поверхности, учтена динамика неоплейстоценовой мерзлоты. Максимальные значения примерно те же, что и в *варианте 3*, в котором учтен только один фактор палеоклимата – вековой ход температур, но на 30 % и до 3 раз больше, чем в *варианте 1*, в котором не учтен ни один фактор палеоклимата.

Достоверность результатов палеотемпературного моделирования, выполненного на Малоямальной, Арктической и Бованенковской площадях, подтверждается хорошей согласованностью полученных расчетных значений плотности теплового потока (51–58–62 мВт/м<sup>2</sup>) с экспериментальными определениями плотности теплового потока для п-ва Ямал: 47–58 мВт/м<sup>2</sup>, при установленной закономерности увеличения плотности теплового потока в северо-западном направлении [40].

Как было отмечено выше, китербютская свита является источником формирования залежей УВ в ловушках нижнеюрского и, возможно, доюрского НГК. В этой связи важно оценить согласованность очагов интенсивной генерации китербютских нефтей, выделенных по геотемпературному критерию в разрезах скважин, с результатами испытаний нижнеюрских пластов (табл. 1).

На Малоямальной площади китербютская свита находилась в ГЗН с ганькинского времени (порядка 65 млн л назад) до основного размыва в неогене (18 млн л назад) (табл. 5). И, действительно, скважина Малоямальная 3002 вскрыла нижнеюрский пласт Ю<sub>10</sub> с признаками нефтеносности.

На Арктической площади китербютская свита находится в ГЗН с маррессалинского времени (порядка 100 млн л назад). А в период с 50 млн л назад до основного размыва в неогене свита входила в нижнюю зону газообразования (НЗГ), прогреваясь до 154 °С (табл. 5). Но, к сожалению, в нижнеюрских пластах Ю<sub>10</sub> и Ю<sub>11</sub>, вскрытых скважиной Арктическая 11, притоков флюида не получено – «сухо».

На Бованенковской площади китербютская свита находится в ГЗН с маррессалинского времени (порядка 100 млн л назад). А в течении порядка 15 млн л, до основного размыва в неогене, свита вплотную приближалась к НЗГ, прогреваясь до 133 °С (табл. 3, 5). И, действительно, скважина Бованенковская 116 вскрыла нефтегазонасыщенные пласты Ю<sub>6</sub>, Ю<sub>10</sub> и Ю<sub>12</sub>.

## Выводы

1. На представительных мезозойского-кайнозойских разрезах Малоямального, Арктического и Бованенковского месторождений, расположенных в южном, центральном и северном районах п-ва Ямал, установлено, что неучет инди-

- видуальных для региона «арктического» векового хода температур на поверхности Земли и толщи неоплейстоценовой мерзлоты не позволяет адекватно восстановить термическую историю нефтематеринских нижнеюрских китербютских отложений. Учет «арктического» векового хода температур, неоплейстоценовой мерзлоты позволяет корректно восстановить термическую историю китербютских отложений.
- Учет палеоклимата обуславливает увеличение расчетного палеотемпературного максимума в истории китербютских отложений на площадях п-ва Ямал на 5–18 °С, обуславливает наиболее точную термическую историю материнских отложений, а следовательно, обеспечивает наибольшую расчетную плотность генерации китербютских нефтей.
  - Полученные результаты по оценке роли позднечетвертичных ледниковых покровов (в районе п-ва Ямал) позволяют отметить несущественное влияние ледникового покрова на термический режим материнских китербютских отложений, имеющий ключевое значение для процессов генерации УВ.
  - Достоверность результатов палеотемпературного моделирования уверенно контролируется классическим геофизическим критерием «невязки», сопоставлением с экспериментальными данными о тепловом потоке на территории исследований, согласованностью с данными бурения и испытания скважин.
  - При определении ресурсов УВ объёмно-генетическим методом на землях арктического региона Западной Сибири рекомендуется применять «арктический» вековой ход температур и учитывать динамику толщи неоплейстоценовой мерзлоты мощностью 300–600 м. В случае неучета толщ многолетней мерзлоты и палеоклиматического хода температур расчетные ресурсы УВ могут быть занижены от 30 % до 3-х раз.
  - Полученные результаты для китербютской свиты арктического региона Западной Сибири вполне согласуются с характером ранее полученных оценок существенного влияния мезозойско-кайнозойского климата на геотермический режим баженновской свиты п-ва Ямал [15, 16].

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

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Особенности геологического строения зоны сочленения Карского моря и Гыданского полуострова и прогноз ее нефтегазоносности / В.С. Бочкарев, А.М. Брехунцов, М.О. Кочергин, И.И. Нестеров (мл.), Д.А. Огнев // Горные ведомости. – 2010. – № 10. – С. 6–18.
- Historical-geological modeling of hydrocarbon generation in the mesozoic–cenozoic sedimentary basin of the Kara sea (basin modeling) / A.E. Kontorovich, L.M. Burshtein, N.A. Malyshev, P.I. Safronov, S.A. Gus'kov S.A., S.V. Ershov, V.A. Kazanenko, N.S. Kim, V.A. Kontorovich, E.A. Kostyeva, V.N. Melenevsky, V.R. Livshits, A.A. Polyakov, M.B. Skvortsov // Russian Geology and Geophysics. – 2013. – V. 54. – № 8. – P. 1179–1226.
- Connal J. Time-temperature relation in oil genesis // AAPG Bull. – 1974. – V. 58. – P. 2516–2521.
- Depositional environments, organic richness, and petroleum generating potential of the Campanian to Maastrichtian Enugu formation, Anambra basin, Nigeria / S.O. Akande, O.J. Ojo, B.D. Erdtmann, M. Hetenyi // The Pacific Journal of Science and Technology. – 2009. – V. 10. – P. 614–628.
- Galushkin Y.I., Sitar K.A., Kunitsyna A.V. Numerical modeling of the organic matter transformation in the sedimentary rocks of the northeastern Sakhalin shelf // Oceanology. – 2011. – V. 51. – № 3. – P. 491–501.
- Kosakowski P., Wrobel M., Krzywiec P. Modelling hydrocarbon generation in the Palaeozoic and Mesozoic successions in the Poland West Ukraine // J. Petroleum Geol. Sci. Press Ltd. – 2013. – V. 36. – № 2. – P. 139–162.
- Maturity and petroleum systems modelling in the offshore Zambezi delta depression and Angoche basin, Northern Mozambique / E.S. Mahanjane, D. Franke, R. Lutz, J. Winsemann, A. Ehrhardt, K. Berglar, C. Reichert // J. Petroleum Geol. Sci. Press Ltd. – 2014. – V. 37. – № 4. – P. 329–348.
- Isaev V.I., Lobova G.A., Osipova E.N. The oil and gas contents of the Lower Jurassic and Achimovka reservoirs of the Nyuro'l'ka megadepression // Russian Geology and Geophysics. – 2014. – V. 55. – P. 1418–1428.
- Razvozhayeva E.P., Prokhorova P.N., Lapkovskii V.V. Numerical Modeling of the Tectonic and Thermal History of the Kyndal Graben of the Bureya Basin (Far East of Russia) // Russian Journal of Pacific Geology. – 2017. – V. 11. – № 3. – P. 205–222.
- Kurchikov A.R. The geothermal regime of hydrocarbon pools in West Siberia // Russian Geology and Geophysics. – 2001. – V. 42. – № 11–12. – P. 678–689.
- Hantschel T., Kauerauf A.I. Fundamentals of basin and petroleum systems modeling. – Heidelberg: Springer, 2009. – 476 p.
- Моделирование процессов генерации, миграции и аккумуляции углеводородов в юрских и меловых комплексах Енисей-Хатангского бассейна / П.И. Сафронов, С.В. Ершов, Н.С. Ким, А.Н. Фомин // Геология нефти и газа. – 2011. – № 5. – С. 48–55.
- Галушкин Ю.И. Моделирование осадочных бассейнов и оценка их нефтегазоносности. – М.: Научный Мир, 2007. – 456 с.
- Influence of Surface Temperatures on Source Rock Maturity: an Example from the Russian Arctic / S. Nelskamp, T. Donders, J.-D. van Wess, O. Abbink // ROGTEC. – 2014. – № 18. – P. 26–35.
- Искоркина А.А. Палеоклиматические факторы реконструкции термической истории нефтематеринской баженновской свиты арктического региона Западной Сибири // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 8. – С. 59–73.
- Комплексная оценка палеоклиматических факторов реконструкции термической истории нефтематеринской баженновской свиты арктических районов Западной Сибири / В.И. Исаев, А.А. Искоркина, В.Ю. Косыгин, Г.А. Лобова, Е.Н. Осипова, А.Н. Фомин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 1. – С. 13–28.
- Богоявленский В.И., Полякова И.Д. Перспективы нефтегазоносности больших глубин Южно-Карского региона // Арктика: экология и экономика. – 2012. – № 3 (7). – С. 92–103.
- Catagenesis of organic matter at the top and base of the Jurassic complex in the West Siberian megabasin / A.E. Kontorovich,

- A.N. Fomin, V.O. Krasavchikov, A.V. Istomin // Russian Geology and Geophysics. – 2009. – V. 50. – № 11. – P. 917–929.
19. Isaev V.I., Volkova N.A., Nim T.V. Solution of direct invers sedimentation heat-flow problems // Geology of the Pacific Ocean. – 1996. – V. 12. – № 3. – P. 523–536.
20. Estimation of the Oil-and-Gas Potential of Sedimentary Depression in the Far East and West Siberia Based on Gravimetry and Geothermy Data / R.Yu. Gulenok, V.I. Isaev, V.Yu. Kosygin, G.A. Lobova, V.I. Starostenko // Russian Journal of Pacific Geology. – 2011. – V. 5. – № 4. – P. 273–287.
21. Нефтегазоносность нижнемеловых резервуаров Нюрольской мегападины / Е.Н. Осипова, Г.А. Лобова, В.И. Исаев, В.И. Старостенко // Известия Томского политехнического университета. – 2015. – Т. 326. – № 1. – С. 14–33.
22. Isaev V.I., Fomin A.N. Lofi of generation of bazhenov- and togur-type oils in the southern Nyuro'l'ka megadepression // Russian Geology and Geophysics. – 2006. – V. 47. – № 6. – P. 734–745.
23. Тектоно-седиментационная интерпретация данных геотермии при выявлении и оценке позднеэоценовой эрозии на арктических месторождениях углеводородов (п-ва Ямал) / В.И. Исаев, В.И. Старостенко, Г.А. Лобова, А.Н. Фомин, А.К. Исагалиева // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 7. – С. 19–31.
24. Модель катагенеза органического вещества (на примере баженовской свиты) / Л.М. Бурштейн, Л.В. Жидкова, А.Э. Которович, В.Н. Меленевский // Геология и геофизика. – 1997. – Т. 38. – № 6. – С. 1070–1078.
25. Старостенко В.И. Устойчивые численные методы в задачах гравиметрии. – Киев: Наук. думка, 1978. – 228 с.
26. Strakhov V.N., Golizdra G.Ya., Starostenko V.I. Theory and practice of interpreting potential fields: Evolution in the 20<sup>th</sup> century // Izvestiya – Physics of the Solid Earth. – 2000. – V. 36. – № 9. – P. 742–762.
27. Isaev V.I. Interpretation of High-Accuracy Gravity Exploration Data by Mathematic Programming // Russian Journal of Pacific Geology. – 2013. – V. 7. – № 2. – P. 92–106.
28. Исследования баженовской свиты с применением непрерывного профилирования тепловых свойств на керне / Ю.А. Попов, Е.Ю. Попов, Е.М. Чехонин, А.В. Габова, Р.А. Ромушкевич, М.Ю. Спасенных, Д.Е. Заграновская // Нефтяное хозяйство. – 2017. – № 3. – С. 22–27.
29. Zubkov M.Yu. The reservoir potential of the Bazhenov Formation: regional prediction // Russian Geology and Geophysics. – 2017. – V. 58. – № 3–4. – P. 410–415.
30. Эволюция температурного поля осадочного чехла Западно-Сибирской плиты / А.Д. Дучков, Ю.И. Галушкин, Л.В. Смирнов, Л.С. Соколова // Геология и геофизика. – 1990. – № 10. – С. 51–60.
31. McKenzie D. Some remarks on the development of sedimentary basins // Earth and Planet. Sci. Lett. – 1978. – V. 40. – P. 25–32.
32. Tissot B. Preliminary Data on the Mechanisms and Kinetics of the Formation of Petroleum in Sediments. Computer Simulation of a Reaction Flowsheet // Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP. – 2003. – V. 58. – № 2. – P. 183–202.
33. Попов С.А., Исаев В.И. Моделирование нафтидогенеза Южного Ямала // Геофизический журнал. – 2011. – Т. 33. – № 2. – С. 80–104.
34. Tectonic evolution of the Arctic onshore and offshore regions of the West Siberian petroleum province / V.A. Kontorovich, D.V. Ayunova, I.A. Gubin, A.Y. Kalinin, L.M. Kalinina, A.E. Kontorovich, N.A. Malyshev, M.B. Skvortsov, M.V. Solovlev, E.S. Surikova // Russian Geology and Geophysics. – 2017. – V. 58. – № 3–4. – P. 343–361.
35. Стратиграфия нефтегазоносных бассейнов Сибири. Кн. 9: Кайнозой Западной Сибири / под ред. В.С. Волковой. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. – 246 с.
36. Volkova V.S. Paleogene and neogene stratigraphy and paleotemperature trend of West Siberia (from palynological data) // Russian Geology and Geophysics. – 2011. – V. 52. – № 7. – P. 709–716.
37. Базы данных Государственных геологических карт ВСЕГЕИ. Карта дочетвертичных образований R (40)-41, R-43, 44(45). URL: <http://www.vsegei.ru/ru/info/georesource/> (дата обращения 13.09.2017).
38. Черданцев С.Г., Огнев Д.А., Кириченко Н.В. Неотектоника Севера Западно-Сибирского региона // Горные ведомости. – 2013. – № 8. – С. 64–73.
39. Лопатин Н.В. Концепция нефтегазовых генерационно-аккумуляционных систем как интегрирующее начало в обосновании поисково-разведочных работ // Геоинформатика. – 2006. – № 3. – С. 101–120.
40. Геотермия арктических морей / М.Д. Хуторской, В.Р. Ахмедзянов, А.В. Ермаков, Ю.Г. Леонов, Л.В. Подгорных, Б.Г. Поляк, Е.А. Сухих, Л.А. Цыбуля. – М.: ГЕОС, 2013. – 232 с.

Поступила 15.11.2017 г.

#### Информация об авторах

**Искоркина А.А.**, кандидат геолого-минералогических наук, ассистент отделения геологии Национального исследовательского томского политехнического университета.

**Прохорова П.Н.**, аспирант отделения геологии Национального исследовательского томского политехнического университета.

**Стоцкий В.В.**, аспирант, ассистент отделения геологии Национального исследовательского томского политехнического университета.

**Фомин А.Н.**, доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией геохимии нефти и газа Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

UDC 553.98(571)

## RECONSTRUCTIONS OF GEOTHERMAL MODE OF THE PETROMATERNAL KITERBUTSK SUITE OF THE ARCTIC REGION IN WESTERN SIBERIA TAKING INTO ACCOUNT THE INFLUENCE OF PALEOCLIMATE

**Albina A. Iskorkina**<sup>1</sup>,  
iskorkina.a@mail.ru

**Polina N. Prokhorova**<sup>1</sup>,  
prokhorova.polina1988@gmail.com

**Vitaly V. Stoskiy**<sup>1</sup>,  
Stoskiy\_VV@sibmail.com

**Aleksandr N. Fomin**<sup>2</sup>,  
fominan@ipgg.sbras.ru

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

<sup>2</sup> Institute of Petroleum Geology and Geophysics named after A.A. Trofimuk SB RAS,  
3, Ac. Koptueg Avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

**The relevance.** The Arctic regions of Western Siberia became a priority area of research and exploration. They have the unique paleoclimate features, the inversion sedimentation in Paleogene-Neogene and the considerable variations of petromaternal deposit characteristics. This causes the necessity to improve schemes and determine parameters of quantitative assessment of hydrocarbon resources by volume-genetic method based on geotemperature mode paleoreconstructions of petromaternal deposit.

**The main aim** of the research is to identify and estimate the impact of paleoclimate factors – temperature secular variation of the Earth surface and Neo-Pleistocene permafrost thicknesses, glacial covers – on the settlement geothermal mode of the petromaternal Early Jurassic Kiterbutsk suite.

**Object:** Kiterbutsk deposit of Mesozoic and Cenozoic sections opened by deep wells on areas of Maloyamalskoye, Arkticheskoye and Bovanenkovskoye fields (Yamal peninsula).

**Method of the research** is based on the original computer paleotemperature modeling considering the parameters of sedimentation history and the history of thermophysical properties of sedimentary thickness, including permafrost rocks and glaciers, and not demanding aprioristic data on the origin and quantity of deep heat flow.

**Research results** of the representative Mesozoic-Cenozoic sections of the fields located in southern, central and northern regions of Yamal peninsula, allowed drawing the conclusions and making recommendations. Consideration of the paleoclimate causes the most accurate thermal history of maternal deposits, increase in 5–18 °C the calculated paleotemperature maximum in the history of Kiterbutsk deposit. The authors recommend to apply the unique for the area «arctic» secular temperature variation and take into account the dynamics of permafrost Neo-Pleistocene strata about of 300–600 meters in determining the kiterbutsk petroleum resources by volumetric-genetic method on the territory of Arctic region. The authors noted insufficient influence of glacial cover on thermal mode reconstruction. When neglecting the permafrost and paleoclimate secular temperatures variation the calculated hydrocarbon resources may be undervalued from 30 percent to triple. The reliability of conclusions is confidently controlled by the geophysical «residual» criterion, comparing with experimental heat flow data of the studied area and consistency with data of drilling and testing wells.

### Key words:

Paleoclimate, geotemperature mode, petromaternal Kiterbutsk deposits, resources, Yamal Peninsula.

*The research was partially financially supported by the RFBR within the scientific project no. 16–35–00080 мол\_a.*

### REFERENCES

1. Bochkarev V.S., Brehuncov A.M., Kochergin M.O., Nestorov I.I. (Jr.), Ognev D.A. Features of a geological structure of a zone of a joint of the Kara Sea and Gydan Peninsula and forecast of its oil-and-gas potential. *Mountain sheets*, 2010, no. 10, pp. 6–18. In Rus.
2. Kontorovich A.E., Burshtein L.M., Malyshev N.A., Safonov P.I., Gus'kov S.A., Ershov S.V., Kazanenko V.A., Kim N.S., Kontorovich V.A., Kostyreva E.A., Melenevskiy V.N., Livshits V.R., Polyakov A.A., Skvortsov M.B. Historical-geological modeling of hydrocarbon generation in the Mesozoic-Cenozoic sedimentary basin of the Kara sea (basin modeling). *Russian Geology and Geophysics*, 2013, vol. 54, no. 8, pp. 1179–1226.
3. Connan J. Time-temperature relation in oil genesis. *AAPG Bull.*, 1974, vol. 58, pp. 2516–2521.
4. Akande S.O., Ojo O.J., Erdtmann B.D., Hetenyi M. Depositional environments, organic richness, and petroleum generating potential of the Campanian to Maastrichtian Enugu formation, Anambra basin, Nigeria. *The Pacific Journal of Science and Technology*, 2009, vol. 10, pp. 614–628.
5. Galushkin Y.I., Sitar K.A., Kunitsyna A.V. Numerical modeling of the organic matter transformation in the sedimentary rocks of the northeastern Sakhalin shelf. *Oceanology*, 2011, vol. 51, no. 3, pp. 491–501.
6. Kosakowski P., Wrobel M., Krzywiec P. Modelling hydrocarbon generation in the Palaeozoic and Mesozoic successions in the Po-

- land West Ukraine. *J. Petroleum Geol. Sci. Press Ltd*, 2013, vol. 36, no. 2, pp. 139–162.
7. Mahanjane E.S., Franke D., Lutz R., Winsemann J., Ehrhardt A., Berglar K., Reichert C. Maturity and petroleum systems modeling in the offshore Zambezi delta depression and Angoche basin, Northern Mozambique. *J. Petroleum Geol. Sci. Press Ltd*, 2014, vol. 37, no. 4, pp. 329–348.
8. Isaev V.I., Lobova G.A., Osipova E.N. The oil and gas contents of the Lower Jurassic and Achimovka reservoirs of the Nyuroł'ka megadepression. *Russian Geology and Geophysics*, 2014, v. 55, pp. 1418–1428.
9. Razvozhayeva E.P., Prokhorova P.N., Lapkovskii V.V. Numerical Modeling of the Tectonic and Thermal History of the Kyndal Graben of the Bureya Basin (Far East of Russia). *Russian Journal of Pacific Geology*, 2017, vol. 11, no. 3, pp. 205–222.
10. Kurchikov A.R. The geothermal regime of hydrocarbon pools in West Siberia. *Russian Geology and Geophysics*, 2001, vol. 42, no. 11–12, pp. 678–689.
11. Hantschel T., Kauerauf A.I. *Fundamentals of basin and petroleum systems modeling*. Heidelberg, Springer, 2009. 476 p.
12. Safronov P.I., Ershov S.V., Kim N.S., Fomin A.N. Modeling of processes of generation, migration and accumulation of hydrocarbons in the Jurassic and cretaceous complexes of the Yenisei-Khatanga basin. *Oil and gas geology*, 2011, no. 5, pp. 48–55. In Rus.
13. Galushkin Yu.I. *Modelirovanie osadochnykh basseynov i otsenka ikh neftegazonosnosti* [Modeling decantation basins and assessment of their petroleum potential]. Moscow, Nauchny mir Publ., 2007. 456 p.
14. Nelskamp S., Donders T., van Wess J.-D., Abbink O. Influence of Surface Temperatures on Source Rock Maturity: An Exaple from the Russian Artic. *ROGTEC*, 2014, no. 18, pp. 26–35.
15. Iskorkina A.A. Paleoclimate factors of reconstruction of thermal history of the petromaternal Bazhenov suite of the Arctic region of Western Siberia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 8, pp. 59–73. In Rus.
16. Isaev V.I., Iskorkina A.A., Kosygin V.Yu., Lobova G.A., Osipova E.N., Fomin A.N. Complex assessment of paleoclimatic factors of reconstruction of thermal history of the petromaternal Bazhenov suite of the Arctic districts of Western Siberia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 1, pp. 13–28.
17. Bogoyavlensky V.I., Polyakova I.D. Petroleum potential of the great depths of the South Kara region. *Arctic: ecology and economy*, 2012, no. 3 (7), pp. 92–103. In Rus.
18. Kontorovich A.E., Fomin A.N., Krasavchikov V.O., Istomin A.V. Catagenesis of organic matter at the top and base of the Jurassic complex in the West Siberian megabasin. *Russian Geology and Geophysics*, 2009, vol. 50, no. 11, pp. 917–929.
19. Isaev V.I., Volkova N.A., Nim T.V. Solution of direct invers sedimentation heat-flow problems. *Geology of the Pacific Ocean*, 1996, vol. 12, no. 3, pp. 523–536.
20. Gulenok R.Yu., Isaev V.I., Kosygin V.Yu., Lobova G.A., Starostenko V.I. Estimation of the Oil-and-Gas Potential of Sedimentary Depression in the Far East and West Siberia Based on Gravimetry and Geothermy Data. *Russian Journal of Pacific Geology*, 2011, vol. 5, no. 4, pp. 273–287.
21. Osipova E.N., Lobova G.A., Isaev V.I., Starostenko V.I. Oil and gas reservoirs of Lower Nuroł'ka megahollow. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2015, vol. 326, no. 1, pp. 14–33. In Rus.
22. Isaev V.I., Fomin A.N. Lofi of generation of bazhenov- and togur-type oils in the southern Nyuroł'ka megadepression. *Russian Geology and Geophysics*, 2006, vol. 47, no. 6, pp. 734–745.
23. Isaev V.I., Starostenko V.I., Lobova G.A., Fomin A.N., Isagaliyeva A.K. Tectonic sedimentation interpretation of geothermic data at identification and assessment of a late Eocene erosion on the Arctic fields of hydrocarbons (the peninsula of Yamal). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 7, pp. 19–31. In Rus.
24. Burshteyn L.M., Zhidkova L.V., Kontorovich A.E., Melenevskiy V.N. Model katagenesis organic matter (for example, the Bazhenov formation). *Russian Geology and Geophysics*, 1997, vol. 38, no. 6, pp. 1070–1078. In Rus.
25. Starostenko V.I. *Ustoychivye chislennyye metody v zadachakh gravimetrii* [Steady numerical methods in problems of gravitation measurements]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1978. 228 p.
26. Strakhov V.N., Golizdra G.Ya., Starostenko V.I. Theory and practice of interpreting potential fields: Evolution in the 20<sup>th</sup> century. *Izvestiya – Physics of the Solid Earth*, 2000, vol. 36, no. 9, pp. 742–762.
27. Isaev V.I. Interpretation of High\_Accuracy Gravity Exploration Data by Mathematic Programming. *Russian Journal of Pacific Geology*, 2013, vol. 7, no. 2, pp. 92–106.
28. Popov Yu.A., Popov E.Yu., Chehonin E.M., Gabova A.V., Romushkevich R.A., Spasennyh M.Yu., Zagranovskaya D.E. Researches of the Bazhenov suite with application of continuous profiling of thermal properties on a core. *Oil Industry*, 2017, no. 3, pp. 22–27. In Rus.
29. Zubkov M.Yu. The reservoir potential of the Bazhenov Formation: regional prediction. *Russian Geology and Geophysics*, 2017, vol. 58, no. 3–4, pp. 410–415.
30. Duchkov A.D., Galushkin Yu.I., Smirnov L.V., Sokolova L.S. The evolution of the temperature field of the sedimentary cover of the West Siberian plate. *Russian Geology and Geophysics*, 1990, vol. 10, pp. 51–60. In Rus.
31. McKenzie D. Some remarks on the development of sedimentary basins. *Earth and Planet. Sci. Lett.*, 1978, vol. 40, pp. 25–32.
32. Tissot B. Preliminary Data on the Mechanisms and Kinetics of the Formation of Petroleum in Sediments. Computer Simulation of a Reaction Flowsheet. *Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP*, 2003, vol. 58, no. 2, pp. 183–202.
33. Popov S.A., Isaev V.I. Modeling of naphthyogenesis in Southern Yamal. *Geophysical journal*, 2011, vol. 33, no. 2, pp. 80–104. In Rus.
34. Kontorovich V.A., Ayunova D.V., Gubin I.A., Kalinin A.Y., Kalinina L.M., Kontorovich A.E., Malyshev N.A., Skvortsov M.B., Solovov M.V., Surikova E.S. Tectonic evolution of the Arctic onshore and offshore regions of the West Siberian petroleum province. *Russian Geology and Geophysics*, 2017, vol. 58, no. 3–4, pp. 343–361.
35. *Stratigrafiya neftegazonosnykh basseynov Sibiri. Kn. 9: Kaynozoy Zapadnoy Sibiri* [Stratigraphy of oil and gas bearing basins of Siberia. B. 9: The Cenozoic of Western Siberia]. Novosibirsk, SO RAN Publ., 2002. 246 p.
36. Volkova V.S. Paleogene and neogene stratigraphy and paleotemperature trend of West Siberia (from palynological data). *Russian Geology and Geophysics*, 2011, vol. 52, no. 7, pp. 709–716.
37. Bazy dannyykh Gosudarstvennykh geologicheskikh kart VSEGEI. Karta dochetvertichnykh obrazovany R (40)–41, R-43, 44(45) [Databases of the State geological cards of VSEGEI. Map of Pre-Quaternary formations R (40)–41, R-43, 44 (45)]. Available at: <http://www.vsegei.ru/ru/info/georesource/> (accessed 13 September 2017).
38. Cherdancev S.G., Ognev D.A., Kirichenko N.V. Neotektonics of the North of the West Siberian region. *Mountain sheets*, 2013, no. 8, pp. 64–73. In Rus.
39. Lopatin N.V. The concept of oil and gas generative and accumulative systems as the integrating beginning in justification of exploration. *Geoinformatika*, 2006, no. 3, pp. 101–120. In Rus.
40. Khutorskoy M.D., Akhmedzyanov V.R., Ermakov A.V., Leonov Yu.G., Podgornyykh L.V., Polyak B.G., Sukhikh E.A., Cubulia L.A. *Geotermiya arkticheskikh morey* [Geothermic of the Arctic seas]. Ed. by Yu.G. Leonov. Moscow, GEOS Publ., 2013. 232 p.

Received: 15 November 2017.

**Information about the authors**

***Albina A. Iskorkina***, assistant, National Research Tomsk Polytechnic University.

***Polina N. Prokhorova***, postgraduate, National Research Tomsk Polytechnic University.

***Vitaly V. Stoskiy***, postgraduate, assistant, National Research Tomsk Polytechnic University.

***Aleksandr N. Fomin***, Dr. Sc., head of the laboratory, Institute of Petroleum Geology and Geophysics named after A.A. Trofimuk SB RAS.

УДК 621.313.33: 62–5

## СПОСОБ КОСВЕННОЙ ЗАЩИТЫ ОТ ПЕРЕГРЕВА ДЛЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ГОРНО-ШАХТНЫХ УСТАНОВОК

Брейдо Иосиф Вульфович<sup>1</sup>,

jbreido@kstu.kz

Семькина Ирина Юрьевна<sup>2</sup>,

siyu.eav@kuzstu.ru

Нурмаганбетова Гулим Сахитовна<sup>1</sup>,

g\_sahitovna@mail.ru

<sup>1</sup> Карагандинский государственный технический университет,  
Казахстан, 100027, г. Караганда, Бульвар Мира, 56.

<sup>2</sup> Институт энергетики Кузбасского государственного технического университета им. Т.Ф. Горбачева,  
Россия, 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28.

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью разработать надежную тепловую защиту нерегулируемых асинхронных электроприводов машин и установок горной промышленности, в частности для оборудования подземных горных работ и процессов обогащения. Ключевой особенностью данной задачи является функционирование горно-шахтного электрооборудования в заведомо сложных условиях высокой запыленности и загазованности, включая риск взрыва или пожара вследствие перегрева наружных поверхностей из-за возникновения неисправности, а также эксплуатацию таких электроприводов в повторно-кратковременных режимах с частыми пусками и тяжелыми условиями работы, характеризующимися изменением нагрузки в широких пределах, длительной работой при нагрузках, выше номинального значения, остановами с последующим запуском двигателя с максимально допустимым моментом сопротивления. Применение для решения данной задачи методов непосредственного измерения температуры оказывается невозможным, поскольку большая часть рассматриваемых асинхронных двигателей не оснащается встроенными термодатчиками. Прямые методы защиты асинхронных электродвигателей от перегрева на основе время-токовой и тепловой токовой защиты не учитывают температуру окружающей среды, различные варианты теплоотвода в электродвигателях горно-шахтных установок, обусловленные условиями их эксплуатации, а в случае останова двигателя после перегрева вследствие перегрузки, при нормализации нагрузки допустят запуск неостывшего двигателя, поскольку фактически эти способы контролируют величину тока, протекающего в питающей цепи, но не нагрев двигателя. Таким образом, тепловая защита электроприводов таких установок, как скребковые и ленточные конвейеры, буровые установки, очистные и проходческие комбайны, компрессорные установки, пульпонасосы и аналогичных, может быть построена только на базе косвенных методов, один из которых рассматривается в данной работе. Внедрение результатов исследования позволит снизить аварийность электроприводов горнодобывающей промышленности, добиться увеличения срока эксплуатации электрооборудования и обеспечить повышение безопасности ведения горных работ.

**Цель:** разработка устройства защиты от перегрева статорных обмоток для нерегулируемых асинхронных электродвигателей машин и установок горной промышленности на базе косвенных методов.

**Объекты:** асинхронный электродвигатель нерегулируемого электропривода машин и установок горной промышленности; устройство косвенной защиты от перегрева.

**Методы:** положения теории электропривода; компьютерное моделирование динамических процессов; планирование эксперимента и обработка результатов.

**Результаты.** Доказана связь количества пусковых пульсаций тока в асинхронных электродвигателях с температурой нагрева обмоток электродвигателя. Выявлена линейная зависимость между количеством пусковых пульсаций тока и нагревом обмоток электродвигателей в повторно-кратковременных режимах работы в диапазоне температур до 200 °С. Установлена предельная мощность электродвигателя, для которой определение температуры обмоток предлагаемым методом проводится с погрешностью менее 2 %.

### Ключевые слова:

Горно-шахтное электрооборудование, нерегулируемый электропривод, асинхронный электродвигатель, тепловая защита, температура нагрева обмоток статора, пульсации пусковых токов.

### Введение

Горная промышленность является одной из ключевых ресурсных отраслей Российской Федерации. Согласно [1], с учетом транспортировки полезных ископаемых, энергоснабжения, производства материальных ресурсов и прочих видов деятельности, связанных с добычей полезных ископаемых, вклад этой отрасли в ВВП может достигать 50–60 %, а стоимость продукции, создаваемой одним работником горной промышленности, эквива-

лентна 130 среднедушевым доходам. Однако в настоящее время в связи с задачами импортозамещения в отрасли назревает острая необходимость внедрения современного оборудования, произведенного в России или союзных государствах, в особенности в части оборудования подземных горных работ и процессов обогащения.

Важное место в решении этой задачи занимает разработка электротехнических элементов и систем, обеспечивающих нормальное функциониро-

вание технологического оборудования, например, скребковых и ленточных конвейеров, буровых установок, очистных и проходческих комбайнов, компрессорных установок, пульпонасосов и т. д. При этом следует учитывать, что горно-шахтное электрооборудование эксплуатируется в заведомо сложных условиях высокой запыленности и загазованности, включая вероятность взрыва или пожара вследствие возникновения неисправности. В связи с этим к горно-шахтному электрооборудованию предъявляются повышенные требования по обеспечению надежности срабатывания защитной аппаратуры.

По статистике эксплуатации горно-шахтного электрооборудования [2] наиболее распространенными являются следующие аварии и неисправности: утечка на землю и короткие замыкания между фазами; обрыв или повреждение силовых цепей и цепей управления; нарушение целостности заземления; перегрузка по току. Последнее представляет собой большую опасность, поскольку вследствие длительных перегрузок, ухудшения условий охлаждения, обрыва фазы сети или работы в неполнофазном режиме, частых или затянувшихся пусков электродвигателей, а также заклинивания их ротора возможен недопустимый нагрев наружных поверхностей электрооборудования.

Все указанные факторы свидетельствуют о необходимости разработки надежных современных устройств защиты горно-шахтного электрооборудования от перегрузки. При этом важно учитывать, что подавляющее большинство рассматриваемых электроприемников носит характер асинхронной электродвигательной нагрузки, а значительная часть асинхронных двигателей (АД) установок горнодобывающей промышленности работают в повторно-кратковременных режимах (S3, S4 и S5) с частыми пусками и остановками и имеют крайне тяжелые режимы нагружения, в которых возможно изменение нагрузки в широких пределах, в том числе частые перегрузки, длительная работа при нагрузках выше номинального значения, останов и запуск двигателя с максимальной нагрузкой и т. п. Помимо угрозы взрыва и пожара вследствие перегрева поверхностей, вызванного длительной перегрузкой, особенности режима нагружения электроприводов вызывают перегрев самого АД и сокращают срок его эксплуатации [3].

Следует отметить, что модернизация электроприводов горной промышленности в последние годы идет достаточно активно, причем как для оборудования подземного взрывозащищенного исполнения и обогатительных производств, так и для вспомогательного оборудования. Однако поскольку в большинстве применяемых АД отсутствуют встроенные датчики температуры [4–7], необходимость в защите от перегрева вследствие перегрузок для таких электродвигателей может быть реализована только с использованием косвенных методов защиты от перегрева, основанных на измерениях тока статора. Разработка для нерегулируемых

асинхронных электродвигателей горно-шахтного оборудования устройств защиты от перегрева статорных обмоток на базе косвенных методов позволит значительно повысить надежность и продолжительность работы АД в режимах с частыми пусками [8] и обеспечит повышение безопасности ведения горных работ.

#### Анализ существующих методов

Применяемые в настоящее время методы тепловой защиты нерегулируемых электроприводов можно разделить на непосредственные, прямые и косвенные.

Непосредственные методы предполагают установку на двигателе приборов и устройств, определяющих либо реагирующих на температуру какой-либо конструктивной части двигателя. Это могут быть как стандартные встроенные датчики – биметаллические пластины либо терморезисторы, так и интеллектуальные устройства. Например, «умный датчик» [9], обеспечивающий удаленный мониторинг состояния низковольтных асинхронных двигателей с передачей данных по беспроводным сетям. Это устройство предполагает накладной монтаж на двигатель и представляет собой объединенный в едином корпусе набор чувствительных элементов, а также интеллектуальную систему со специальным алгоритмом, способным определять ряд технических параметров двигателя, влияющих на его работоспособность, в том числе температуру поверхности двигателя. Недостатком интеллектуальных устройств является недоступность их установки и эксплуатации в условиях некоторых производств, например, в горнодобывающей промышленности.

Прямые методы защиты асинхронных электродвигателей от перегрева в настоящее время реализованы на основе время-токовой и тепловой токовой защиты.

Время-токовая защита [10–12] основана на измерении величины тока статора и вычислении времени задержки на отключение электродвигателя от источника электроэнергии в функции величины тока. Кроме того, этот способ не учитывает температуру окружающей среды, что не позволяет в полной мере использовать нагрузочную способность электродвигателя.

В подавляющем большинстве двигателей, находящихся в эксплуатации, используется тепловая токовая защита [12–15]. К недостаткам данного способа следует отнести большую погрешность в определении температурных постоянных времени электродвигателя и отсутствие контроля температуры окружающей среды, что значительно снижает эффективность защиты и надежность электропривода в целом.

Общий недостаток этих способов заключается в том, что не учитываются различные варианты теплоотвода в электродвигателях, обусловленные условиями эксплуатации, включая температуру окружающей среды. Кроме того, в случае запуска

двигателя после длительного перегруза и последующего останова, когда двигатель еще не успел остыть, но нагрузка уже пришла в пределы нормы, такие защиты не смогут предотвратить функционирование перегретого двигателя, поскольку фактически эти способы контролируют величину тока, протекающего через силовые контакты пускателей, но не нагрев электродвигателей.

Косвенные методы защиты основаны на оценивании температуры статора  $\tau_s$  или ротора  $\tau_r$  двигателя. Их общая классификация показана в [16].

Некоторые косвенные методы направлены на оценку температурного режима АД посредством анализа информации о его токах и напряжениях с последующим использованием этих данных в тепловой модели двигателя. Например, в [17] предложены варианты определения температуры статора  $\tau_s$  и ротора  $\tau_r$  двигателя с использованием его электрической, механической и тепловой моделей, построенные на оценке тепловых потерь двигателя по токам статора и ротора. Особенностью подхода является то, что в модели двигателя учитывается изменение сопротивления обмотки ротора  $R_r$  в зависимости от скольжения, т. е. область применения такого метода определения температуры являются широкополосные двигатели. В связи с этим метод [17] мог бы быть применим для двигателей, использующихся в горнодобывающей промышленности, однако область его применения является предметом отдельного исследования, поскольку следует отметить, что в модели двигателя не учитывается зависимость сопротивления обмоток от температуры.

Несколько иной подход применяется и в [16], где автор использует гибридную тепловую и электромеханическую модель двигателя полного порядка, в которой также анализируются токи и напряжения двигателя, оцениваются сопротивление статора  $R_s$  и индуктивность статора  $L_s$ , а учитывая взаимосвязь этих параметров с температурой, с помощью тепловой модели определяется  $\tau_s$ . Недостатком данного подхода является необходимость выполнять достаточно сложные вычисления для решения динамических моделей высокого порядка.

Близкими, по сути, являются косвенные методы определения температуры, в основе работы которых лежит только электромеханическая динамическая модель АД, а для функционирования используется паспортные данные двигателя и измеренные токи и напряжения. Например, в [18] предлагается следующий способ оценки температуры ротора. На основе анализа векторов тока и напряжения определяется основная частота питающего напряжения и составляющие токов прямой последовательности. Из этих данных путем анализа динамической модели АД определяется постоянная времени ротора  $T_r$ , из которой вычисляется температура ротора  $\tau_r$ . Способ эффективен как в статических, так и в динамических режимах работы, однако направлен в первую очередь на определение параметров двигателя. Хотя дальнейшее использо-

вание информации о параметрах двигателя и температуре его обмоток может служить основой для устройства тепловой защиты, предусмотренный в [18] гармонический анализ требует достаточно высокой вычислительной мощности, что негативно скажется на стоимости.

Другая группа косвенных методов предполагает оценивание температуры двигателя через  $R_s$ , которое определяется по реакции двигателя на добавочные низковольтные сигналы. Так, например, авторы [19] предлагают оценивать  $R_s$  путем подачи на одну из фаз двигателя низковольтного добавочного сигнала постоянного тока. При определении сопротивления статора предусмотрена компенсация погрешности, вызванной влиянием сопротивления питающего кабеля. Однако метод [19] нацелен в большей степени не на температурную защиту, а на диагностирование условий охлаждения двигателя, таких как исправность охлаждающего вентилятора, отсутствие препятствий для свободной циркуляции воздуха, а также скопившаяся пыль или загрязнения, или блокирование вентиляционных отверстий посторонними предметами.

Подобный подход применяется в [20], где предлагается непрерывный температурный мониторинг двигателя через  $R_s$ , для оценки которого в статорную цепь вводится добавочный сигнал переменного тока, частота которого не совпадает с основной питающей частотой двигателя, а параметры определяются с использованием синхронизирующего усилителя. В [21] также используется добавочный высокочастотный сигнал, однако принципиально особенностью этого метода является использование модели двигателя, в которой отдельно описываются стержни короткозамкнутого ротора.

Необходимость дополнительных элементов питания, независимо постоянного или переменного тока, снижает удобство использования методов [19–21] в составе устройства защиты и ограничивает их применимость в специфических условиях, например, для электроприводов горнодобывающей промышленности.

Поскольку, в соответствии с требованиями безопасности, все нерегулируемые электроприводы промышленных производств оборудуются автоматическими выключателями со встроенными системами время-токовой и тепловой токовой защиты, учитывая проведенный анализ, при повторно-кратковременных режимах работы двигателей частыми пусками для повышения эффективности тепловой защиты в конструкцию автоматических выключателей следует добавить дополнительное устройство, определяющее температуру обмоток при пуске, построенное на базе косвенных методов, однако не предусматривающее добавочных сигналов и не предъявляющее высоких вычислительных требований к реализации.

#### Теоретическая база

Для решения поставленной задачи предлагается наблюдатель температуры обмотки статора АД,

основанный на измерении амплитудных значений сигналов тока статора для АД малой мощности, работающих в повторно-кратковременных режимах работы, который позволяет косвенно определить температуру асинхронного электродвигателя. Способ основан на определении количества пульсаций пусковых токов электродвигателя, которое зависит от температуры статорной обмотки.

Работа наблюдателя температуры построена на анализе работы АД с использованием классической электромеханической модели в пространстве состояний в неподвижной системе координат  $\alpha\beta$ , где в качестве переменных состояния приняты вектор тока статора и вектор потокосцепления ротора [22], которые описываются следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} u_{s\alpha} = \left( L_s + \frac{L_m^2}{L_R} \right) \left( \frac{1}{T_s} i_{s\alpha} + \frac{di_{s\alpha}}{dt} \right) - \\ - \frac{L_m}{L_R T_R} \psi_{r\alpha} - p\omega \frac{L_m}{L_R} \psi_{r\beta}; \\ u_{s\beta} = \left( L_s + \frac{L_m^2}{L_R} \right) \left( \frac{1}{T_s} i_{s\beta} + \frac{di_{s\beta}}{dt} \right) - \\ - \frac{L_m}{L_R T_R} \psi_{r\beta} + p\omega \frac{L_m}{L_R} \psi_{r\alpha}; \\ 0 = -\frac{L_m}{T_R} i_{s\alpha} + \frac{1}{T_R} \psi_{r\alpha} + \frac{d\psi_{r\alpha}}{dt} + p\omega \psi_{r\beta}; \\ 0 = -\frac{L_m}{T_R} i_{s\beta} + \frac{1}{T_R} \psi_{r\beta} + \frac{d\psi_{r\beta}}{dt} - p\omega \psi_{r\alpha}; \\ J \frac{d\omega}{dt} = p \frac{L_m}{L_R} (\psi_{r\alpha} i_{s\beta} - \psi_{r\beta} i_{s\alpha}) - M_L, \end{cases} \quad (1)$$

где  $u_{s\alpha}$ ,  $u_{s\beta}$  – составляющие вектора напряжения статора;  $i_{s\alpha}$ ,  $i_{s\beta}$  и  $\psi_{r\alpha}$ ,  $\psi_{r\beta}$  – составляющие векторов тока статора и потокосцепления ротора соответственно;  $\omega$  – угловая скорость;  $M_L$  – момент нагрузки на валу;  $J$  – момент инерции ротора;  $p$  – число пар полюсов;  $R_s$ ,  $R_R$  – активные сопротивления статора и ротора;  $L_R$ ,  $L_s$  – полные индуктивности ротора и статора;  $L_m$  – взаимная индуктивность;  $T_s$ ,  $T_R$  – постоянные времени обмоток статора и ротора:

$$T_s = \frac{L_s}{R_s}; \quad T_R = \frac{L_R}{R_R}.$$

Важно, что параметры АД в процессе эксплуатации всегда отличаются от паспортных. В связи с этим значение температуры  $\tau_s$  через сопротивление обмотки статора  $R_s$  и другие параметры двигателя в конкретный момент времени можно получить только с применением каких-либо методов оценивания параметров. Однако выше было показано, что использовать оценивание для нерегулируемых асинхронных двигателей неоправданно, т. к. это требует достаточно точных датчиков тока и напряжения, высокоскоростных микропроцес-

сорных вычислительных устройств, что значительно удорожает электропривод. Применительно к тепловой защите, поскольку при нагреве двигателя уменьшается электромагнитная постоянная времени обмотки статора [23], разрешением данного противоречия является оценка  $\tau_s$  не по  $R_s$ , а по изменению параметров протекания переходных процессов по току статора, поскольку такие изменения являются индикатором постоянной времени  $T_s$ , которая косвенно зависит от температуры.

Гипотеза о возможности оценивания  $\tau_s$  по току статора будет правомерна, если окажется возможным раздельная оценка тепловых и электромагнитных переходных процессов. Чтобы в полной мере оценить эту возможность необходима тепловая модель двигателя. В данной работе рассматривается упрощенная одномассовая тепловая модель [16], в которой тепловые потери выражены через переменные состояния электромеханической модели двигателя (1), а также принято допущение равной теплоемкости всех элементов двигателя и равенства температур обмотки ротора  $\tau_R$  и обмотки статора  $\tau_s$ :

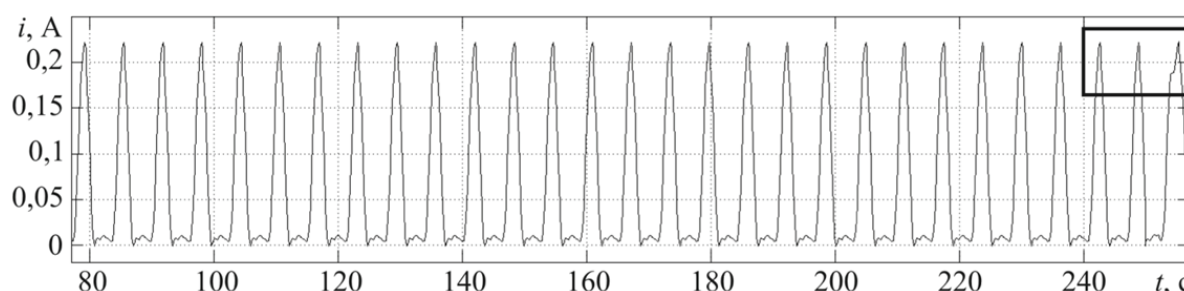
$$\begin{aligned} & \frac{i_{s\alpha}^2 + i_{s\beta}^2}{T_s} \left( L_s + \frac{L_m^2}{L_R} \right) + \\ & + \frac{\psi_{r\alpha}^2 + \psi_{r\beta}^2}{L_R T_R} - \frac{L_m}{L_R T_R} (\psi_{r\alpha} i_{s\alpha} + \psi_{r\beta} i_{s\beta}) = \\ & = \frac{C_T}{T_T} (\tau_s - \tau_A) + C_T \frac{d(\tau_s - \tau_A)}{dt}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\tau_A$  – температура окружающего воздуха;  $C_T$  – теплоемкость двигателя;  $T_T$  – тепловая постоянная времени двигателя.

Согласно [16], постоянная времени  $T_T$  может составлять от 20 до 35,5 секунд, а исходя из [4–7] значения  $T_s$  и  $T_R$  лежат в диапазоне от 0,5 до 10 миллисекунд. Исходя из этого и анализируя (1) и (2) совместно, можно утверждать, что для асинхронных двигателей динамика электромагнитных процессов существенно выше, чем для тепловых. Это позволяет разделить динамические процессы на «быстрые» и «медленные», на основании чего изменением температуры АД в начале электромагнитных и электромеханических переходных процессов можно пренебречь, следовательно, оценка температуры при пуске по изменению параметров протекания переходных процессов тока статора является правомерной.

#### Результаты исследования

Исследования выполнялись с помощью имитационного моделирования и эксперимента. В качестве объекта рассмотрены АД с номинальной частотой вращения  $n$ , 1500 об/мин, и мощностью  $P$  от 3 до 45 кВт для температур от 80 до 250 °С. Анализ подвергались переходные процессы амплитуды тока статора. Пример данных для анализа приведен на рис. 1.



**Рис. 1.** Переходной процесс амплитуды тока статора при пуске АД мощностью 3 кВт при температуре 80 °С: выделенная область показывает окончание равномерных пульсаций тока

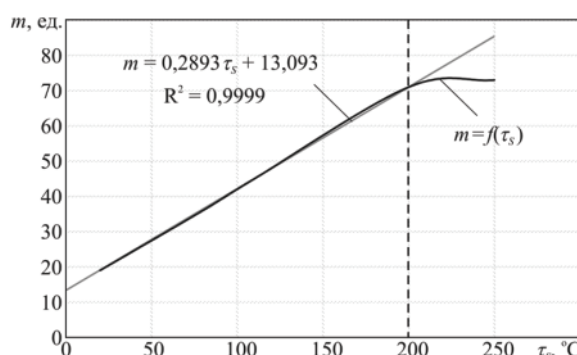
**Fig. 1.** Transients of the stator current amplitude at start-up for the 3 kW motor and stator temperature 80 °C: the selected area shows the completion of uniform current pulsations

В ходе исследований было установлено, что повышение температуры нагрева обмоток электродвигателя приводит к увеличению количества пульсаций тока статора  $m$ . Некоторые из результатов определения  $m$  представлены в таблице, а обобщенная зависимость количества пульсаций в функции температуры обмотки статора для двигателя мощностью 30 кВт показана на рис. 2, который свидетельствует, что зависимость  $m$  от  $\tau_s$  близка к линейной в пределах до 200 °С. Использование показанной зависимости для двигателя типа 4A180M4 обеспечивает определение температуры нагрева обмоток с относительной погрешностью не более 1,5 %.

**Таблица.** Результаты определения пульсаций тока для разных температур

**Table.** Results of determination of current pulsations at different temperatures

| Тип двигателя<br>Motor type | $P$ ,<br>кВт<br>kW | $n$ ,<br>об/мин<br>rpm | $\tau_s$ , °C | $m$ ,<br>ед.<br>units | Погрешность, °C<br>Accuracy, °C |
|-----------------------------|--------------------|------------------------|---------------|-----------------------|---------------------------------|
| 4A180M4                     | 3                  | 1500                   | 80            | 81                    | 1,7                             |
|                             |                    |                        | 250           | 110                   |                                 |
| 4A180M4                     | 30                 |                        | 80            | 36                    | 3                               |
|                             |                    |                        | 250           | 73                    |                                 |
| 4A200L4Y3                   | 45                 | 80                     | 11            | 8,5                   |                                 |
|                             |                    | 250                    | 31            |                       |                                 |

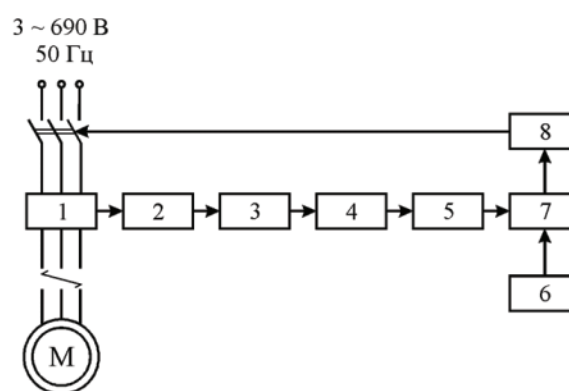


**Рис. 2.** Зависимость количества пульсаций тока от температуры статорных обмоток в режиме пуска для двигателя 4A180M4

**Fig. 2.** Dependence of current pulsation number on stator temperature at start-up for 4A180M4 motor type

Аналогичный характер данной зависимости  $m$  от  $\tau_s$  подтвержден с помощью моделирования в диапазоне мощностей двигателя от 3 до 200 кВт. Однако с увеличением мощности количество пульсаций тока уменьшается, что приводит к повышению погрешности определения температуры предложенным методом. Руководствуясь критерием обеспечения точности определения температуры для построения косвенной тепловой защиты, был задан порог относительной погрешности метода, равный 2 %. Исходя из этого установлено, что с учетом дискретности ряда мощностей АД предельная мощность электродвигателя, для которой предложенный метод будет обеспечивать заданную точность, равна 30 кВт.

Поскольку установленная зависимость количества пульсаций пускового тока от температуры обмоток линейна в диапазоне изменения температуры обмоток до 200 °С, можно утверждать, что предлагаемый способ температурной защиты подходит для асинхронных электродвигателей с любым классом изоляции от Y (90 °С) до С (более 180 °С).



**Рис. 3.** Блок-схема устройства температурной защиты: М – асинхронный электродвигатель; 1 – датчик тока; 2 – вычислитель производной сигналов тока; 3 – нуль орган; 4 – фильтр; 5 – счетчик; 6 – задатчик уставки; 7 – устройство логического сравнения; 8 – обмотка пускателя

**Fig. 3.** Thermal protection device block diagram: M is the induction motor; 1 is the current sensor; 2 is the derivation of current signals; 3 is the null detector; 4 is the filter; 5 is the counter; 6 is the setpoint adjuster; 7 is the logical comparison; 8 is the solenoid starter

Блок-схема устройства, обеспечивающего изменение количества пульсаций тока, представлена на рис. 3. Она предполагает следующий принцип работы. При каждом пуске АД осуществляется измерение амплитудных значений сигналов тока статора посредством датчика тока. Сигнал с датчика тока поступает на вход вычислителя производной сигналов тока, на выходе которого с помощью нуля-органа выделяются сигналы, равные нулю. С помощью фильтра выделяются пульсации перерегулирования тока, которые суммируются с помощью счетчика. Полученное таким образом число пульсаций логически сравнивается с заданным максимальным количеством, определяемым уставкой, а в случае превышения формируется команда на отключение обмотки пускателя, что приводит к отключению напряжения на статорной обмотке двигателя.

#### Заключение

В результате исследования установлено, что количество пусковых пульсаций тока в асинхронных

электродвигателях, работающих в повторно-кратковременных режимах (S3, S4, S5), связано с температурой нагрева обмоток электродвигателя. Выявлена линейная зависимость между количеством пусковых пульсаций тока и нагревом обмоток электродвигателей в диапазоне температуры до 200 °С. Установлено, что для двигателей мощностью до 30 кВт погрешность в определении температуры обмоток по количеству пульсаций тока составляет порядка 1,5 %.

Предлагаемый способ определения температуры статорных обмоток по количеству пусковых пульсаций тока позволяет создать эффективную тепловую защиту для асинхронных двигателей малой и средней мощности без использования встроенных датчиков температуры на основе датчиков тока статора. Данная разработка для горнодобывающей промышленности позволит не только добиться увеличения срока эксплуатации электрооборудования, но и обеспечить повышение безопасности ведения горных работ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Твердов А.А., Никишичев С.Б., Захаров В.Н. Проблемы и перспективы импортозамещения в горной отрасли // Горная Промышленность. – 2015. – № 5 (123). – С. 54–59.
2. Курбатова О.А., Павлюченко В.М. Монтаж и ремонт горных машин и электрооборудования. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2004. – 286 с.
3. Homce G.T. Early Detection of Insulation Failure: Report of Investigations. – Washington: United State department of the interior, bureau of mines, 1993. – 16 p.
4. Лихачев В.Л. Электродвигатели асинхронные. – М.: СОЛОН-Р, 2002. – 304 с.
5. Технический каталог. Научно-исследовательский проектно-конструкторский и технологический институт электромашиностроения. – Владимир: НИПТИЭМ, 2015. – 64 с.
6. Low voltage. General performance motors, 2016, 9AKK105789 EN 06–2016. URL: <http://www.abb.com/motors&generators> (дата обращения 10.10.2017).
7. SIMOTICS FD Low-Voltage Motors, 2016. Catalog D 81.8. URL: <http://www.siemens.com/simotics-fd> (дата обращения 10.10.2017).
8. Брейдо И.В., Каверин В.В., Нурмаганбетова Г.С. Определение зависимостей параметров динамической электромеханической характеристики в функции температуры // Наука настоящего и будущего: Материалы III Научно-технической конференции с международным участием. – СПб.: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», 2015. – С. 38–41.
9. ABB Ability™ Smart Sensor. Condition monitoring solution for low voltage motors: service note, 2017, 9AKK106713A3853 EN 04–2017. URL: <http://www.abb.com/smartsensor> (дата обращения 10.10.2017).
10. Юндин М.А. Токовая защита электроустановок. 2-е изд., испр. – СПб.: Изд-во «Лань», 2011. – 288 с.
11. Басс Э.И., Дорогунцев В.Г. Релейная защита электроэнергетических систем / под ред. А.Ф. Дьякова. – М.: Изд-во МЭИ, 2002. – 296 с.
12. Martin W., Eason A., Patel A.G. Low Voltage Motor Protection. – Milwaukee: Rockwell Automation, 2016. – 30 p.
13. Киреева Э.А., Цырук С.А. Релейная защита и автоматика электроэнергетических систем. – М.: Академия, 2013. – 288 с.
14. Андреев В.А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения. – М.: Высшая школа, 2006. – 640 с.
15. Plesca A.T. Thermal Analysis of Overload Protection Relays using Finite Element Method // Indian Journal of Science and Technology. – 2013. – V. 6. – Iss. 8. – P. 5120–5125.
16. Zhi Gao. Sensorless Stator Winding Temperature Estimation for Induction Machines: PhD Diss. – Atlanta, 2006. – 220 p.
17. Abdelwanis M.I., Selim F., El-Sehiemy R.A. An Efficient Sensorless Slip Dependent Thermal Motor Protection Schemes applied to Submersible Pumps // International Journal on Power Engineering and Energy (IJPEE). – 2015. – V. 6. – № 3. – P. 566–571.
18. Zhi Gao, Turner L.A., Colby R.S. Method and apparatus for estimating induction motor electrical parameters: United States Patent no. US 8,102,140 B2; Provisional application no. 61/053,941; Filed on 16.05.2008; Date of Patent 24.01.2012. – 36 p.
19. Lee Sang-Bin, Habetler T.G. A Remote and Sensorless Thermal Protection Scheme for Small Line-Connected AC Machines // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2003. – V. 39. – № 5. – P. 1323–1332.
20. Online Sensorless Induction Motor Temperature Monitoring / M.O. Sonnaillon, G. Bisheimer, C. de Angelo, G.O. Garcia // IEEE Transactions On Energy Conversion. – 2010. – V. 25. – № 2. – P. 273–280.
21. Cho Kyung-Rae, Seok Jul-Ki. Induction Motor Rotor Temperature Estimation Based on a High-Frequency Model of a Rotor Bar // IEEE Transactions On Industry Applications. – 2009. – V. 45. – № 4. – P. 1267–1275.
22. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MatLab 6.0. – СПб: Корона принт, 2001. – 320 с.
23. Брейдо И.В., Нурмаганбетова Г.С. Косвенная защита статорной обмотки асинхронного электродвигателя от превышения температуры нагрева // Автоматика. Информатика. – 2013. – № 2 (33). – С. 21–24.

Поступила 22.10.2017 г.

#### **Информация об авторах**

**Брейдо И.В.**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизации производственных процессов Карагандинского государственного технического университета.

**Семькина И.Ю.**, доктор технических наук, доцент кафедры электропривода и автоматизации, директор Института энергетики Кузбасского государственного технического университета им. Т.Ф. Горбачева.

**Нурмаганбетова Г.С.**, докторант, старший преподаватель кафедры автоматизации производственных процессов Карагандинского государственного технического университета.

UDC 621.313.33: 62–5

## METHOD OF INDIRECT OVERHEATING PROTECTION FOR ELECTRIC DRIVES OF MINING INSTALLATIONS

Iosif V. Breido<sup>1</sup>,  
jbreido@kstu.kz

Irina Yu. Semykina<sup>2</sup>,  
siyu.eav@kuzstu.ru

Gulim S. Nurmaganbetova<sup>1</sup>,  
g\_sahitovna@mail.ru

<sup>1</sup> Karaganda State Technical University,  
56, Mira Boulevard, Karaganda, 100027, Republic of Kazakhstan.

<sup>2</sup> T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University,  
28, Vesenniyaya Street, Kemerovo, 650000, Russia.

**The relevance** of the research is caused by the necessity of reliable thermal protection for noncontrolled induction motor drives of mining machinery and installations, especially for underground mining and enrichment processes. The key feature of this task is operating of mining electrical equipment at obviously arduous conditions with two factors. The first is the high content of dust and gas in the air that raises up the explosion hazard due to overheating of external surfaces caused by fault inception and its progression. The second is the electric drives intermittent duty with frequent starting and shutdown of mining installations in heavy loading conditions involving a wide range of load variation, frequent overloads including long-term operation, motor shutdown and starting with maximum load. The application of direct temperature measurement methods for solving this problem is impossible because the most part of induction motors under consideration is not equipped with built-in thermal sensors. In-situ methods of induction motors overheating protection based on the time-current protection or the thermal current protection do not take into account the ambient temperature and the different variants of electric motors heat removal in mining machinery and installations caused by conditions of their operation. In addition, in case of motor shutdown after overload-caused overheating, when the load normalizes, both these protection types will allow the motor to start even if it has not chilled yet, because these in-situ methods control the current of the supply circuit, but not the heating of the motor. Thus, the electric drive thermal protection for such installations as chain-and-flight or belt conveyors, drill rigs, shearers and road headers, compressor units, slime pumps and similar could be built only on the basis of indirect methods one of which is considered in this paper. Implementation of the research results could decrease the amount of failure for electric drives in the mining industry, will ensure the longer operating life of electrical equipment and in addition the mining safety.

**The main aim** of the research is the development of thermal protection device for the stator winding of noncontrolled induction motor drives for mining machinery and installations based on an indirect method.

**Objects** of the research are the induction motor in the noncontrolled electric drives of mining machinery and installations; the thermal protection device based on an indirect method.

**Methods:** basics of electric drive theory; computer simulation of dynamic processes; experimental design techniques and results processing.

**Results.** The authors have verified the relation between the pulsations of motor starting current and the stator temperature. In intermittent periodic duty, it was found out that the dependence of the number of pulsation on the stator temperature is linear in a range up to 200 °C. The authors prescribed the motor capacity limit within the boundaries of which the stator temperature is calculated with inaccuracy up to 2 %.

### Key words:

Mining electrical equipment, noncontrolled drive, induction motor, thermal protection, stator temperature, pulsations of starting current.

### REFERENCES

1. Tverdok A.A., Nikishichev S.B., Zakharov V.N. Problems and prospects of import substitution in mining sectorio *Gornaya Promyshlennost*, 2015, no. 5 (123), pp. 54–59. In Rus.
2. Kurbatova O.A., Pavlyuchenko V.M. *Montazh i remont gornykh mashin i elektrooborudovaniya* [Installation and repair of mining machines and electrical equipment]. Vladivostok, DVGUSU Publ., 2004. 286 p.
3. Homce G.T. *Early Detection of Insulation Failure*. Report of Investigations. Washington, United State department of the interior, bureau of mines, 1993. 16 p.
4. Lihachev V.L. *Elektroprivateli asinkhronnye* [Induction motors]. Moscow, SOLON-R Publ., 2002. 304 p.
5. *Tekhnicheskii katalog* [Technical catalogue]. Science-research design and technological institute of electric machine industry. Vladimir, NIPTIEM Publ., 2015. 64 p.
6. *Low voltage. General performance motors*, 2016, 9AKK105789 EN 06–2016. Available at: <http://www.abb.com/motors&generators> (accessed 10 October 2017).
7. *SIMOTICS FD Low-Voltage Motors*, 2016. Catalog D 81.8. Available at: <http://www.siemens.com/simotics-fd> (accessed 10 October 2017).
8. Breido I.V., Kaverin V.V., Nurmaganbetova G.S. Opređenje zavisimostey parametrov dinamicheskoy elektromekhanicheskoy kharakteristiki v funktsii temperatury [Determination of dependence of dynamic electromechanical characteristic parameters in temperature function]. *Materialy III Nauchno-tekhnicheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem. Nauka nastoyashego i budushchego* [Proc. of the III Scientific and technical conference with international participation. Science of present and future]. St. Petersburg, LETI Publ., 2015. pp. 38–41.
9. *ABB Ability™ Smart Sensor. Condition monitoring solution for low voltage motors*. Service note, 2017, 9AKK106713A3853 EN

- 04–2017. Available at: <http://www.abb.com/smartsensor> (accessed 10 October 2017).
10. Yundin M.A. *Tokovaya zashchita elektroustanovok* [Current protection of electrical installations]. St. Petersburg, Lan Publ., 2011. 288 p.
11. Bass E.I., Doroguncev V.G. *Releynaya zashchita elektroenergeticheskikh sistem* [Relay protection of electric power systems]. Moscow, MPEI Publ., 2002. 296 p.
12. Martin W., Eason A., Patel A.G. *Low Voltage Motor Protection*. Milwaukee, Rockwell Automation, 2016. 30 p.
13. Kireeva E.A., Cyruk S.A. *Releynaya zashchita i avtomatika elektroenergeticheskikh sistem* [Relay protection and automation of electric power systems]. Moscow, Akademiya Publ., 2013. 288 p.
14. Andreev V.A. *Releynaya zashchita i avtomatika sistem elektro-snabzheniya* [Relay protection and automation of power supply systems]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2006. 640 p.
15. Plesca A.T. Thermal Analysis of Overload Protection Relays using Finite Element Method. *Indian Journal of Science and Technology*, 2013, vol. 6, Iss. 8, pp. 5120–5125.
16. Zhi Gao. *Sensorless Stator Winding Temperature Estimation for Induction Machines*. PhD Diss. Atlanta, 2006. 220 p.
17. Abdelwanis M.I., Selim F., El-Sehiemy R.A. An Efficient Sensorless Slip Dependent Thermal Motor Protection Schemes applied to Submersible Pumps. *International Journal on Power Engineering and Energy (IJPEE)*, 2015, vol. 6, no. 3, pp. 566–571.
18. Zhi Gao, Turner L.A., Colby R.S. *Method and apparatus for estimating induction motor electrical parameters*. United States Patent no. US 8,102,140 B2, 2012.
19. Lee Sang-Bin, Habetler T.G. A Remote and Sensorless Thermal Protection Scheme for Small Line-Connected AC Machines. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2003, vol. 39, no. 5, pp. 1323–1332.
20. Sonnaillon M.O., Bisheimer G., De Angelo C., Garcia G.O. Online Sensorless Induction Motor Temperature Monitoring. *IEEE Transactions On Energy Conversion*, 2010, vol. 25, no. 2, pp. 273–280.
21. Cho Kyung-Rae, Seok Jul-Ki. Induction Motor Rotor Temperature Estimation Based on a High-Frequency Model of a Rotor Bar. *IEEE Transactions On Industry Applications*, 2009, vol. 45, no. 4, pp. 1267–1275.
22. German-Galkin S.G. *Kompyuternoe modelirovanie poluprovodnikovyykh sistem v MatLab 6.0* [Computer simulation of semiconductor systems in MatLab 6.0]. St. Petersburg, Korona print Publ., 2001. 320 p.
23. Breido I.V., Nurmaganbetova G.S. Indirect Overheating Protection of Asynchronous Motor Stator Winding. *Avtomatika. Informatika*, 2013, no. 2 (33), pp. 21–24. In Rus.

Received: 22 October 2017.

#### Information about the authors

**Iosif V. Breido**, Dr. Sc., professor, Karaganda State Technical University.

**Irina Yu. Semykina**, Dr. Sc., associate professor, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University.

**Gulim S. Nurmaganbetova**, postgraduate student, Karaganda State Technical University.

УДК 620.9:538.9

## ПОЛИМЕРЫ С УГЛЕРОДНЫМИ НАПОЛНИТЕЛЯМИ ДЛЯ МОЩНЫХ РЕЗИСТОРОВ

Минакова Наталья Николаевна<sup>1</sup>,  
minakova@asu.ru

Ушаков Василий Яковлевич<sup>2</sup>,  
vyush@tpu.ru

<sup>1</sup> Алтайский государственный университет,  
Россия, 656049, Барнаул, пр. Ленина, 61.

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

*Широкое использование резисторов в электроэнергетике, электротехнике, мощной импульсной энергетике (Pulsed Power) делает актуальным отработку рецептуры и технологии производства резистивных материалов и изделий на их основе, которые отвечали бы высоким требованиям не только по эксплуатационным характеристикам, но и по минимизации материало- и энергоёмкости, технологичности и, в итоге, по максимально возможному снижению стоимости.*

**Цель работы:** дальнейшее совершенствование развиваемого авторами метода подбора рецептуры резистивного полимерного композиционного материала, учитывающей, с одной стороны, воздействие различных эксплуатационных факторов, а с другой – не удорожающей исходные материалы и технологию производства из них готовых изделий. Используемые для этих целей на протяжении многих десятилетий высокоомные металлы и композиционные материалы на керамической основе изготавливаются из дорогих материалов по сложной технологии. Два–три десятилетия назад внимание ученых и технологов привлекли полимерные материалы с электропроводящими наполнителями. Опыт показал, что по совокупности свойств электротехнические изделия из таких материалов пригодны для применения как резисторы, антистатические, экранирующие и заземляющие устройства, обогреватели и др. Их широкомасштабное производство и применение сдерживаются сложностью подбора компонентов композиционного материала, обеспечивающего требуемые потребительские свойства.

**Методы исследования:** текстурный и фрактальный анализ с использованием специально разработанных фрактальных пакетов; непосредственное измерение объемного сопротивления – важнейшего параметра для большинства изделий; электронная микроскопия; рентгеноструктурный и термический анализы; регрессионный и корреляционный анализы.

**Результаты.** Предложено использовать текстурную картину изображения макроструктуры с последующим сопоставлением материалов с известными и неизвестными свойствами. Апробация предложенного метода на реальных композитных материалах показала достаточно высокую достоверность получаемых с его помощью результатов.

### Ключевые слова:

Материалоемкость, энергоёмкость, текстурный анализ, фрактальный анализ, геометрические параметры структуры, наполненные полимеры, электропроводность, эксплуатационные факторы.

### Введение

Многолетний опыт показал перспективность применения полимерных композиционных материалов, в частности каучуков с углеродными наполнителями, как резистивных, антистатических, самонагревающихся, экранирующих материалов [1, 2]. Они в достаточной мере удовлетворяют таким требованиям, как высокие потребительские качества, технологичность (низкая энерго- и ресурсоёмкость), относительная дешевизна всех компонентов материала.

Очень важно, что каучуки общего назначения в качестве полимерной основы в резистивных композиционных материалах отличаются дешевизной, доступностью исходных компонентов, стойкостью к внешним средам, в том числе агрессивным.

Технология изготовления наполненных техническим углеродом резистивных эластомерных композитов включает стандартные для шинной и резинотехнической промышленности этапы: смешение, профилирование изделия, вулканизация. Резистивные свойства регулируются рабочей корректировкой рецептур (в первую очередь, удельное

содержание и свойства наполнителя) и параметров технологического процесса. Эластичность позволяет перерабатывать материал в изделия практически любой, в том числе сложной формы, что минимизирует отходы при изготовлении изделий. Возможность подгонки геометрических параметров изделия под требования потребителя с помощью механической обработки упрощает крепеж в конструкции и уменьшает затраты времени при монтаже.

Значительно ограничивает масштабы использования резистивных эластомерных композиционных материалов сложность обеспечения требуемой величины удельного объемного электрического сопротивления с минимальными отклонениями от номинальной величины.

Электропроводящая структура формируется смешением исходных ингредиентов. Ее свойства определяются количественным и качественным составом композита. Стохастичность многокомпонентных систем и многоуровневая перестройка границ раздела в технологическом процессе не позволяют создать теоретически обоснованную расчетную модель, которая позволяла бы рассчиты-

вать электрофизические характеристики создаваемого материала по характеристикам ингредиентов и технологического процесса [3, 4]. Параметры, используемые в расчетных формулах, сложно определить экспериментально. Применяемые модели пространственно-ориентированных структур полимеров позволяют понять механизмы электропроводности, но не позволяют учесть физико-химические процессы, интенсивность которых зависит от эксплуатационных факторов [5]. До настоящего времени фактически единственным методом остается эмпирический подбор материала методом проб и ошибок. Он требует значительных временных, людских, приборных и других ресурсов, в первую очередь, на выполнение экспериментов, моделирующих эксплуатационные воздействия при длительных режимах работы электротехнических изделий.

Контроль величины и стабильности электропроводности наполненных полимеров в процессе эксплуатации требует разработки специальной инструментальной [6]. Приближение к решению обозначенных выше проблем отражено в статье.

#### Объекты и методы исследования

Объектами исследования выбраны наполненные техническим углеродом каучуки, обеспечивающие, как показано в [7–12], высокие эксплуатационные характеристики при правильном подборе материалов. Основная часть экспериментов проводилась на резисторах – образцах диаметром 0,03 м, высотой 0,05 м. Величина удельного объемного электрического сопротивления ( $\rho_v$ ) определялась при изменении концентрации технического углерода от 30 весовых частей до 80 (на 100 весовых частей каучука).

Применялся технический углерод, получаемый при термоокислительном разложении жидкого углеводородного сырья, следующих марок: П-514 – печной, среднеактивный, со средним показателем дисперсности и средним показателем структурности; П-234 – печной, активный, с высоким показателем дисперсности и средним показателем структурности; П-366Э – печной, электропроводящий с высоким значением дисперсности и структурности. Поверхность технического углерода модифицировалась различными способами (таблица).

В качестве матрицы использовался бутилкаучук БК-2055, бутадиен-метилстирольный каучук СКМС-30АРК, нитрильный каучук СКН-40. Бутадиенметилстирольный каучук выбран как аморфный, бутилкаучук – как высококристаллический, нитрильный – как стойкий к воздействию трансформаторного масла.

Применены следующие методы исследования: текстурный и фрактальный анализ с использованием специально разработанных фрактальных пакетов; измерение величины объемного сопротивления с помощью цифрового мультиметра; электронная микроскопия; рентгеноструктурный и

термический анализ; регрессионный и корреляционный анализы [7–10].

**Таблица.** Способы модификации поверхности дисперсного наполнителя

**Table.** Methods of modifying the spatter filler surface

| Способы обработки поверхности технического углерода<br>Methods of treating the carbon black surface                                                                                        | Обозначение на рис. 2<br>Designations in Fig. 2 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| Окисление при 400 °С<br>Oxidation at 400 °C                                                                                                                                                | 1                                               |
| Нанесение полициклических ароматических углеводородов (ПАУ)+ термообработка в инертной среде<br>Deposition of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) + Heat treatment in inert atmosphere | 2                                               |
| Без модификации<br>Without modification                                                                                                                                                    | 3                                               |
| Обработка ацетоном<br>Treatment with acetone                                                                                                                                               | 4                                               |
| Нанесение полиэтиленгликольадипата<br>Deposition of polyethylene glycol adipate                                                                                                            | 5                                               |

Термический анализ проводился на дериватографе SYSTEM PAULIK-EPDEY (MOM BUDA-PEST) Q-1000. Скорость линейного повышения температуры составляла 10 град/мин. Испытания проводились на воздухе. Навеска равнялась 50 мг.

По рентгеновским дифрактограммам, снятым при температуре 20 °С (дифрактометр с Ni-монокроматором, использовалось  $\text{CuK}\alpha$ -излучение), определялась степень кристалличности ( $S_k$ ), значение которой рассчитывалось на основе метода Германа-Вейдингера (в интервале брегговских углов  $2\theta=2-40^\circ$ ). За величину  $S_k$  принимали частное от деления пика рентгенограммы на ширину базиса [7, 12].

Была выдвинута следующая гипотеза. Оценку электропроводности наполненного полимера, в том числе и при эксплуатационных воздействиях, можно выполнить сопоставлением фрактальных параметров изображений макроструктуры анализируемого материала и материала с известными свойствами. Эффективность использования фрактального параметра подтверждена в [11] при оценке электропроводности наполненного полимера с модификацией поверхности технического углерода, которая сформирована в процессе технологического цикла.

Поставленная цель потребовала решения следующих задач:

- апробировать структурный параметр, рассчитанный по изображению макроструктуры (предложен в [11]), для традиционных способов регулирования электропроводности наполненных полимеров – маркой полимера, концентрацией и маркой электропроводящего наполнителя;
- проверить пригодность параметра при основных эксплуатационных воздействиях на материал;

- выявить значимый геометрический параметр, реагирующий на физико-химические процессы, формирующие величину удельного объемного электрического сопротивления, а также и его устойчивость к основным эксплуатационным воздействиям.

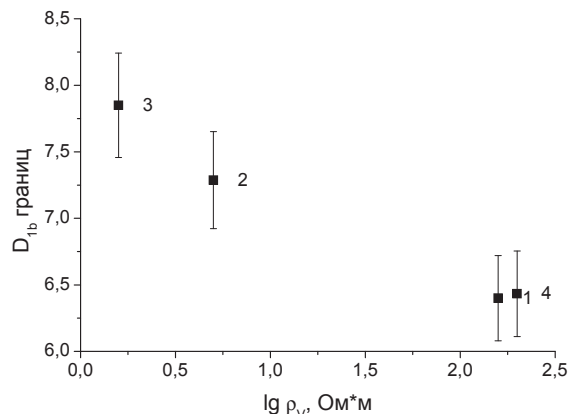
На изображениях в градациях серого с помощью текстурного признака, отражающего автокорреляцию гистограммы совместного распределения яркости второго порядка и характеризующего взаимосвязь двух соседних точек изображения, выделялись границы «наполнитель–полимер» для учета границ небольших градаций серого. Количественное описание определенных таким образом контуров межфазных границ выполнялось с помощью фрактальных размерностей Реньи [11, 12].

В [11] показано, что при постоянном шаге покрывающей квадратной сетки  $\varepsilon$  для разных материалов значение числителя дроби монотонно изменяется в соответствии с величиной объемного электрического сопротивления. Графики зависимости  $p_i \ln p_i$  от  $\ln \varepsilon$  очень хорошо аппроксимируются линейной зависимостью. При этом коэффициент угла наклона прямой – информационная размерность  $D_1$ . Значение вертикального смещения прямой является усредненной по всему изображению энтропией фрактального множества. Значение вертикального смещения прямой на этой зависимости обозначено нами как  $D_{1b}$ .

Измерения параметров изображений макроструктуры и обработка полученных результатов автоматизированы [11]. Максимальный размер изображения, который может быть обработан, определяется производительностью компьютера. Возможна пакетная обработка графических файлов в градациях серого цвета (256 цветов, 8 бит). Предусмотрена предварительная обработка изображений (фильтрация, корректировка яркости и контрастности). Возможен выбор элементов структуры, параметры которых требуется измерить (агрегаты наполнителя, полимерная матрица, контуры межфазных границ). Применялся метод сетки. Накладываемые масштабы выбирались автоматически с помощью специально разработанной программы ЭВМ [10]. Диапазон ограничивался размером пикселя и размером изображения. Вычислялись канонические мультифрактальные спектры. Учтено, что существуют структуры, для которых можно вычислить только псевдоспектры, позволяющие характеризовать локальные области (при малых значениях шкал разбиения) [13].

### Результаты исследования

Установлена корреляционная связь между величиной  $\rho_v$  и параметром  $D_{1b}$ . Наблюдается следующая закономерность – при увеличении  $\rho_v$  параметр  $D_{1b}$  уменьшается. На рис. 1 в качестве примера представлена взаимосвязь между указанными параметрами для материалов, отличающихся видом каучука и электропроводящего наполнителя.



**Рис. 1.** Зависимость удельного объемного электрического сопротивления материалов  $\rho_v$  от параметра  $D_{1b}$ . 1 – бутилкаучук БК-2055, технический углерод П-514; 2 – БК-2055, П-234; 3 – БК-2055, П-366Э; 4 – нитрильный каучук СКН-40, П-234. Концентрация технического углерода – 80 весовых частей

**Fig. 1.** Dependence of specific volume electrical resistance of materials  $\rho_v$  on the parameter  $D_{1b}$ . 1 is the butyl rubber BK-2055, technical carbon P-514; 2 is the BK-2055, P-234; 3 is the BK-2055, P-366E; 4 is the nitrile rubber SKN-40, P-234. The concentration of carbon black is 80 parts by weight

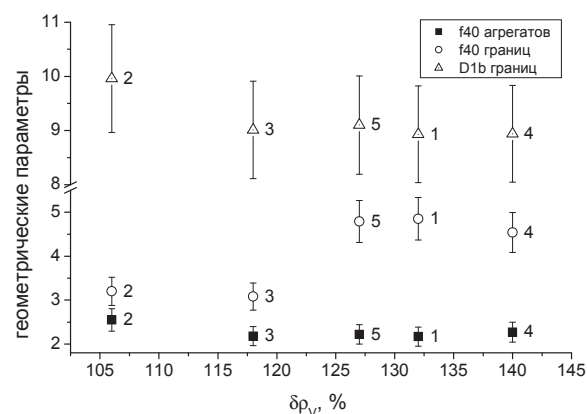
Проанализирована электропроводность при эксплуатационных воздействиях наполненных полимеров, отличающихся концентрацией наполнителя, видом полимера и электропроводящего наполнителя. Дополнительно изучены материалы на основе бутилкаучука БК-2055, наполненные техническим углеродом марки П-234 с модифицированной поверхностью: окисление при 400 °С; нанесение полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) + термообработка в инертной среде; обработка ацетоном; нанесение полиэтиленгликолядипината [10]. Концентрация наполнителя составляла 80 весовых частей на 100 весовых частей полимера.

При сопоставлении экспериментальных данных по стабильности свойств с результатами численных экспериментов по измерению параметров изображений структуры было обращено внимание на то, что параметры  $f_{40}$  и  $D_{1b}$ , вычисленные для областей межфазных границ, реагируют на электропроводность при эксплуатационных воздействиях. Параметр  $D_{1b}$ , согласно выполненным в [11] исследованиям, характеризует разветвленность структуры наполнителя в полимере,  $f_{40}$  – однородность распределения фрактального множества в пространстве [13].

Зависимость значений параметров  $D_{1b}$  и  $f_{40}$  агрегатов частиц, контура межфазных границ при изменении  $\rho_v$  в процессе набухания представлена на рис. 2.

Анализ изменения параметров по результатам сравнения микрофотографий неизученного и изученного материалов, рассчитанных для контура межфазных границ, позволил установить, что у материала с техническим углеродом разветвленной структуры (при возрастании  $D_{1b}$ ) имеет место

увеличение стабильности электропроводности. Можно полагать, что для технического углерода разветвленной структуры по сравнению с низкоструктурным наполнителем характерно увеличенное количество зацеплений между частицами и усиленное взаимодействие между ними. Согласно модели диффузионно-ограниченной агрегации дисперсного наполнителя, при интенсификации взаимодействия между частицами формируются разветвленные агрегаты [14, 15]. Образуется прочный каркас, который противостоит конформационным превращениям в полимере при воздействии дестабилизирующих факторов. Параметр спектра фрактальной размерности ( $f_{40}$ ), который, согласно исследованиям [8], чувствителен к распределению электропроводящего наполнителя в полимере, меньше реагирует на увеличение разветвленности структуры. При изучении набухания в длительном режиме испытаний (1 год) было выявлено нарушение монотонной связи между  $f_{40}$  и  $D_{1b}$ . Можно полагать, что при длительной эксплуатации электротехнического изделия в формировании изменений структуры подключаются процессы, которые требуют дополнительного анализа и описания. Параметр  $D_{1b}$  изменяется монотонно – при уменьшении стабильности электропроводности материалов  $D_{1b}$  уменьшается.



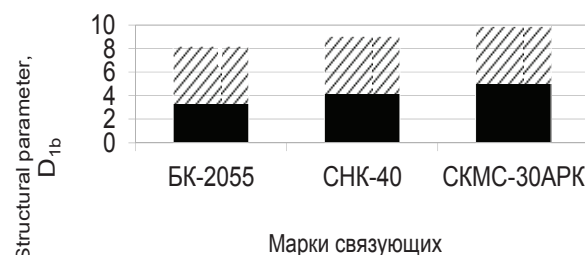
**Рис. 2.** Зависимость стабильности материалов (таблица) от значения геометрических параметров. Время набухания 8760 часов

**Fig. 2.** Dependence of stability of the materials (Table) on the value of geometric parameters. Swelling time is 8760 hours

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что параметр  $D_{1b}$  корректно реагирует на изменение сопротивления при всех исследованных эксплуатационных воздействиях. Известно, что дестабилизирующему воздействию главным образом подвергается связующее [16, 17]. Поэтому параметр  $D_{1b}$  сопоставлялся для материалов, отличающихся только видом каучука. Полученные результаты представлены на рис. 3.

Многочисленными экспериментами, выполненными различными исследователями, подтверждено, что кристаллические каучуки более стойки к основным эксплуатационным факторам (напри-

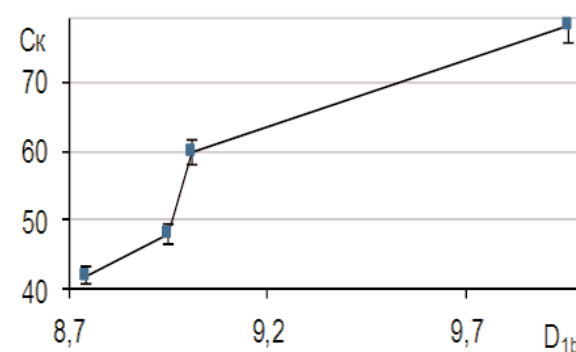
мер, к повышенной температуре), чем аморфные [18–21]. Эта известная закономерность подтверждена и при использовании анализируемого параметра  $D_{1b}$ .



**Рис. 3.** Структурный параметр  $D_{1b}$  для полимерных наполнителей разных марок

**Fig. 3.** Structural parameter  $D_{1b}$  for polymeric fillers of different grades

В качестве структурных параметров, по изменению которых можно судить о характере межфазных взаимодействий и стойкости к эксплуатационным воздействиям, были выбраны максимальная скорость окисления  $v$  и степень кристалличности ( $Ск$ ) [12, 18]. Использованы указанные выше модификации поверхности технического углерода, увеличивающие и уменьшающие стабильность электропроводности к эксплуатационным воздействиям по сравнению с наполненным полимером, содержащим немодифицированный технический углерод. Выполнен регрессионный анализ между указанными структурными параметрами и геометрическим параметром  $D_{1b}$ . Оказалось, что большую значимость имеет степень кристалличности. Корреляционный анализ подтвердил влияние степени кристалличности материалов, физико-химические процессы которых изменялись за счет использования технического углерода с модификаций поверхности (рис. 4).



**Рис. 4.** Зависимость степени кристалличности от структурного параметра  $D_{1b}$

**Fig. 4.** Dependence of crystallinity degree on the structural parameter  $D_{1b}$

Анализ результатов выполненных исследований позволяет предположительно судить о характере межфазных процессов в наполненных полимерах. Модификация, включающая термообработку в инертной среде, формирует плотную структу-

ру. Это замедляет релаксационные процессы в полимере. Усиливается агломерирование технического углерода. Регулярно упакованные молекулы мало подвержены внешним (эксплуатационным) воздействиям. При уплотнении межфазного слоя возрастает стойкость к деформации, температуре, агрессивной среде. При таких структурных изменениях параметр  $D_{1b}$  увеличивается. Модификация ацетоном разрыхляет структуру в объеме, размывая межфазные слои. Происходят процессы деагломерации наполнителя. Под действием тепловых флуктуаций ускоряется процесс разрыва связей, что снижает стабильность электропроводности при эксплуатационных воздействиях. Сравнение параметров  $D_{1b}$  при такой модификации с аналогичными параметрами для немодифицированного технического углерода показывает, что  $D_{1b}$  уменьшается.

#### Заключение

Выполненные исследования показали, что есть возможность «конструировать» резистивные на-

полненные полимерные материалы для конкретной области применения по электропроводности с учетом ее допустимого изменения при эксплуатационных воздействиях с помощью определения фрактальных параметров текстурной картины изображений макроструктуры. При сравнении микрофотографий материала, совокупность электрофизических характеристик которого экспериментально определена, и материала, характеристики которого еще неизвестны, по параметру  $D_{1b}$  можно оценить величину и стабильность удельного объемного электрического сопротивления при воздействии основных эксплуатационных факторов. Показано, что используемый геометрический параметр способен отражать результат физико-химических процессов в выбранных объектах исследования. Корректность оценки экспериментально подтверждена для наполненных полимеров при различных способах регулирования электропроводности: маркой полимера, концентрацией и маркой электропроводящего наполнителя, модификацией поверхности наполнителя.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Polymer/carbon based composites as electromagnetic interference (EMI) shielding materials / J. Thomassina, C. Jérômea, T. Pardonb, C. Baillyb, I. Huynenb, C. Detrembleura // Materials Science and Engineering: R: Reports. – July 2013. – V. 74. – Iss. 7. – P. 211–232.
2. Гуль В.Е., Шенфилд Л.З. Электропроводящие полимерные композиты. – М.: Химия, 1984. – 226 с.
3. Anaraki N.I., Poursalehi R. Shielding Effectiveness of Polymeric Nanocomposites Filled with Iron/Wüstite Nanoparticles // Procedia Materials Science. – 2015. – V. 11. – P. 700–705.
4. Conductive polymer composites with segregated structures / H. Pang, L. Xu, D. Yan, Z. Li // Progress in Polymer Science. – November 2014. – V. 39. – Iss. 11. – P. 1908–1933.
5. Minakova N.N., Ushakov V.Ya. Stochastic and deterministic modeling of spatially oriented structures in dispersion-filled polymers // Polymer Science – Series A. – 2000. – V. 40 (9). – P. 1025–1029.
6. Abramenko E.A., Minakova N.N., Ushakov V.Ya. Investigation of the properties of polyethylene with nanodimensional fillers by special processing of macrostructure images // Russian Physics Journal. – 2008. – V. 51 (7). – P. 701–705.
7. Уэндландт У. Термические методы анализа. – М.: Мир, 1978. – 526 с.
8. Bortnikov A.Yu., Minakova N. Structure analysis of electrically conductive polymers filled with agglomerated components // Russian Physics Journal. – 2006. – V. 49 (11). – P. 1165–1170.
9. Кроновер Р.М. Фракталы и хаос в динамических системах. Основы теории. – М.: Постмаркет, 2000. – 352 с.
10. Божок С.В., Паршин Д.А. Фракталы и мультифракталы. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 128 с.
11. Crystallization and higher-order structure of multicomponent polymeric systems / H. Takeshita et al. // Polymer. – 2013. – № 18 (54). – P. 4776–4789.
12. Bortnikov A.Yu., Minakova N.N., Abramenko E.A., Structural parameter for assessing the control of the properties of carbon-black-filled polymers // International Polymer Science and Technology. – 2011. – V. 38 (6). – P. 55–59.
13. Федер Е. Фракталы. – М.: Мир, 1991. – 254 с.
14. DeCost B.L., Holm E.A. A computer vision approach for automated analysis and classification of microstructural image data // Computational Materials Science. – December 2015. – V. 110. – P. 126–133.
15. Janke W. Computer Simulation Studies of Polymer Adsorption and Aggregation – from Flexible to Stiff // Physics Procedia. – 2015. – V. (68). – P. 69–79.
16. Липатов Ю.С. Физико-химические основы наполнения полимеров. – М.: Химия, 1977. – 260 с.
17. Аскадский А.А., Хохлов А.Р. Введение в физико-химию полимеров: монография. – М.: Научный мир, 2009. – 384 с.
18. Gamlitskii Yu.A., Bass Yu.P. On the description of the phenomenon of filled elastomer strengthening // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2003. – V. 76. – № 3. – P. 591–596.
19. Yihu Song, Qiang Zheng. A Guide for Hydrodynamic Reinforcement Effect in Nanoparticle-filled Polymers // Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences. – 2016. – V. 41. – P. 318–346.
20. Бухина М.Ф. Кристаллизация каучуков и резин. – М.: Химия, 1973. – 240 с.
21. Принципы создания композиционных полимерных материалов: монография / А.А. Берлин, С.А. Вольфсон, В.Г. Ошмян, Н.С. Ениколопов. – М.: Химия, 1990. – 238 с.

Поступила 05.12.2017 г.

#### Информация об авторах

**Минакова Н.Н.**, доктор физико-математических наук, профессор кафедры прикладной физики, электроники и информационной безопасности Алтайского государственного университета.

**Ушаков В.Я.**, доктор технических наук, заслуженный деятель науки и техники РФ, профессор Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 620.9:538.9

## POLYMERS WITH CARBON FILLERS FOR POWERFUL RESISTORS

Natalia N. Minakova<sup>1</sup>,  
minakova@asu.ru

Vasily Ya. Ushakov<sup>2</sup>,  
vyush@tpu.ru

<sup>1</sup> Altai State University,  
61, Lenin Avenue, Barnaul, 656049, Russia.

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

Wide use of resistors in electric power industry, electrical engineering, powerful-pulsed power engineering (Pulsed Power) makes the development of the recipe and technology for producing resistive materials and products based on them very relevant. These products would meet high requirements not only for performance characteristics, but also for minimizing material and energy consumption, processibility and, as a result, the maximum possible reduction in value.

**The main aim** of the study is further improvement of the method developed by the authors for selecting resistive polymeric composite material. This method takes into account, on the one hand, the effect of various operating factors on the material, and, on the other hand, it does not increase the cost of raw materials and technique of manufacturing finished products from them. High-resistance metals and composite materials on a ceramic base, used for these purposes for many decades, are made from expensive materials using sophisticated technology. Some decades ago, the polymeric materials with electrically conductive fillers attracted the attention of scientists and technologists. Experience has shown that for a combination of properties, electrical products made of such materials are suitable for use as resistors, antistatic, shielding, and grounding devices, heaters, etc. Their large-scale production and use are restrained by the complexity of selecting components of the composite material that provides the required consumer properties.

**The methods:** textural and fractal analysis using specially designed fractal packets; direct measurement of bulk resistance – the most important parameter for most products; electron microscopy; X-ray diffraction and thermal analyzes; regression and correlation analyzes.

**The results.** The authors proposed the use of macrostructure textural pattern with subsequent comparison of materials with the known and unknown properties. Approbation of the proposed method on real composite materials showed rather high reliability of the results obtained with its help.

#### Key words:

Material consumption, energy intensity, texture analysis, fractal analysis, geometric parameters of structure, filled polymers, electrical conductivity, and operational factors.

#### REFERENCES

- Thomassina J.M., Jérômea C., Pardoeb T., Baillyb C., Huynenb I., Detrembleura C. Polymer/carbon based composites as electromagnetic interference (EMI) shielding materials. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, July 2013, vol. 74, Iss. 7, pp. 211–232.
- Gul V.E., Shenfil L.Z. *Electroprovodyashchie polimernye kompozity* [Electrically Conducting Polymer Compositions]. Moscow, Khimiya Publ., 1984. 226 p.
- Anaraki N.I., Poursalehi R. Shielding Effectiveness of Polymeric Nanocomposites Filled with Iron/Wüstite Nanoparticles. *Procedia Materials Science*, 2015, vol. 11, pp. 700–705.
- Pang H., Xu L., Yan D., Li Z. Conductive polymer composites with segregated structures. *Progress in Polymer Science*, November 2014, vol. 39, Iss. 11, pp. 1908–1933.
- Minakova N.N., Ushakov V.Ya. Stochastic and deterministic modeling of spatially oriented structures in dispersion-filled polymers. *Polymer Science – Series A*, 2000, vol. 40 (9), pp. 1025–1029.
- Abramenko E.A., Minakova N.N., Ushakov V.Ya. Investigation of the properties of polyethylene with nanodimensional fillers by special processing of macrostructure images. *Russian Physics Journal*, 2008, vol. 51 (7), pp. 701–705.
- Uendlandt U. *Thermal Methods of Analysis*. New York, John Wiley & Sons Inc., 1974. 524 p.
- Bortnikov A.Yu., Minakova N. Structure analysis of electrically conductive polymers filled with agglomerated components. *Russian Physics Journal*, 2006, vol. 49 (11), pp. 1165–1170.
- Kronover P.M. *Fraktaly i khaos v dinamicheskikh sistemakh. Osnovy teorii* [Fractals and chaos in dynamic systems. Fundamentals of the theory]. Moscow, Postmarket Publ., 2000. 352 p.
- Bozhokin S.V., Parshin D.A. *Fraktaly i multifraktaly* [Fractals and multifractals]. Izhevsk, Regular and chaotic dynamics Publ., 2001. 128 p.
- Takeshita H. Crystallization and higher-order structure of multi-component polymeric systems. *Polymer*, 2013, vol. 18 (54), pp. 4776–4789.
- Bortnikov A.Yu., Minakova N.N., Abramenko E.A. Structural parameter for assessing the control of the properties of carbon-black-filled polymers. *International Polymer Science and Technology*, 2011, vol. 38 (6), pp. 55–59.
- Feder E. *Fractals*. New York, Plenum Press, 1988. 283 p.
- DeCost B.L., Holm E.A. A computer vision approach for automated analysis and classification of microstructural image data. *Computational Materials Science*, December 2015, vol. 110, pp. 126–133.
- Janke W. Computer Simulation Studies of Polymer Adsorption and Aggregation – from Flexible to Stiff. *Physics Procedia*, 2015, vol. 68, pp. 69–79.
- Lipatov Yu.S. *Fiziko-khimicheskie osnovy napolneniya polimerov* [Physicochemical basis of polymer filling]. Moscow, Khimiya Publ., 1977. 260 p.
- Askadsky A.A., Khokhlov A.R. *Vvedenie v fiziko-khimiya polimerov: monografiya* [Introduction to the physicochemistry of polymers: monograph]. Moscow, Nauchny mir Publ., 2009. 384 p.
- Gamlitskii Yu.A., Bass Yu.P. On the description of the phenomenon of filled elastomer strengthening. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2003, vol. 76, no. 3, pp. 591–596.

19. Yihu Song, Qiang Zheng. A Guide for Hydrodynamic Reinforcement Effect in Nanoparticle-filled Polymers. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 2016, vol. 41, pp. 318–346.
20. Bukhina M.F. *Kristallizatsiya kauchuka i rezin* [Crystallization of Caoutchouc and Rubbers]. Moscow, Khimiya Publ., 1973. 198 p.
21. Berlin A.A., Volfson S.A., Oshmyan V.G., Enikolopov N.S. *Printsipy sozdaniya kompozitsionnykh polimernykh materialov: monografiya* [Principles of creating composite polymer materials: monography]. Moscow, Khimiya Publ., 1990. 238 p.

*Received: 5 December 2017.*

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

**Natalia N. Minakova**, Dr. Sc., professor, Altai State University.

**Vasily Ya. Ushakov**, Dr. Sc., Honored Worker of Science of the Russian Federation, professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 553.43: 553.41: 549.355 (571.52)

## ЭВОЛЮЦИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА БЛЕКЛЫХ РУД АК-СУГСКОГО ЗОЛОТО-МОЛИБДЕН-МЕДНО-ПОРФИРОВОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (СЕВЕРО-ВОСТОЧНАЯ ТУВА)

Кужугет Ренат Васильевич<sup>1</sup>,  
rkuzhuget@mail.ru

Монгуш Андрей Александрович<sup>1</sup>,  
amongush@inbox.ru

Монгуш Ай-Демир Олегович<sup>1</sup>,  
aidemirm@rambler.ru

<sup>1</sup> Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН,  
Россия, 667007, г. Кызыл, ул. Интернациональная, 117 а.

Изучение блёклых руд является одним из эффективных направлений минералогических исследований, позволяющих расширять условия образования рудных месторождений, что, в свою очередь, является научной основой для их поисков, разведки и рациональной отработки.

**Цель работы:** выяснение минералого-геохимических особенностей и эволюции состава блёклых руд, а также особенностей рудообразующих гидротермальных флюидов, формировавших Ак-Сугское золото-молибден-медно-порфировое месторождение.

**Методы исследования:** полевые исследования, детальные минералогические исследования с изучением рудной минерализации в полированных шлифах (аншлифах) с помощью поляризационного микроскопа Olympus и растрового сканирующего электронного микроскопа MIRA 3 LMU (Tescan Orsay Holding) с системами микроанализа INCA Energy 450+XMax 80 и INCA Wave 500 (Oxford Instruments Nanoanalysis Ltd).

**Результаты исследования.** Установлены вариации состава минералов группы блёклых руд Ак-Сугского золото-молибден-медно-порфирового месторождения, которые представлены минералами ряда теннантит–тетраэдрит. Последние развиты в составе трёх минеральных ассоциаций, соответствующих трём генерациям. Для блёклых руд характерна скрытая плавная зональность, обусловленная увеличением содержания Sb к внешним зонам. Эволюция составов блёклых руд I генерации: Cu-теннантит→Fe-теннантит→Zn-теннантит, II генерации: Cu-теннантит→Zn-теннантит→Zn-теннантит-тетраэдрит. Блёклая руда III генерации представлена Zn-теннантит-тетраэдритом. Наличие высокомедистого теннантита, Zn-теннантита, Zn-теннантит-тетраэдрита и минералогические особенности руд Ак-Сугского месторождения свидетельствуют об относительно повышенном окислительном потенциале рудообразующих гидротермальных флюидов. Главными факторами рудоотложения являются изменение окислительно-восстановительного характера, вариации  $fS_2$ ,  $fSe_2$ ,  $fTe_2$  и снижение температуры рудоносного флюида.

### Ключевые слова:

Блёклые руды, теннантит, теннантит-тетраэдрит, Au-Mo-Cu-порфировое месторождение, Тува.

### Введение

Блёклые руды относятся к классу сульфосолей с общей формулой  $Me_1 + 10Me_2 + 2X_2Y_{13}$ , где  $Me_1 = Cu, Ag, Tl, Au$ ;  $Me_2 = Zn, Fe^{2+}, Cu^{2+}, Hg, Cd, Pb, Mn, Ni, Co$ ,  $X = As, Sb, Bi, Te, Ge, In$ ,  $Y = S, Se$ . Благодаря широко проявленному изоморфизму, минералы группы блёклых руд являются индикаторами рудогенеза. Особенности их состава, в совокупности с данными о минеральных ассоциациях и последовательности их кристаллизации, имеют большое значение для установления закономерностей эволюции химического состава рудогенерирующих растворов [1–3].

Минералы группы блёклых руд широко развиты в различных типах гидротермальных месторождений, в том числе медно-порфирового типа. Месторождения медно-порфирового семейства с повышенными содержаниями Au и Ag относятся к золото-молибден-медно-порфировому типу. В России к данному типу относятся медно-порфировые месторождения в складчатых областях Урала, Кузнецкого Алатау, Восточного Саяна, Сихотэ-Алиня, Чукотки и Камчатки [4]. Однако только три из них – Малмыж (Хабаровский край), Пе-

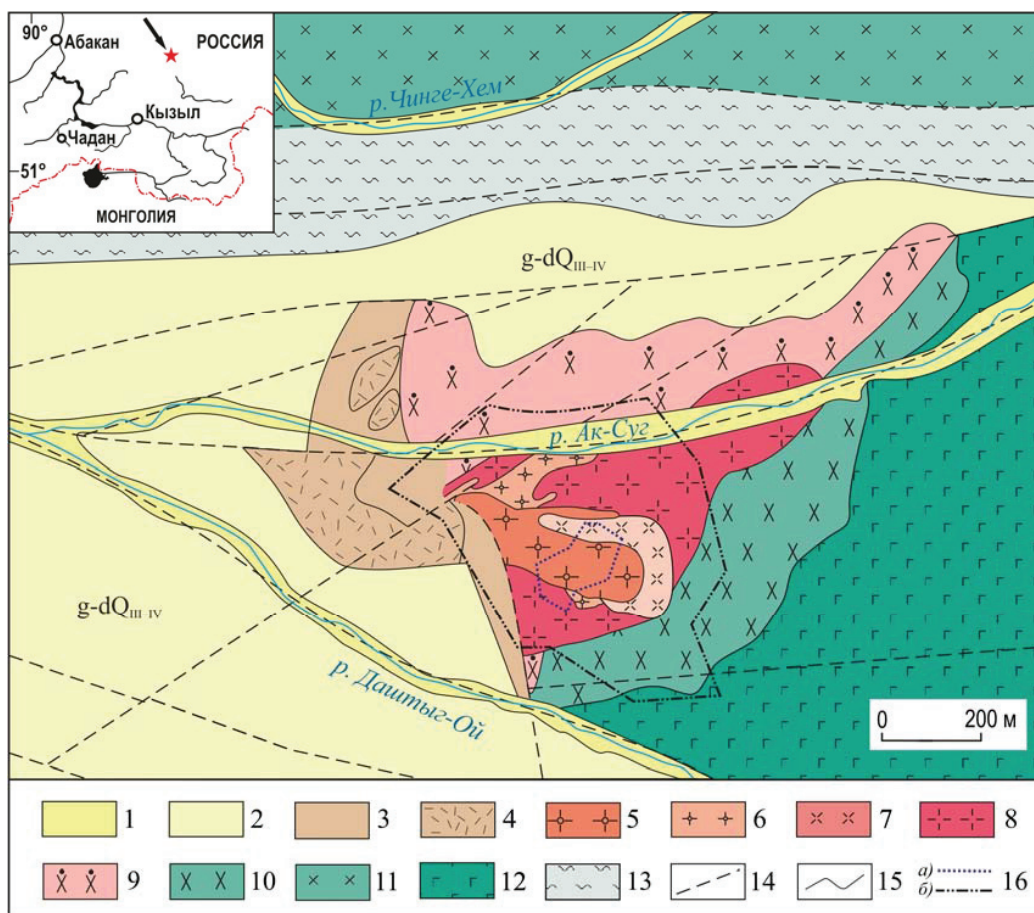
счанка (Чукотский автономный округ) и Ак-Суг (Республика Тыва) – характеризуются значительными запасами Cu и Au [5, 6].

### Краткая характеристика Ак-Сугского месторождения

Ак-Сугское золото-молибден-медно-порфировое месторождение находится в северо-восточной части Республики Тыва в междуречье рек Ак-Суг и Даштыг-Ой. Оно приурочено к тектонически мобильной зоне в области сопряжения докембрийских и раннекаледонских структур, непосредственно расположено в зоне Кандатского разлома, разделяющего Хамсаринскую (Тува) и Кизирскую (Восточный Саян) структурно-фациальные зоны ранних каледонид. Оруденение приурочено к многофазному штокообразному телу порфировых пород Ак-Сугского массива (батолита). В данном массиве представлен гомодромный ряд от габброидов и диоритов по периферии до плагиогранит-порфиров толейтового ряда в центральной части (рис. 1). Эти породы прорываются штоками порфировидных тоналитов, кварц-плагиоклазовых порфиров, с которыми и связано проявление штокверкового золото-молибден-медно-порфирового оруденения.

Достоверных данных о возрасте порфировых пород Ак-Сугского массива нет. Вулканогенные и осадочные породы толтаковской свиты на западном фланге месторождения отнесены к среднему девону, однако возраст свиты остается дискуссионным, т. к. отсутствует палеонтологическое обоснование возраста свиты. Контакты пород толтаковской свиты с тоналитами и порфиризовидными плагиогранитами Ак-Сугского массива имеют либо тектонический характер, либо достоверно не установлены, либо наблюдается контактное воздействие плагиогранит-порфиров на осадочные породы в виде аргиллизации и наложенной прожилково-вкрапленной минерализации самородной меди и халькозина [7].

Возраст наиболее ранних диоритов Ак-Сугского массива, по данным Ar–Ar метода по амфиболу, составляет  $488 \pm 4,8$  млн лет, пироксенсодержащих кварцевых диоритов –  $490 \pm 4,8 \dots 488,6 \pm 1,8$  млн лет ( $E_3$ ), амфиболовых кварцевых диоритов – 462 млн лет ( $O_2$ ) [8]. Ar–Ar датирование метасоматитов, образованных прежде всего за счёт порфировых пород Ак-Сугского массива, выявило три импульса эндогенных событий:  $404 \pm 7 \dots 401 \pm 2$  ( $D_1$ );  $364 \pm 4 \dots 354 \pm 3$  ( $D_3-C_1$ ) и  $331 \pm 4 \dots 324,7 \pm 2,2$  ( $C_1$ ) млн лет, отвечающих, очевидно, разным периодам проявления рудно-метасоматических процессов [8]. Re–Os датирование молибденита ранних стадий Ак-Сугского месторождения дает возраст  $517,3 \pm 3$  и  $517,4 \pm 3$  млн лет, т. е. указывает на



**Рис. 1.** Схема геологического строения Ак-Сугского месторождения по данным [7] с добавлениями: 1 – аллювиальные отложения ( $Q_{IV}$ ); 2 – моренные и делювиальные отложения ( $g-dQ_{III-IV}$ ); 3–4 – вулканогенные осадочные образования толтаковской свиты ( $D_{tl}$  (?)); 3 – риолит-дацитовые, риолитовые порфиры; 4 – туфопесчаники, конгломераты; 5–10 – Ак-Сугский массив (Ак-Сугский комплекс ( $E_3-D_{3ak}$  (?))): 5 – плагиогранит-порфиры; 6 – тоналит-порфиры; 7 – тоналиты порфиризовидные; 8 – тоналиты, плагиограниты порфиризовидные; 9 – тоналиты; 10 – габбро, диориты, кварцевые диориты, тоналиты; 11–12 – таннуольский комплекс ( $E_3tn$ ): 11 – диориты; 12 – габбро; 13 – кислые и основные эффузивы, сланцы хамсаринской свиты ( $E_3hm$ ); 14 – разрывные нарушения; 15 – границы геологические; 16 – а) контур кварцевого ядра; б) контур месторождения

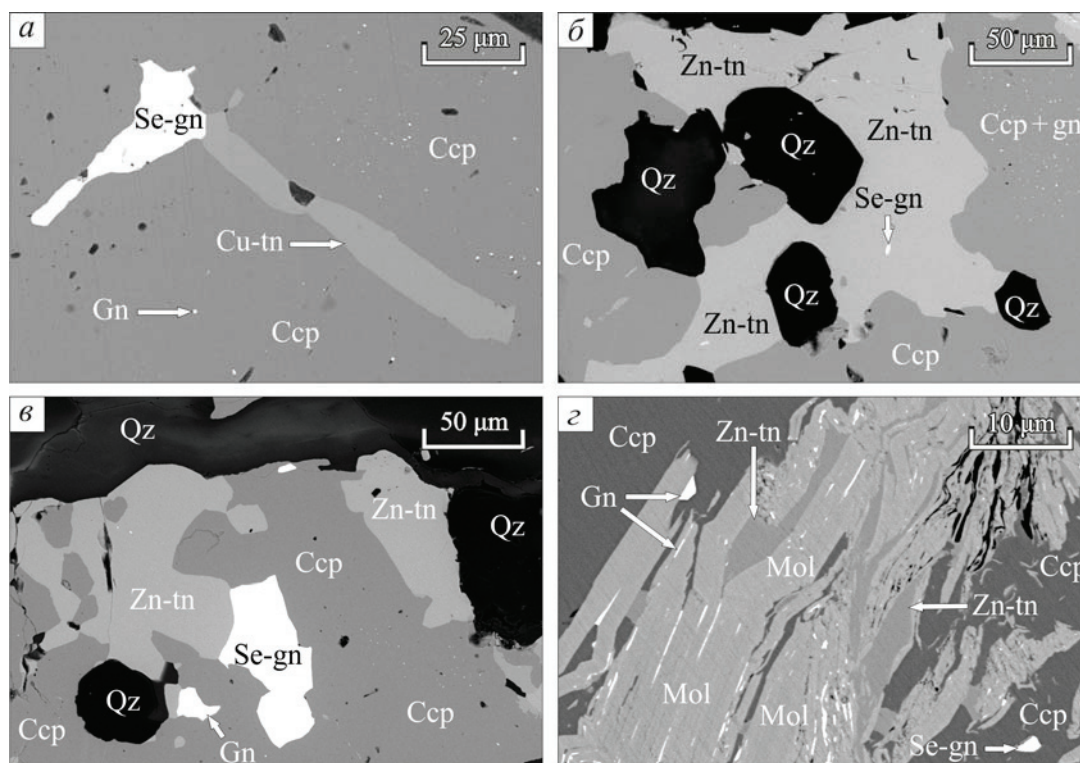
**Fig. 1.** Schematic geological structure of the Ak-Sug deposit (after [7], with additions): 1 are the alluvial deposits ( $Q_{IV}$ ); 2 are the moraine and deluvial deposits ( $g-dQ_{III-IV}$ ); 3–4 are the volcanogenic sedimentary formations of the Toltakov series ( $D_{tl}$  (?)): 3 are the rhyolite-dacite, rhyolite porphyry; 4 are the tuff sandstones, conglomerates; 5–10 is the Ak-Sug massif (Ak-Sug complex ( $E_3-D_{3ak}$  (?))): 5 are the plagiogranite-porphyry; 6 are the tonalite-porphyry; 7 are the tonalite porphyry; 8 are the tonalite, plagiogranite porphyry; 9 is the tonalite; 10 are the gabbros, diorites, quartz diorites, tonalites, 11–12 is the Tannu-Ola complex ( $E_3tn$ ): 11 are the diorites; 12 are the gabbros; 13 are the acidic and basic effusives, schists of the Hamsarin series ( $E_3hm$ ); 14 are the faults; 15 are the geologic boundaries; 16 a) the contour of the quartz core; b) the contour of the Ak-Sug deposit

раннекембрийский возраст оруденения [9]. Видимо, формирование медно-порфирового оруденения Ак-Сугского месторождения происходило длительное время и имеет многоимпульсный характер эндогенных процессов (магматизма и оруденения).

В целом метасоматическая зональность месторождения Ак-Суг согласуется с типовой медно-порфировой зональностью метасоматической колонны, имеющей вид (от центра к периферии): «кварцевое ядро» → кварцевые, серицит-кварцевые (филлитовые) метасоматиты ± калиевые метасоматиты → кварц-серицитовые и кварц-серицит-хлоритовые метасоматиты → аргиллизиты → пропилиты. Калиевые метасоматиты развиты очень слабо. Картина зональности на отдельных участках иногда усложняется наложенной аргиллизацией, а также соседством пропилитов с породами «кварцевого ядра». Аргиллизиты не образуют какой-то определённо очерченной зоны, они встречаются в виде отдельных участков в зонах кварц-серицитовых и кварцевых метасоматитов. Около 80 % запасов руд месторождения сосредоточено в кварц-серицитовых, кварц-серицит-хлоритовых метасоматитах, аргиллизитах и аргиллизирован-

ных породах, образованных, прежде всего, за счёт порфировых пород. Оруденение Ак-Сугского месторождения представлено прожилковыми и прожилково-вкрапленными рудами [7, 10].

На Ак-Сугском месторождении выделено семь стадий гидротермального минералообразования: 1) пирит-кварцевая, 2) молибденит-кварцевая, 3) галенит-молибденит-теннантит-халькопирит-кварцевая, 4) золото-пирит-борнит-халькопирит-кварцевая, 5) золото-пирит-халькопирит-блэкловорудно-кварцевая, 6) золото-теллуридно-борнит-халькопирит-кварцевая (развита менее всего) и 7) кварц-кальцитовая. От центра к периферии рудного штокаверка наблюдается следующая латеральная минералогическая зональность: пирит-молибденитовая минерализация в кварцевых и кварцево-слюдистых метасоматитах → молибденит-теннантит-халькопиритовая и Au-содержащая медная минерализация с золотом и электролитом в кварц-серицитовых метасоматитах → золото-теллуридно-борнит-халькопиритовая минерализация в кварц-серицитовых, серицит-гидрослюдистых метасоматитах и аргиллизитах → пиритовая в пропилитизированных породах. В центре ме-



**Рис. 2.** Взаимоотношения блёклых руд I генерации с другими сульфидными минералами: а) ксеноморфные зёрна галенита (Gn), Se-галенита (Se-gn) и Cu-теннантита (Cu-tn) в халькопирите (Ccp); б) срастание Zn-теннантита (Zn-tn) с халькопиритом (Ccp) в ассоциации с галенитом (Gn), Se-галенитом (Se-gn) и кварцем (Qz); в) срастание Zn-теннантита (Zn-tn) с халькопиритом (Ccp), галенитом (Gn), Se-галенитом (Se-gn) в ассоциации с кварцем (Qz); г) срастание Zn-теннантита (Zn-tn) с молибденитом (Mol), галенитом (Gn), Se-галенитом (Se-gn) в халькопирите (Ccp). Здесь и на рис. 3 – фотографии в отражённых электронах

**Fig. 2.** Relationship of the I generation fahlores with other sulfide minerals: а) xenomorphic grains of galena (Gn), Se-galena (Se-gn) and Cu-tennantite (Cu-tn) in chalcopyrite (Ccp); б) fusion of Zn-tennantite (Zn-tn) with chalcopyrite (Ccp) in association with galena (Gn), Se-galena (Se-gn) and quartz (Qz); в) fusion of Zn-tennantite (Zn-tn) with chalcopyrite (Ccp), galena (Gn), Se-galena (Se-gn) in association with quartz (Qz); г) fusion of Zn-tennantite (Zn-tn) with molybdenite (Mol), galena (Gn), Se-galena (Se-gn) in chalcopyrite (Ccp). Here and in Fig. 3 – the photos are in reflected electrons

сторождения располагается ясно выраженное кварцевое «ядро» с бедной пирит-молибденитовой минерализацией.

#### Методы исследования

При детальном минералогическом исследовании руд в качестве критериев для установления последовательности формирования руд авторами использованы различные онтогенетические признаки, включая состав, строение, зональность минералов, индукционные поверхности, минеральные парагенезисы, пресечение жил и прожилков минеральных агрегатов, цементация обломков ранних минералов поздними и т. д. Состав минералов определялся на растровом сканирующем электронном

микроскопе MIRA 3 LMU. Для сравнительного анализа блёклых руд использовано три известных модуля, рассчитываемые по формульным коэффициентам: железистость –  $Fe^* = 100Fe/(Fe+Zn)$ , сурьмянистость –  $Sb^* = 100Sb/(Sb+As+Te+Bi)$  и формальная медистость –  $Cu^* = 100(Cu-10)/(Fe+Zn)$  [1].

#### Генерации и химический состав блёклых руд

Блёклые руды на месторождении выделялись в галенит-молибденит-теннантит-халькопирит-кварцевую (3 стадия, I генерация), золото-пирит-халькопирит-блёкловорудно-кварцевую (5 стадия, II генерация) и золото-теллуридно-борнит-халькопирит-кварцевую (6 стадия, III генерация) стадии.

**Таблица 1.** Химический состав блёклых руд Ак-Сугского месторождения (мас. %)

**Table 1.** Chemical composition of fahlores of the Ak-Sug deposit (wt. %)

| Образец/Sample                | Анализ/Analysis | Cu    | Zn   | Fe   | As    | Sb    | Te   | Bi   | S     | Сумма/Total | Fe*  | Sb*  | Cu*    |
|-------------------------------|-----------------|-------|------|------|-------|-------|------|------|-------|-------------|------|------|--------|
| I генерация /I generation     |                 |       |      |      |       |       |      |      |       |             |      |      |        |
| К-4Г                          | 1               | 48,52 | 2,13 | 0,61 | 20,40 | 0,20  | -    |      | 28,05 | 99,91       | 0,25 | 0,01 | 204,87 |
| 6-2/2                         | 2               | 45,96 | 1,58 | 2,66 | 20,19 | 0,49  |      |      | 28,16 | 99,04       | 0,66 | 0,01 | 72,35  |
| 8-5/2                         | 3               | 47,10 | 2,55 | 1,72 | 19,70 | 0,70  |      |      | 28,14 | 99,91       | 0,44 | 0,02 | 94,92  |
| 6-2/4                         | 4               | 47,50 | 0,80 | 3,90 | 20,30 | 0,50  |      |      | 27,70 | 100,7       | 0,85 | 0,01 | 83,70  |
| 5Г-6                          | 5               | 45,50 | 2,50 | 2,80 | 19,30 | 2,10  |      |      | 27,60 | 99,80       | 0,57 | 0,06 | 53,23  |
| As-86                         | 6               | 44,94 | 3,19 | 2,64 | 18,58 | 2,79  |      |      | 27,62 | 99,76       | 0,49 | 0,08 | 41,39  |
| 8-5                           | 7               | 43,14 | 3,74 | 2,96 | 16,45 | 6,01  |      |      | 27,68 | 99,98       | 0,48 | 0,18 | 14,85  |
| II генерация /II generation   |                 |       |      |      |       |       |      |      |       |             |      |      |        |
| 6-2                           | 8               | 47,44 | 1,30 | 3,04 | 20,12 | 0,29  | -    |      | 27,72 | 99,91       | 0,73 | 0,01 | 96,82  |
| As-к7б                        | 9               | 45,01 | 4,67 | 1,23 | 19,21 | 1,65  |      |      | 28,22 | 99,99       | 0,24 | 0,05 | 37,72  |
| As-к7б                        | 10              | 44,62 | 5,08 | 1,10 | 18,82 | 2,30  |      |      | 28,06 | 99,98       | 0,20 | 0,07 | 32,39  |
| As-к7а                        | 11              | 43,09 | 5,29 | 1,37 | 18,65 | 3,24  |      |      | 28,37 | 100,01      | 0,23 | 0,10 | 7,39   |
| As-42                         | 12              | 43,51 | 4,9  | 1,69 | 14,49 | 8,25  |      |      | 27,12 | 99,96       | 0,29 | 0,25 | 29,08  |
| As-42                         | 13              | 43,69 | 4,97 | 1,15 | 14,49 | 8,41  |      |      | 27,28 | 99,99       | 0,21 | 0,26 | 34,41  |
| As-42                         | 14              | 43,11 | 5,20 | 2,10 | 13,78 | 8,45  |      |      | 27,01 | 99,65       | 0,32 | 0,27 | 22,40  |
| As-42                         | 15              | 43,41 | 4,95 | 2,16 | 13,71 | 8,63  |      |      | 26,68 | 99,54       | 0,34 | 0,28 | 29,41  |
| As-42                         | 16              | 43,60 | 4,84 | 1,54 | 14,14 | 8,70  |      |      | 27,16 | 99,98       | 0,27 | 0,27 | 32,16  |
| As-42                         | 17              | 43,54 | 5,05 | 1,38 | 13,96 | 8,75  |      |      | 26,88 | 99,56       | 0,24 | 0,27 | 34,95  |
| As-42                         | 18              | 42,04 | 5,13 | 2,72 | 13,29 | 9,22  |      |      | 26,98 | 99,38       | 0,38 | 0,30 | 9,56   |
| As-40                         | 19              | 43,45 | 4,69 | 2,11 | 13,25 | 9,41  |      |      | 27,08 | 99,99       | 0,34 | 0,30 | 28,62  |
| As-40                         | 20              | 43,60 | 4,85 | 1,39 | 13,80 | 9,52  |      |      | 27,24 | 100,40      | 0,25 | 0,30 | 32,23  |
| As-40                         | 21              | 43,20 | 4,74 | 1,71 | 14,06 | 9,18  |      |      | 27,09 | 99,98       | 0,30 | 0,29 | 26,95  |
| III генерация /III generation |                 |       |      |      |       |       |      |      |       |             |      |      |        |
| As-41                         | 22              | 42,50 | 4,75 | 2,07 | 14,81 | 8,52  | -    | -    | 27,74 | 100,39      | 0,34 | 0,26 | 8,86   |
| As-41                         | 23              | 42,71 | 4,98 | 1,51 | 13,70 | 8,79  | -    | 1,42 | 26,85 | 99,96       | 0,26 | 0,28 | 24,91  |
| As-41                         | 24              | 43,49 | 4,98 | 1,12 | 13,84 | 9,28  | -    | -    | 26,96 | 99,67       | 0,21 | 0,29 | 36,67  |
| As-41                         | 25              | 42,47 | 5,15 | 1,26 | 13,48 | 9,49  | -    | 1,21 | 26,91 | 99,97       | 0,22 | 0,30 | 22,31  |
| As-41                         | 26              | 43,55 | 5,15 | 1,15 | 13,62 | 9,66  | -    | -    | 26,85 | 99,98       | 0,21 | 0,30 | 36,17  |
| As-41                         | 27              | 42,60 | 5,25 | 1,32 | 12,92 | 9,87  | -    | 1,05 | 26,95 | 99,96       | 0,23 | 0,31 | 23,46  |
| As-41                         | 28              | 42,71 | 5,01 | 1,94 | 13,39 | 9,88  | -    | -    | 26,73 | 99,66       | 0,31 | 0,31 | 22,33  |
| As-41                         | 29              | 42,47 | 5,08 | 1,31 | 13,08 | 9,91  | 0,13 | 1,32 | 26,69 | 99,99       | 0,23 | 0,31 | 24,87  |
| As-41                         | 30              | 42,95 | 5,07 | 1,05 | 12,83 | 9,95  | -    | 1,47 | 26,65 | 99,97       | 0,20 | 0,31 | 34,60  |
| As-41                         | 31              | 41,92 | 5,17 | 1,45 | 13,29 | 10,10 | -    | 1,09 | 26,96 | 99,98       | 0,24 | 0,31 | 13,77  |
| As-41                         | 32              | 43,23 | 5,08 | 1,14 | 13,11 | 10,23 | -    | -    | 27,22 | 100,01      | 0,21 | 0,32 | 30,40  |
| As-41                         | 33              | 42,90 | 5,41 | 1,02 | 12,75 | 11,22 | -    | -    | 27,18 | 100,48      | 0,18 | 0,35 | 24,46  |
| As-41                         | 34              | 42,17 | 5,50 | 1,66 | 12,18 | 11,34 | -    | -    | 26,61 | 99,46       | 0,26 | 0,36 | 18,59  |

Примечание. Состав блёклых руд определен на растровом электронном микроскопе MIRA 3 LMU (г. Новосибирск).  $Fe^* = Fe/(Fe+Zn)$ ,  $Sb^* = Sb/(As+Bi+Te+Sb)$ ,  $Cu^* = 100(Cu-10)/(Fe+Zn)$ . Прочерк – ниже предела обнаружения.

Note. Composition of the fahlores was determined on MIRA 3 LMU scanning electron microscope (Novosibirsk).  $Fe^* = Fe/(Fe+Zn)$ ,  $Sb^* = Sb/(As+Bi+Te+Sb)$ ,  $Cu^* = 100(Cu-10)/(Fe+Zn)$ . Dash – below detection limit.

Выделения до 200 мкм блёклых руд I генерации образуют включения и прожилки в кварце и халькопирите в ассоциации с молибденитом, халькопиритом, галенитом, Се-галенитом (Se до 1 мас. %), пиритом, сфалеритом (Fe до 0,24 мас. %). Иногда наблюдаются прожилковидные выделения молибденита, галенита, Се-галенита с Zn-теннантитом в халькопирите (рис. 2).

По химическому составу блёклые руды I генерации относятся к Cu-теннантиту, Fe-теннантиту и Zn-теннантиту. Cu-теннантит характеризуется высокими значениями медистости (Cu\* от 72,35 до 204,87), железистости (Fe\* от 0,25 до 0,66) и низкими значе-

ниями сурьмянистости (Sb\* от 0,01 до 0,02). В Fe-теннантите значения Cu\* варьирует от 53,23 до 83,70, Fe\* – 0,57–0,85, Sb\* – 0,01–0,06. В Zn-теннантите значения Cu\* варьирует от 14,85 до 41,39, Sb\* – 0,08–0,18, в то время как значение Fe\* не меняется (0,48–0,49) (табл. 1, 2). Блёклые руды данной генерации характеризуются слабой зональностью, обусловленной увеличением содержания Sb к внешним зонам. По химическому составу прослеживается их эволюция от высокомедистого теннантита до Zn-теннантита через Fe-теннантит. Величина Sb\* в блёклых рудах I генерации варьирует от 0,01 до 0,18, Cu\* – 14,85–204,87, Fe\* – 0,25–0,85.

**Таблица 2.** Кристаллохимические формулы блёклых руд Ак-Сугского месторождения

**Table 2.** Crystallochemical formulas of fahlores of the Ak-Sug deposit

| Образец/Sample                | Анализ/Analysis | Формула/Formula                                                                                        | Минерал/Mineral                                       |
|-------------------------------|-----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| I генерация /I generation     |                 |                                                                                                        |                                                       |
| K-4Г                          | 1               | $Cu_{10,00}(Zn_{0,48}Fe_{0,16}Cu_{1,32})_{1,96}(As_{4,04}Sb_{0,03})_{4,07}S_{12,97}$                   | Cu-теннантит<br>Cu-tennantite                         |
| 6-2/2                         | 2               | $Cu_{10,00}(Zn_{0,36}Fe_{0,71}Cu_{0,78})_{1,85}(As_{4,01}Sb_{0,06})_{4,07}S_{13,08}$                   |                                                       |
| 8-5/2                         | 3               | $Cu_{10,00}(Zn_{0,58}Fe_{0,45}Cu_{0,98})_{2,01}(As_{3,90}Sb_{0,09})_{3,99}S_{13,00}$                   |                                                       |
| 6-2/4                         | 4               | $Cu_{10,00}(Zn_{0,18}Fe_{1,03}Cu_{1,01})_{2,22}(As_{3,99}Sb_{0,06})_{4,05}S_{12,73}$                   | Fe-теннантит<br>Fe-tennantite                         |
| 5Г-6                          | 5               | $Cu_{10,00}(Zn_{0,57}Fe_{0,75}Cu_{0,70})_{2,16}(As_{3,85}Sb_{0,26})_{4,11}S_{12,88}$                   | Zn-теннантит<br>Zn-tennantite                         |
| As-86                         | 6               | $Cu_{10,00}(Zn_{0,73}Fe_{0,71}Cu_{0,60})_{2,04}(As_{3,71}Sb_{0,34})_{4,05}S_{12,91}$                   |                                                       |
| 8-5                           | 7               | $Cu_{10,00}(Zn_{0,86}Fe_{0,80}Cu_{0,25})_{1,91}(As_{3,31}Sb_{0,76})_{4,07}S_{13,03}$                   |                                                       |
| II генерация /II generation   |                 |                                                                                                        |                                                       |
| 6-2                           | 8               | $Cu_{10,00}(Zn_{0,29}Fe_{0,81}Cu_{1,06})_{2,16}(As_{3,98}Sb_{0,04})_{4,02}S_{12,82}$                   | Cu-теннантит<br>Cu-tennantite                         |
| As-к76                        | 9               | $Cu_{10,00}(Zn_{1,06}Fe_{0,33}Cu_{0,52})_{1,91}(As_{3,81}Sb_{0,20})_{4,01}S_{13,08}$                   | Zn-теннантит<br>Zn-tennantite                         |
| As-к76                        | 10              | $Cu_{10,00}(Zn_{1,16}Fe_{0,29}Cu_{0,47})_{1,92}(As_{3,75}Sb_{0,28})_{4,03}S_{13,05}$                   |                                                       |
| As-к7а                        | 11              | $Cu_{10,00}(Zn_{1,21}Fe_{0,37}Cu_{0,12})_{1,70}(As_{3,71}Sb_{0,40})_{4,11}S_{13,19}$                   |                                                       |
| As-42                         | 12              | $Cu_{10,00}(Zn_{1,14}Fe_{0,46}Cu_{0,47})_{2,07}(As_{2,96}Sb_{1,04})_{4,00}S_{12,93}$                   | Zn-теннантит-тетраэдрит<br>Zn-tennantite-tetrahedrite |
| As-42                         | 13              | $Cu_{10,00}(Zn_{1,16}Fe_{0,31}Cu_{0,51})_{1,98}(As_{2,96}Sb_{1,06})_{4,02}S_{13,00}$                   |                                                       |
| As-42                         | 14              | $Cu_{10,00}(Zn_{1,22}Fe_{0,58}Cu_{0,40})_{2,20}(As_{2,82}Sb_{1,06})_{3,88}S_{12,92}$                   |                                                       |
| As-42                         | 15              | $Cu_{10,00}(Zn_{1,17}Fe_{0,60}Cu_{0,51})_{2,28}(As_{2,82}Sb_{1,09})_{3,91}S_{12,81}$                   |                                                       |
| As-42                         | 16              | $Cu_{10,00}(Zn_{1,14}Fe_{0,42}Cu_{0,50})_{2,06}(As_{2,89}Sb_{1,10})_{3,99}S_{12,96}$                   |                                                       |
| As-42                         | 17              | $Cu_{10,00}(Zn_{1,18}Fe_{0,38}Cu_{0,55})_{2,11}(As_{2,87}Sb_{1,11})_{3,98}S_{12,90}$                   |                                                       |
| As-42                         | 18              | $Cu_{10,00}(Zn_{1,21}Fe_{0,74}Cu_{0,19})_{2,14}(As_{2,73}Sb_{1,17})_{3,90}S_{12,96}$                   |                                                       |
| As-40                         | 19              | $Cu_{10,00}(Zn_{1,10}Fe_{0,58}Cu_{0,48})_{2,16}(As_{2,71}Sb_{1,18})_{3,89}S_{12,95}$                   |                                                       |
| As-40                         | 20              | $Cu_{10,00}(Zn_{1,13}Fe_{0,38}Cu_{0,49})_{2,00}(As_{2,82}Sb_{1,19})_{4,01}S_{12,99}$                   |                                                       |
| As-40                         | 21              | $Cu_{10,00}(Zn_{1,13}Fe_{0,38}Cu_{0,49})_{2,00}(As_{2,82}Sb_{1,19})_{4,01}S_{12,99}$                   |                                                       |
| III генерация /III generation |                 |                                                                                                        |                                                       |
| As-41                         | 22              | $Cu_{10,00}(Zn_{1,10}Fe_{0,56}Cu_{0,15})_{1,81}(As_{3,00}Sb_{1,06})_{4,06}S_{13,12}$                   | Zn-теннантит-тетраэдрит<br>Zn-tennantite-tetrahedrite |
| As-41                         | 23              | $Cu_{10,00}(Zn_{1,18}Fe_{0,42}Cu_{0,40})_{2,00}(As_{2,83}Sb_{1,12}Bi_{0,11})_{4,05}S_{12,95}$          |                                                       |
| As-41                         | 24              | $Cu_{10,00}(Zn_{1,17}Fe_{0,31}Cu_{0,54})_{2,02}(As_{2,85}Sb_{1,18})_{4,03}S_{12,95}$                   |                                                       |
| As-41                         | 25              | $Cu_{10,00}(Zn_{1,22}Fe_{0,35}Cu_{0,35})_{1,92}(As_{2,78}Sb_{1,21}Bi_{0,09})_{4,08}S_{13,00}$          |                                                       |
| As-41                         | 26              | $Cu_{10,00}(Zn_{1,21}Fe_{0,32}Cu_{0,55})_{2,08}(As_{2,80}Sb_{1,22})_{4,02}S_{12,90}$                   |                                                       |
| As-41                         | 27              | $Cu_{10,00}(Zn_{1,24}Fe_{0,37}Cu_{0,38})_{1,99}(As_{2,67}Sb_{1,25}Bi_{0,08})_{4,00}S_{13,01}$          |                                                       |
| As-41                         | 28              | $Cu_{10,00}(Zn_{1,18}Fe_{0,54}Cu_{0,38})_{2,10}(As_{2,76}Sb_{1,25})_{4,01}S_{12,89}$                   |                                                       |
| As-41                         | 29              | $Cu_{10,00}(Zn_{1,21}Fe_{0,36}Cu_{0,39})_{1,96}(As_{2,71}Sb_{1,27}Bi_{0,10}Te_{0,02})_{4,10}S_{12,94}$ |                                                       |
| As-41                         | 30              | $Cu_{10,00}(Zn_{1,21}Fe_{0,29}Cu_{0,52})_{2,02}(As_{2,66}Sb_{1,27}Bi_{0,11})_{4,04}S_{12,94}$          |                                                       |
| As-41                         | 31              | $Cu_{10,00}(Zn_{1,23}Fe_{0,40}Cu_{0,22})_{1,85}(As_{2,75}Sb_{1,29}Bi_{0,08})_{4,12}S_{13,03}$          |                                                       |
| As-41                         | 32              | $Cu_{10,00}(Zn_{1,20}Fe_{0,31}Cu_{0,46})_{1,97}(As_{2,69}Sb_{1,29})_{3,98}S_{13,05}$                   |                                                       |
| As-41                         | 33              | $Cu_{10,00}(Zn_{1,27}Fe_{0,28}Cu_{0,38})_{1,93}(As_{2,62}Sb_{1,42})_{4,04}S_{13,03}$                   |                                                       |
| As-41                         | 34              | $Cu_{10,00}(Zn_{1,31}Fe_{0,46}Cu_{0,33})_{2,10}(As_{2,53}Sb_{1,45})_{3,98}S_{12,92}$                   |                                                       |

Примечание. Формулы блёклых руд рассчитаны на 29 формульных коэффициента, с использованием данных из табл. 1.

Note. Formulas of fahlores are designed for 29 formula coefficients, using the data from Table 1.

Блёклые руды II генерации пользуются наибольшим распространением. Они слагают выделения разнообразной формы, их минеральные выделения с халькопиритом и пиритом в кварцевых жилах образуют скопления до 2 см. Довольно часто в блёклых рудах данной генерации отмечаются включения касситерита, борнита, галенита, Se-галенита (Se до 6,96 мас. %), S-клаусталита (S до 5,09 мас. %), золота (Au – 70,78–95,86, Ag – 4,08–29,22) и электрума (Au – 63,37–66,84, Ag – 33,14–35,92), реже отмечаются включения науманнита и сфалерита (рис. 3 а, б).

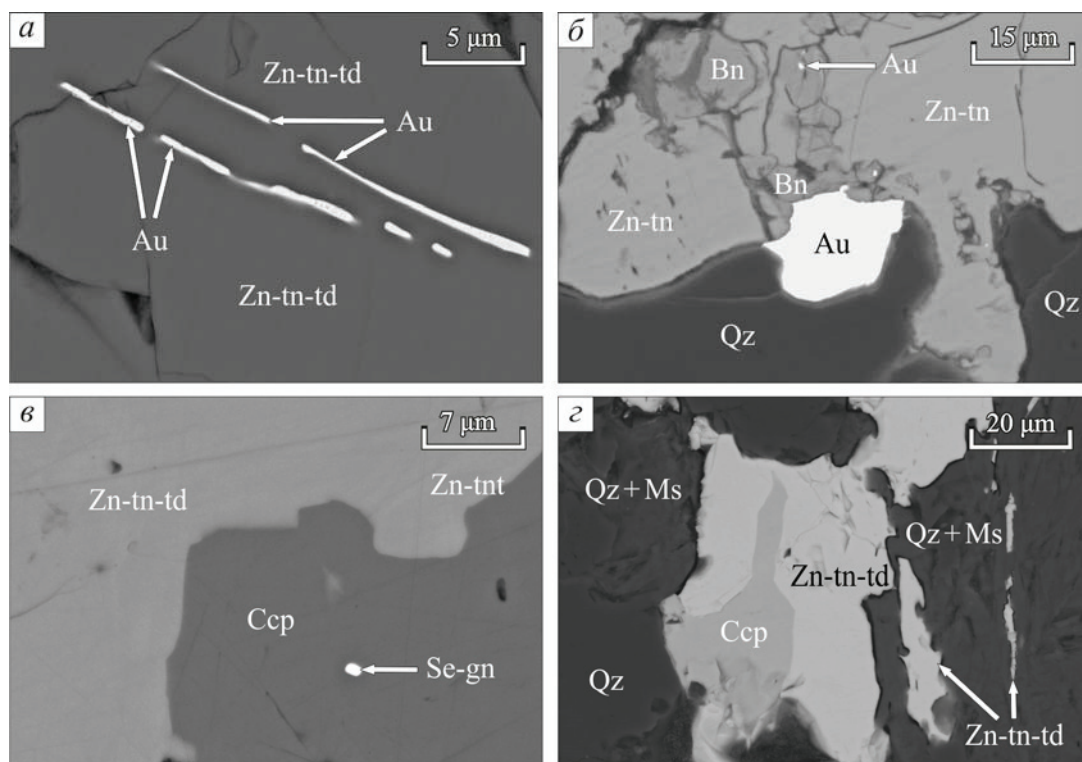
По химическому составу блёклые руды II генерации относятся к Cu-теннантиту, Zn-теннантиту и Zn-теннантит-тетраэдриту. Более ранний Cu-теннантит тоже характеризуется высокими значениями Cu\* (96,82), Fe\* (0,73) и низкими значениями Sb\* (0,01). В Zn-теннантите значения Cu\* варьирует от 7,39 до 37,72, Fe\* – 0,20–0,24, Sb\* – 0,05–0,10. Zn-теннантит-тетраэдрит характеризуется высокими значениями Sb\* – от 0,25 до 0,30, Fe\* – 0,21–0,38, Cu\* – 9,56–34,95. Соответственно, блёклые руды II генерации характеризуются вариациями Sb\* от 0,01 до 0,30, Cu\* – 7,39–96,82, Fe\* – 0,20–0,73, и по химическому составу эволю-

ционируют от высокомедистого теннантита до Zn-теннантит-тетраэдрита.

Редкие выделения (20–50 мкм) блёклых руд III генерации развиты в составе золото-теллуридно-борнит-халькопирит-кварцевой стадии в ассоциации с халькопиритом, борнитом, энаргитом, Se-галенитом (Se от 0,86 до 13,61 мас. %, Ag до 1,74 мас. %), клаусталитом, S-клаусталитом (S от 0,20 до 5,73 мас. %, Ag до 0,72 мас. %), гесситом, алтаитом, баритом, целестобаритом (SrO до 7 мас. %), S-кавацулитом, тетрадимитом, Se-тетрадимитом (Se до 2,82 мас. %) и виттихенитом (рис. 3 в, г).

В составе золото-теллуридно-борнит-халькопирит-кварцевой стадии, кроме выше перечисленных минералов, отмечаются следующие минералы: золото (Au 78,11–92,64, Ag 7,15–22,48), меренскиит PdTe<sub>2</sub>, арсенопалладинит Pd<sub>3</sub>As<sub>3</sub>, сопчеит Ag<sub>4</sub>Pd<sub>3</sub>Te<sub>4</sub>, петцит, калаверит, креннерит, сильванит, эмпресит, науманнит и S-науманнит (S до 2,17 мас. %).

По химическому составу блёклые руды III генерации представлены Zn-теннантит-тетраэдритом с примесью Bi до 1,47 мас. %, Te – 0,13 мас. % при Cu\* 8,86–36,67, Sb\* – 0,26–0,36, Fe\* – 0,18–0,34 (табл. 1, 2).



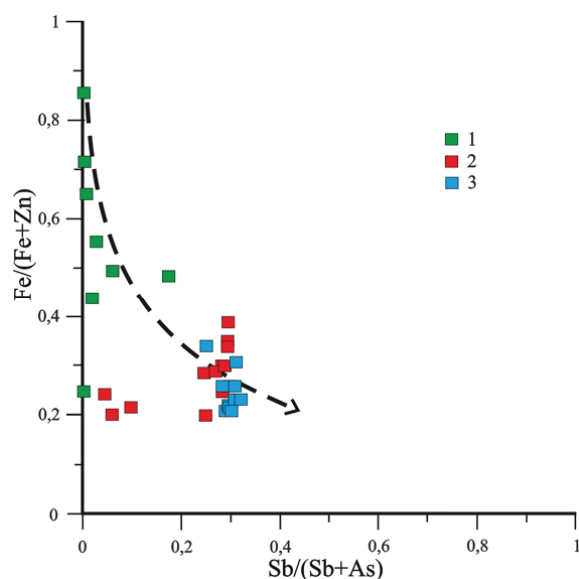
**Рис. 3.** Взаимоотношения блёклых руд I и II генерации с другими сульфидными минералами: а) Zn-теннантит-тетраэдрит (Zn-tn-td) II генерации с включениями золота (Au); б) срастание Zn-теннантита (Zn-tn) II генерации с борнитом (Bn), золотом (Au) и кварцем (Qz); в) срастание Zn-теннантита (Zn-tn) III генерации с халькопиритом (Ccp) в ассоциации с Se-галенитом (Se-gn); г) срастание Zn-теннантит-тетраэдрита (Zn-tn-nd) III генерации с халькопиритом (Ccp), кварцем (Qz) и серицитом (Ms)

**Fig. 3.** Relationship between fahlores of the I and II generation with other sulfide minerals: а) Zn-tennantite-tetrahedrite (Zn-tn-td) II generation with inclusions of gold (Au); б) fusion of Zn-tennantite (Zn-tn) II generation with bornite (Bn), gold (Au) and quartz (Qz); в) fusion of Zn-tennantite (Zn-tn) III generation with chalcopyrite (Ccp) in association with Se-galena (Se-gn); г) fusion of Zn-tennantite-tetrahedrite (Zn-tn-nd) III generation with chalcopyrite (Ccp), quartz (Qz) and muscovite (Ms)

### Обсуждение результатов

Для всех генераций блёклых руд Ак-Сугского месторождения характерна либо скрытая плавная зональность, либо отсутствие зональности, что указывает на плутоногенный тип оруденения. По данным [1, 3, 11], в плутоногенных месторождениях кристаллы блёклых руд ряда теннантит–тетраэдрит не обладают резко выраженной зональностью, поскольку формируются в упорядоченных условиях при постепенном снижении температуры. В то же время для кристаллов блёклых руд вулканогенных и вулканогенно-плутоногенных месторождений характерна резко выраженная зональность, часто осцилляционная. Зональность блёклых руд вулканогенно-плутоногенных месторождений обусловлена вариациями содержаний As–Sb и Zn–Fe, вулканогенных месторождений – As–Sb–Te–Bi, S–Se, Cu–Ag, Zn–Fe–Cu–Hg–Cd.

В блёклых рудах Ак-Сугского месторождения наблюдается эволюция от теннантита к теннантит–тетраэдриту (рис. 4), что отвечает стандартному тренду снижения температуры кристаллизации минералов группы блёклых руд [3].



**Рис. 4.** Соотношение  $Sb/(Sb+As)$  и  $Fe/(Fe+Zn)$  в блёклых рудах Ак-Сугского месторождения. 1–3 – точки составов блёклых руд: 1 – I генерации; 2 – II генерации; 3 – III генерации. Стрелкой показана эволюция состава блёклых руд

**Fig. 4.** Ratio of  $Sb/(Sb+As)$  and  $Fe/(Fe+Zn)$  in the fahlores of the Ak-Sug deposit. 1–3 – points of compositions of faded ores: 1 – I generation; 2 – II generation; 3 – III generation. The arrow shows the evolution of the composition of fahlores

Экспериментально установлено, что с понижением температуры возрастает сурьмянистость блёклых руд, ассоциирующих с энаргитом [12]. Эти данные согласуются с данными [13] об эволюции состава блёклых руд медно-порфировых месторождений от высокоцинкистого теннантита до высокоцинкистого тетраэдрита.

Отсутствие крайнего члена минералов ряда теннантит–тетраэдрит, т. е. тетраэдрита, обусловлено, видимо, эрозионным срезом месторождения (эрозией вскрыта средняя часть рудно-магматической системы), т. к. по данным Е.В. Нагорной [14] на сильно эродированных медно-порфировых объектах развит высокожелезистый теннантит, на среднеэродированных – как высокожелезистые, так и высокоцинкистые члены ряда теннантит–тетраэдрит.

Отсутствие примеси Ag и серебристых блёклых руд на Ак-Сугском месторождении, видимо, тоже обусловлено эрозионным срезом, т. к. по данным [15] более высокие содержания серебра и сурьмы в блёклых рудах наблюдаются на периферии порфирово-эпитермальной системы (на глубинах менее 1,5 км формируется Au–Ag эпитермальная минерализация, а на глубинах 2 и более км – Mo–Cu-порфировая), где разные уровни порфирово-эпитермальной системы обусловлены тектоническими подвижками и разным уровнем эрозии [16].

Наличие магнетита и вольфрамита в первой рудной пирит-кварцевой стадии свидетельствует о том, что минералообразование данной стадии происходило в условиях окисленности флюидов, при высокой фугитивности ( $f$ ) кислорода. Минералогические особенности стадии предполагают  $\lg f(O_2) = 10^{-7} - 10^{-6}$  (при  $T = 330^\circ\text{C}$ ), и  $\lg f(S_2) = 10^{-32} - 10^{-29}$  (при  $T = 200^\circ\text{C}$ ) [17–19]. Замещение магнетита гематитом (мартитизация) и образование магнетита по пластинчатым выделениям гематита (мушкетовитизация) свидетельствуют об изменениях  $f(O_2)$  при формировании руд.

Минералогические особенности второй и третьей стадий предполагают  $\lg f(S_2) = 10^{-7} - 10^{-12}$  (при  $300^\circ\text{C}$ ). Наличие позднего Se-галенита (Se до 1 мас. %) в третьей стадии предполагает повышение  $f(Se_2)$  в конце данной стадии [17, 18]. Эволюция блёклых руд третьей стадии (I генерации) от высокомедистого теннантита до Zn-теннантита через Fe-теннантит с высокими значениями  $Cu^*$  от 53,23 до 83,70 указывает на относительно высокий окислительный потенциал рудоносного флюида и на изменение окислительно-восстановительных условий, т. к. при высокой  $f(O_2)$  возникают цинкистые и высокомедистые блёклые руды [11]. По данным [20], увеличение содержаний железа в блёклой руде в некоторых случаях может быть обусловлено не столько повышенным содержанием этого элемента в гидротермальном растворе, сколько снижением температуры и активности серы рудообразующего флюида.

Решётчатая структура распада халькопирита в борните четвёртой стадии, согласно экспериментальным данным, формируется при охлаждении твёрдого раствора ниже  $250^\circ\text{C}$  [22]. Минеральные ассоциации пятой стадии отлагались при  $\lg f(S_2) = 10^{-7} - 10^{-12}$  (при  $300^\circ\text{C}$ ).

По электрум-сфалеритовому геотермометру [21] температуры формирования минеральных ассоциаций пятой стадии составили:  $367 - 194^\circ\text{C}$ . Ми-

нералогические особенности данной стадии предполагают  $\lg f(\text{S}_2)=10^{-25}-10^{-10}$ ,  $\lg f(\text{Se}_2)=10^{-20}-10^{-9}$  (при  $T=300^\circ\text{C}$ ) и высокую  $f\text{O}_2$  [17, 18], т. к. из блёклых руд отмечаются  $\text{Cu}$ -теннантит,  $\text{Zn}$ -теннантит и  $\text{Zn}$ -теннантит-тетраэдрит.

Температурный интервал формирования золото-теллуридной минерализации шестой стадии, судя по диаграмме стабильности  $\text{Au-Ag-Te}$  минералов ассоциации петцит-гессит-золото, соответствует  $253-181^\circ\text{C}$  при значении  $\lg f(\text{Te}_2)=10^{-16}-10^{-13}$  [23]. Минералогические особенности стадии предполагают  $\lg f(\text{S}_2)=10^{-19}-10^{-8}$ ,  $\lg f(\text{Se}_2)=10^{-17}-10^{-15}$  и  $\lg f(\text{Te}_2)=10^{-18}-10^{-8}$  (при  $T=250^\circ\text{C}$ ) [17, 18]. Постепенное увеличение цинкистости блёклых руд III генерации свидетельствуют о повышении  $f\text{O}_2$ , а наличие поздних селенидов (клаусталита, науманнита) подтверждает это предположение, т. к. последние отлагаются из растворов с высоким потенциалом  $f(\text{O}_2)$  [24].

Наличие обильных выделений ангидрита, барита и целестобарита на поздней кварц-кальцитовой стадии свидетельствует о том, что минеральные ассоциации данной стадии образовывались в относительно окисленных условиях.

Таким образом, данные минералогических исследований показывают, что для Ак-Сугского золото-молибден-медно-порфирового месторождения характерен окисленный состав рудообразующих флюидов, а главными факторами рудоотложения являются изменение окислительно-восстановительного характера и снижение температуры рудоносного флюида, т. е. понижение окислительного потенциала способствовало отложению сульфидов, а падение температуры более концентрированных ранних растворов приводило к уменьшению растворимости  $\text{Au}$  и его осаждению в самородной форме.

Отметим, что для большинства  $\text{Mo-Cu}$ -порфировых систем характерен окисленный состав раннего рудообразующего флюида. По данным [25–27], золото-молибден-медно-порфировые месторождения существенно отличаются по значениям окислительно-восстановительного потенциа-

ла, отвечающего сульфат-сульфидному равновесию, об этом свидетельствует присутствие сульфата (гипса) и сульфидов (халькопирит), а также гематита в качестве твёрдых фаз в кристаллофлюидных включениях.

### Заключение

По химическому составу блёклые руды Ак-Сугского месторождения относятся к промежуточным членам ряда теннантит-тетраэдрит, которые представлены тремя генерациями. Для блёклых руд Ак-Сугского месторождения характерна скрытая плавная зональность, обусловленная незначительным увеличением содержания  $\text{Sb}$  к внешним зонам, и их эволюция от теннантита к теннантит-тетраэдриту, что типично для плутоногенных месторождений. Наблюдаются следующие тренды блёклых руд, в т. ч. I генерации:  $\text{Cu}$ -теннантит  $\rightarrow$   $\text{Fe}$ -теннантит  $\rightarrow$   $\text{Zn}$ -теннантит; II генерации:  $\text{Cu}$ -теннантит  $\rightarrow$   $\text{Zn}$ -теннантит  $\rightarrow$   $\text{Zn}$ -теннантит-тетраэдрит; III генерация блёклых руд представлена  $\text{Zn}$ -теннантит-тетраэдритом. Соответственно, в блёклых рудах отмечается постепенное накопление сурьмы от ранних генераций к поздним. Эволюция состава блёклых руд предполагает, что на Ак-Сугском месторождении современным эрозионным срезом вскрыта средняя часть рудно-магматической системы. Расположенное в центре ясно выраженное кварцевое «ядро» с бедной пирит-молибденовой минерализацией тоже подтверждает данное утверждение.

Наличие высокомедистого теннантита,  $\text{Zn}$ -теннантита и  $\text{Zn}$ -теннантит-тетраэдрита и другие минералогические особенности руд Ак-Сугского месторождения свидетельствуют об относительно повышенном окислительном потенциале рудообразующих гидротермальных флюидов и о том, что главными факторами рудоотложения являются изменение окислительно-восстановительного характера, вариации  $f\text{S}_2$ ,  $f\text{Se}_2$ ,  $f\text{Te}_2$  и снижение температуры рудоносного флюида.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ (грант № 15-45-04195-р\_сибирь\_а).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Спиридонов Э.М. Типоморфные особенности блёклых руд некоторых плутоногенных, вулканогенных, телетермальных месторождений золота // Геология рудных месторождений. – 1987. – Т. 29. – № 6. – С. 83–91.
2. Кемкина Р.А. Блёклые руды Прасоловского вулканогенного  $\text{Au-Ag}$  месторождения (о. Кунашир, Дальний Восток России) // Тихоокеанская геология. – 2007. – Т. 26. – № 2. – С. 30–44.
3. Филимонов С.В. Минералы группы блёклых руд – индикаторы рудогенеза (на примере гидротермальных месторождений золота): автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – М., 2009. – 45 с.
4. Спиридонов Э.М. Обзор минералогии золота в ведущих типах  $\text{Au}$  минерализации // Золото Кольского полуострова и сопредельных регионов: Труды Всероссийской (с международным участием) научной конференции, посвящённой 80-летию Кольского НЦ РАН. – Апатиты, 26–29 сентября 2010. – Апатиты: Изд-во K&M, 2010. – С. 143–171.
5. Лебедев Н.И. Минеральные ресурсы Тувы: обзор и анализ полезных ископаемых / отв. ред. д-р геол.-минерал. наук В.И. Лебедев. – Кызыл: ТувиКОПР СО РАН, 2012. – 284 с.
6. Рязанова Е.И. Новейшее открытие Дальнего Востока России – золото-меднопорфировое месторождение Малмыж // Геология в развивающемся мире: сб. науч. тр. (по Материалам VIII науч.-практ. конф. студ., асп. и молодых учёных с международным участием): в 2 т. / отв. ред. П.А. Белкин. – Пермь, 2015. – Т. 1. – С. 52–55.
7. Забелин В.И. Элементы геолого-генетической модели Аксугского медно-молибденового месторождения // Магматизм и металлогения рудных районов Тувы. – Новосибирск: Наука, 1992. – С. 92–103.
8. Аксугское  $\text{Cu-Mo}$ -порфировое месторождение в Северо-Восточной Туве:  $\text{Ag/Ag}$  геохронология, источники вещества / В.И. Сотников, В.А. Пономарчук, Д.О. Шевченко, А.Н. Берзина // Геология и геофизика. – 2003. – Т. 44. – № 11. – С. 1119–1132.

9. Pollard P.J., Pelenkova E., Mathur R. Paragenesis and Re-Os Mo-lybdenite Age of the Cambrian Ak-Sug Porphyry Cu-Au-Mo Deposit, Tyva Republic, Russian Federation // *Economic Geology*. – 2017. – V. 112. – P. 1021–1028.
10. Особенности состава самородного золота в рудных ассоциациях Ак-Сугского золото-медно-молибден-порфирового месторождения, Восточная Тува / Р.В. Кужугет, А.К. Хертек, В.И. Лебедев, В.И. Забелин // *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири*. – 2015. – № 2 (22). – С. 45–52.
11. Minerals of Fahlore group: Indicators of Ore Genesis / E. Spiridonov, M. Maleev, V. Kovachev, I. Kulikova, G. Nazmova, S. Filimonov // *Bulgarian Geological Society, 80-th Anniversary: Proc. of the Jubilee International Conference. Bulgarian Geological Society*. – Sofia, 2005. – P. 79–82.
12. Feiss P.G. Reconnaissance of the tetrahedrite-tennantite enargite-famatinite phase relations as a possible geothermometer // *Economic Geology*. – 1974. – V. 69. – № 3. – P. 383–390.
13. Araya R.A., Bowles J.F., Simpson P.R. Relationships between composition and reflectance in the tennantite-tetrahedrite series of El Teniente ore deposit, Chile // *Neues Jahrbuch für Mineralogie, Monatshefte*. – 1977. – № 10. – P. 467–482.
14. Нагорная Е.В. Эволюция химического состава блёклых руд медно-молибден-порфировых месторождений Находкинского рудного поля // *Разведка и охрана недр*. – 2011. – № 8. – С. 11–16.
15. Плотинская О.Ю., Грабежев А.И., Зелтманн Р. Состав блёклых руд как элемент зональности порфирово-эпitherмальной системы (на примере рудопроявления Биксизак, Ю. Урал) // *Геология рудных месторождений*. – 2015. – Т. 57. – № 1. – С. 48–70.
16. Березняковское золоторудное месторождение (Южный Урал, Россия) / А.И. Грабежев, В.Н. Сазонов, В.В. Мурзин, В.П. Молошаг, В.И. Сотников, Н.С. Кузнецов, Б.А. Пужаков, Б.Г. Покровский // *Геология рудных месторождений*. – 2000. – Т. 42. – № 1. – С. 38–52.
17. Barton P.B., Skinner B.J. Sulfide mineral stabilities // *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits* / Ed. by H.L. Barnes. – New York: John Wiley and Sons, 1979. – P. 278–403.
18. Afifi A.M., Kelly W.C., Essene E.J. Phase relations among tellurides, sulfides, and oxides: I. Thermochemical data and calculated equilibria; II. Applications to telluride-bearing ore deposits. *Economic Geology*. – 1988. – V. 83. – P. 377–394; P. 395–404.
19. Sulfidation state of fluids in active and extinct hydrothermal systems: Transitions from porphyry to epithermal environments / M.T. Einaudi, J.W. Hedenquist, E.E. Inan // *Society of Economic Geologists Special Publication* 10. – 2003. – P. 285–313.
20. Бортников Н.С., Генкин А.Д., Коваленкер В.А. Минералогическо-химические показатели условий гидротермального рудообразования // *Эндогенные рудные районы и месторождения*. – М.: Наука, 1987. – С. 40–59.
21. Shikazono N.A. Comparison of temperatures estimated from the electrum-sphalerite-pyriteargentite assemblage and filling temperatures of fluid implications from epithermal Au–Ag vein type deposits in Japan // *Economic Geology*. – 1985. – V. 80. – № 5. – P. 1415–1424.
22. Durazzo A., Taylor L.A. Exsolution in the Mss-pentlandite system: textural and genetic implications for Ni-sulfide ores // *Mineralium Deposita*. – 1982. – V. 17. – P. 313–332.
23. Парагенезисы теллуридов золота и серебра в золоторудном месторождении Флоренсия (Республика Куба) / Н.С. Бортников, Х. Крамер, А.Д. Генкин и др. // *Геология рудных месторождений*. – 1988. – № 2. – С. 49–61.
24. Simone G., Kesler S.E., Essene E.J. Phase Relations among Selenides, Sulfides, Tellurides, and Oxides: II. Application to Selenide-Bearing Ore Deposits // *Economic Geology*. – 1997. – V. 92. – P. 468–484.
25. Состав и металлоносность магматогенных флюидов базитовых и гранитоидных мантийно-коровых рудно-магматических систем, продуцирующих Co-Ni-Pt, Cu-Mo-порфировые, Sn-W и Mo-W оруденение / А.А. Борисенко, А.А. Боровиков, Л.М. Житова, Г.А. Павлова, И.В. Гасков // *Модельный анализ развития континентальных мантийно-коровых рудообразующих систем*. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. – С. 154–174.
26. Geochemistry and fluid characteristics of the Dalli porphyry Cu–Au deposit, Central Iran / A. Zarsavandi, M. Rezaei, J. Rathi, D. Lentz, A.M. Azimzadeh, H. Pourkaseb // *Journal of Asian Earth Sciences*. – 2015. – V. 111. – P. 175–191.
27. Nature and evolution of the ore-forming fluids in the giant Dexing porphyry Cu–Mo–Au deposit, Southeastern China / X. Liu, H.R. Fan, F.F. Hu, K.F. Yang, B.J. Wen // *Journal of Geochemical Exploration*. – 2016. – V. 171. – P. 83–95.

Поступила 22.10.2017 г.

#### Информация об авторах

**Кужугет Р.В.**, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории геодинамики, магматизма и рудообразования Тувинского института комплексного освоения природных ресурсов СО РАН.

**Монгуш А.А.**, кандидат геолого-минералогических наук, заместитель директора по научным вопросам Тувинского института комплексного освоения природных ресурсов СО РАН.

**Монгуш А.-Д.О.**, соискатель ученой степени кандидата наук лаборатории геодинамики, магматизма и рудообразования Тувинского института комплексного освоения природных ресурсов СО РАН.

UDC 553.43: 553.41: 549.355 (571.52)

## EVOLUTION OF CHEMICAL COMPOSITION OF FAHLORES OF THE AK-SUG GOLD-MOLYBDENUM-COPPER-PORPHYRY DEPOSIT (NORTH-EAST TUVA)

**Renat V. Kuzhuget<sup>1</sup>,**  
rkuzhuget@mail.ru

**Andrey A. Mongush<sup>1</sup>,**  
amongush@inbox.ru

**Ai-Demir O. Mongush<sup>1</sup>,**  
aidemirm@rambler.ru

<sup>1</sup> Tuvian Institute for Exploration of Natural Resources SB RAS,  
117 a, Internatsionalnaya street, Kyzyl, 667007, Russia.

*The study of fahlores is one of the most effective areas of mineralogical research that allows deciphering the conditions for formation of ore deposits, which in its turn is the scientific basis for their search, exploration and rational mining.*

**The main aim** of the study was to reveal mineralogical-geochemical features and evolution of the composition of fahlores, as well as features of the ore-forming hydrothermal fluids that formed the Ak-Sug gold-molybdenum-copper-porphyry deposit.

**Research methods:** field studies, detailed mineralogical studies with ore mineralization in polished sections (polished sections) with Olympus polishing microscope and electron microscope MIRA 3 LMU (Tescan Orsay Holding) combined with Xray microanalysis systems INCA Energy 450+Xmax-80 and INCA Wave 500 (Oxford Instruments Nanoanalysis Ltd).

**Results.** We revealed variations in composition of the fahlores group minerals of the Ak-Sug gold-molybdenum-copper-porphyry deposit, which are represented by the minerals of the tennantite-tetrahedrite series. The latter are developed as part of three mineral associations corresponding to three generations. For the fahlores, a latent smooth zoning is characteristic, due to an increase in the Sb content to the outer zones. Evolution of compositions of the I generation fahlores: Cu-tennantite → Fe-tennantite → Zn-tennantite, II generation: Cu-tennantite → Zn-tennantite → Zn-tennantite-tetrahedrite. Fahlores of the III generation is represented by Zn-tennantite-tetrahedrite. The presence of high-copper tennantite, Zn-tennantite, Zn-tennantite-tetrahedrite, and mineralogical features of the Ak-Sug ore deposits indicate a relatively increased oxidation potential of ore-forming hydrothermal fluids. The main factors of ore deposition were a change in the oxidation-reduction character, variations of  $fS_2$ ,  $fSe_2$ ,  $fTe_2$  and temperature decrease of ore-bearing fluid.

### Key words:

Fahlores, tennantite, tennantite-tetrahedrite, Au-Mo-Cu-porphyry deposit, Tuva.

*This work was supported by the grant no. 15-45-04195-p\_cubup\_a from the Russian Foundation for Basic Research.*

### REFERENCES

1. Spiridonov E.M. Typomorphic peculiarities of fahlores of some plutogenic, volcanogenic, and telethermal deposits of gold. *Geology of Ore Deposits*, 1987, no. 6, pp. 83–91. In Rus.
2. Kemkina R.A. Fahlores of the Prasolovka volcanogenic Au-Ag deposit (Kunashir Island, Russian Far East). *Russian Journal of Pacific Geology*, 2007, vol. 26, no. 2, pp. 30–44. In Rus.
3. Filimonov S. V. *Mineraly gruppy blyoklykh rud – indikatory rudogeneza (na primere gidrotermalnykh mestorozhdeniy zolota)*. Avtoreferat Kand. nauk [Minerals of Fahlore group as Indicators of Ore Genesis (by the Example of Hydrothermal Gold Deposits). Cand. Diss. Abstract]. Moscow, 2009. 45 p.
4. Spiridonov E.M. Obzor mineralogii zolota v vedushchikh tipakh Au mineralizatsii [Review of gold mineralogy in major types of Au mineralization]. *Zoloto Kolskogo poluostrova i sopredelnykh regionov. Trudy Vserossiiskoy (s mezhdunarodnym uchastiem) nauchnoy konferentsii, posvyashchennoy 80-letiyu Kolskogo NC RAN* [Gold of the Kola Peninsula and Adjacent Regions. Proceedings of the Russian (with Non-Russian Participants) Conference Dedicated to the 80<sup>th</sup> Anniversary of the Kola Scientific Center (Russian Academy of Sciences)]. Apatity, K&M Publ. pp. 143–171.
5. Lebedev N.I. Mineralnye resursy Tuvy: obzor i analiz poleznykh iskopaemykh [Mineral resources of Tuva: overview and analysis of mineral resources]. Kyzyl, TuvIKOPR SO RAN Publ., 2012. 284 p.
6. Ryazanova E.I. Noveyshee otkrytie Dalnego Vostoka Rossii – zoloto-mednoporfirovye mestorozhdeniya Malmyzh [Newest discovery of far East Russia – Malmyzh porphyry copper-gold deposit]. *Geologiya v razvivayushchetsya mire: sb. nauch. tr. (po Materialam VIII nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh s mezhdunarodnym uchastiem)* [Geology in the Developing World: Collection of the Scientifics Proc. (on the materials of the VIII scientific-practical conference of students, aspirants and young scientists with international participation)]. Perm, PGU Publ., 2015. Vol. 1, pp. 52–55.
7. Zabelin V.I. Elementy geologo-geneticheskoy modeli Aksugskogo medno-molibdenovogo mestorozhdeniya [Elements of the geological-genetic model of the Aksug copper-molybdenum deposit]. *Magmatizm i metallogeniya rudnykh rayonov Tuvy* [Magmatism and metallogeny of the ore regions of Tuva]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1992. pp. 92–103.
8. Sotnikov V.I., Ponomarchuk V.A., Shevchenko D.O., Berzina A.N. The Aksug porphyry Cu-Mo deposit in Northeastern Tuva: 40Ar/39Ar geochronology and resources of matter. *Russian Geology and Geophysics*, 2003, vol. 44, no. 11, pp. 1119–1132. In Rus.
9. Pollard P.J., Pelenkova E., Mathur R. Paragenesis and Re-Os Molybdenite Age of the Cambrian Ak-Sug Porphyry Cu-Au-Mo Deposit, Tyva Republic, Russian Federation. *Economic Geology*, 2017, vol. 112, pp. 1021–1028.
10. Kuzhuget R.V., Khertek A.K., Lebedev V.I., Zabelin V.I. Composition of native gold in ore associations of the Ak-Sug gold-cop-

- per-molybdenum porphyry deposit, Eastern Tuva. *Geology and mineral resources of Siberia*, 2015, no. 2 (22), pp. 45–52. In Rus.
11. Spiridonov E., Maleev M., Kovachev V., Kulikova I., Nazmova G., Filimonov S. Minerals of Fahlore group: Indicators of Ore Genesis. Bulgarian Geological Society, 80-th Anniversary. *Proc. of the Jubilee International Conference*. Sofia, Bulgarian Geological Society Publ., 2005. pp. 79–82.
  12. Feiss P.G. Reconnaissance of the tetrahedrite-tennantite enargite-famatinite phase relations as a possible geothermometer. *Economic Geology*, 1974, vol. 69, no. 3, pp. 383–390.
  13. Araya R.A., Bowles J.F., Simpson P.R. Relationships between composition and reflectance in the tennantite-tetrahedrite series of El Teniente ore deposit. Chile. *Neues Jahrbuch für Mineralogie, Monatshefte*, 1977, no. 10, pp. 467–482.
  14. Nagornaya E.V. Evolution of the chemical composition of the tennantite-tetrahedrite group minerals from porphyry copper-molybdenum deposits, Nakhodka ore field. *Prospect and protection of mineral resources*, 2011, no. 8, pp. 11–16. In Rus.
  15. Plotinskaya O.Y., Grabezhev A.I., Zeltmann R. Fahlores Compositional Zoning in a Porphyry–Epithermal System: Biksizak Occurrence, South Urals, Russia as an example. *Geology of Ore Deposits*, 2015, vol. 57, no. 1, pp. 48–70. In Rus.
  16. Grabezhev A.I., Sazonov V.N., Murzin V.V., Molo?ag V.P., Sotnikov V.I., Kuznetsov N.S., Puzhak B.A., Pokrosovsky B.G. The Bereznjakovsk Gold Deposit (South Urals, Russia). *Geology of Ore Deposits*, 2000, vol. 42, no. 1, pp. 38–52. In Rus.
  17. Barton P.B., Skinner B.J. Sulfide mineral stabilities. *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*. Ed. by H.L. Barnes. New York, John Wiley and Sons, 1979. pp. 278–403.
  18. Afifi A.M., Kelly W.C., Essene E.J. Phase relations among tellurides, sulfides, and oxides: I. Thermochemical data and calculated equilibria; II. Applications to telluride-bearing ore deposits. *Economic Geology*, 1988, vol. 83, pp. 377–394; 395–404.
  19. Einaudi M.T., Hedenquist J.W., Inan E.E. Sulfidation state of fluids in active and extinct hydrothermal systems: Transitions from porphyry to epithermal environments. *Society of Economic Geologists Special Publication 10*, 2003. pp. 285–313.
  20. Bortnikov N.S., Genkin A.D., Kovalenker V.A. Mineralogico-geokhimicheskie pokazateli uslovii gidrotermalnogo rudoobrazovaniya [Mineralogical-geochemical indices of hydrothermal ore formation conditions]. *Endogennye rudnye rayony i mestorozhdeniya* [Endogenous ore regions and deposits]. Moscow, Nauka Publ., 1987. pp. 40–59.
  21. Shikazono N.A. Comparison of temperatures estimated from the electrum-sphalerite-pyriteargentite assemblage and filling temperatures of fluid implications from epithermal Au–Ag vein type deposits in Japan. *Economic Geology*, 1985, vol. 80, no. 5, pp. 1415–1424.
  22. Durazzo A., Taylor L.A. Exsolution in the Mss–pentlandite system: textural and genetic implications for Ni-sulfide ores. *Mineralium Deposita*, 1982, vol. 17, pp. 313–332.
  23. Bortnikov N.S., Kramer Kh., Genkin A.D., Krapiva L.Ya., Santa Cruz M. Paragenesis of Gold and Silver Tellurides in the Florencia Gold Deposit, the Republic of Cuba. *Geology of Ore Deposits*, 1988, no. 2, pp. 49–61. In Rus.
  24. Simone G., Kesler S.E., Essene E.J. Phase Relations among Selenides, Sulfides, Tellurides, And Oxides: II. Application to Selenide-Bearing Ore Deposits. *Economic Geology*, 1997, vol. 92, pp. 468–484.
  25. Borisenko A.A., Borovikov A.A., Zhitova L.M., Pavlova G.A., Gaskov I.V. Sostav i metallonosnost magmatogennykh flyuidov bazitovykh i granitoidnykh mantiino-korovykh rudno-magmaticheskikh sistem, produtsiruyushchikh Co-Ni-Pt, Cu-Mo-porfirovye, Sn-W i Mo-W orudnenie [Composition and metal content of magmatogenous fluids of basite and granitoid mantle-crustal ore-magmatic systems producing Co-Ni-Pt, Cu-Mo-porphyry, Sn-W and Mo-W mineralization]. *Modelny analiz razvitiya kontinentalnykh mantiino-korovykh rudoobrazuyushchikh sistem* [Model Analysis of the Continental Mantle–Crust Ore-Forming Systems]. Novosibirsk, SO RAN Publ., 2009. pp. 154–174.
  26. Zarasvandi A., Rezaei M., Raith J., Lentz D., Azimzadeh A.M., Pourkaseb H. Geochemistry and fluid characteristics of the Dalli porphyry Cu–Au deposit, Central Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, vol. 111, pp. 175–191.
  27. Liu X., Fan H.R., Hu F.F., Yang K.F., Wen B.J. Nature and evolution of the ore-forming fluids in the giant Dexing porphyry Cu–Mo–Au deposit, Southeastern China. *Journal of Geochemical Exploration*, 2016, vol. 171, pp. 83–95.

Received: 22 October 2017.

#### Information about the authors

**Renat V. Kuzhuget**, Cand. Sc., senior researcher, Tuvinnian Institute for Exploration of Natural Resources SB RAS.

**Andrey A. Mongush**, Cand. Sc., deputy science director, Tuvinnian Institute for Exploration of Natural Resources SB RAS.

**Ai-Demir O. Mongush**, research scholar, Tuvinnian Institute for Exploration of Natural Resources SB RAS.

УДК 552.086; 552.581

## СЯГОЙСКИЙ УЧАСТОК АРКА-ТАБЬЯХИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ДИАТОМОВЫХ ГЛИН: ЛИТОЛОГИЯ ПОРОД И ПЕРСПЕКТИВЫ ОСВОЕНИЯ

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

**Константинов Александр Олегович<sup>1</sup>**,  
konstantinov.alexandr72@gmail.com

**Шадрин Андрей Николаевич<sup>3</sup>**,  
shadrin\_a\_n@sibsac.ru

**Баталин Георгий Александрович<sup>4</sup>**,  
g@batalin.com

**Гареев Булат Ирекович<sup>4</sup>**,  
bulat@gareev.net

**Новоселов Андрей Андреевич<sup>1</sup>**,  
mr.andreygeo@mail.ru

**Нафигин Рамазан Ринатович<sup>4</sup>**,  
Ramzantez-lotus@mail.ru

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

<sup>2</sup> Институт геологии и палеонтологии технического университета Клаусталь,  
Германия, 38678, Clausthal-Zellerfeld, Adolph-Roemer-Strasse, 2A.

<sup>3</sup> Сибирский научно-аналитический центр,  
Россия, 6250016, ул. Пермякова, 46.

<sup>4</sup> Казанский федеральный университет,  
Россия, 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 4/5.

**Актуальность.** Модернизация инфраструктуры нефтегазового комплекса Западной Сибири и освоение северных территорий предполагает широкое использование местного нерудного сырья. В районах, практически непосредственно примыкающих к основным производственным центрам региона, еще в 1970–1980 гг. были разведаны значительные запасы опал-кристобалитовых пород – диатомитов и опок, которые характеризуются приповерхностным залеганием. Дефицит отдельных видов минерального сырья в промышленном секторе севера Тюменской области составляет до 50–70 %, что формирует экономическую основу для разработки месторождений опал-кристобалитовых пород. Сягойский участок крупнейшего в приарктической зоне Арка-Табьяхинского месторождения, в силу особенностей геологического строения и приуроченности к параллельно-грядовому рельефу, можно считать репрезентативным примером месторождений опал-кристобалитовых пород севера Западной Сибири.

**Цель работы:** литологические исследования диатомовых глин и анализ перспектив освоения Сягойского участка Арка-Табьяхинского месторождения

**Методы исследований:** полевые исследования, рентгеноструктурный анализ, рентгенофлуоресцентный анализ, дифференциальный термический анализ, сканирующая электронная микроскопия, литолого-петрографический анализ.

**Результаты.** Сягойский участок характеризуется значительными прогнозными ресурсами и сравнительно высоким качеством сырья. Главными лимитирующими освоение месторождения факторами являются экономические и геологические. Геоморфологические и геокриологические условия территории распространения параллельно-грядового рельефа в сочетании с общей льдистостью, достигающей 50–60 %, окажут критическое влияние на стоимость технологических операций, связанных с разработкой месторождения, транспортировкой, хранением и переработкой сырья, сделав освоение месторождения убыточным. Реальные перспективы разработки опал-кристобалитовых пород на Крайнем Севере Западной Сибири существуют для месторождений, сочетающих в себе близость к потенциальным потребителям сырья и находящихся вне зоны распространения параллельно-грядового рельефа.

### **Ключевые слова:**

Опал-кристобалитовые породы, диатомит, диатомовая глина, литология, ирбитская свита, Западная Сибирь, Ямало-Ненецкий автономный округ, неметаллические полезные ископаемые, параллельно-грядовый рельеф.

## Введение

Расширение и модернизация инфраструктуры нефтегазового комплекса Западной Сибири, освоение северных территорий предполагают широкое использование различных видов нерудного минерального сырья. Недостаток местных строительных материалов определяет необходимость импорта отдельных видов продукции из-за пределов региона, что влечет за собой рост цен для потребителей. По отдельным видам природного сырья в промышленном секторе севера Тюменской области дефицит составляет до 50–70 % [1, 2].

Сложности с вовлечением в промышленный оборот запасов минерального сырья зачастую связаны не столько с отсутствием необходимого объема полезных ископаемых, сколько с вопросами оптимального размещения того или иного месторождения по отношению к потребителям и наличием достаточной инфраструктуры для его освоения. Именно поэтому особого внимания заслуживает тот факт, что в районах, практически непосредственно примыкающих к основным промышленным центрам севера Тюменской области, еще в 70–80-х гг. были разведаны значительные запасы кремниевых опал-кристобалитовых пород – диатомитов и опок. Кремниевые породы в пределах региона имеют приповерхностное залегание и могут рассматриваться в качестве перспективного вида минерального сырья многоцелевого назначения. Следует отметить, что интерес к ресурсам опал-кристобалитовых пород и другого нерудного сырья севера Тюменской области возрастает в связи с необходимостью научного и экономического освоения Арктики [3–12].

В период с 1982 по 1993 гг. на севере Тюменской области в ходе геологоразведочных работ были детально разведаны и учтены Государственным балансом запасы двух месторождений опал-кристобалитовых пород – Арка-Табьяхинского (в Ямало-Ненецком автономном округе) и Акрышевского (в Ханты-Мансийском автономном округе). Значительные запасы и близость Арка-Табьяхинского месторождения опал-кристобалитовых пород к Уренгойскому газовому месторождению, по мнению первых исследователей [13, 14], создавали возможность долгосрочного использования данного минерального сырья при производстве различных материалов, востребованных при освоении и обустройстве нефтяных, газовых и газоконденсатных месторождений. По результатам проведенных в тот же период исследований и технологических испытаний было установлено, что опал-кристобалитовые породы севера Тюменской области могут быть использованы для производства термолитового гравия, различных видов кирпича, гидравлических добавок в цементы, облегченных цементно-диатомовых растворов для крепления скважин. Вместе с тем в последнее время экономическая целесообразность разработки этих месторождений небезосновательно ставится под вопрос, в силу сложных для общераспространенных полезных ископаемых условий добычи.

Арка-Табьяхинское месторождение, в связи с его геологическим строением и приуроченностью к параллельно-грядовому рельефу [15], можно считать репрезентативным объектом для изучения и оценки других месторождений опал-кристобалитовых пород севера Западной Сибири, что и определяет актуальность настоящих исследований.

## Объекты и методы исследований

Арка-Табьяхинское месторождение диатомитов и диатомовых глин расположено в низовьях р. Нгарка-Табьяха (уст. р. Арка-Табьяха), в Пуровском районе Ямало-Ненецкого автономного округа (рис. 1); впервые было выявлено по результатам поисково-оценочных работ на кремнисто-опаловое сырье в северных районах Тюменской области, проведенных в 1983–1985 гг. Тюменской комплексной геологоразведочной экспедицией [16]. Месторождение состоит из трех основных площадей: Меридиональной, Сидятойской и Хангяхинской. Запасы Меридиональной и Сидятойской площадей диатомовых глин были оценены в объеме 11476,2 и 4390 тыс. м<sup>3</sup> соответственно по категории С<sub>2</sub>. Общие прогнозные ресурсы кремнистого сырья составляют 817,4 млн м<sup>3</sup> по категории Р<sub>1</sub>, из которых 750 млн м<sup>3</sup> приходится на Меридиональную площадь, 67,4 млн м<sup>3</sup> – на Сидятойскую. В качестве перспективного был выделен Сягойский участок, который является юго-восточным продолжением Арка-Табьяхинской зоны складчатого нагнетания и расположен в бассейне верхнего течения р. Сягойхадуттэ (левый приток р. Пур) в 70 км к северо-востоку от г. Новый Уренгой (66°35'40" N, 71°16'45" E).

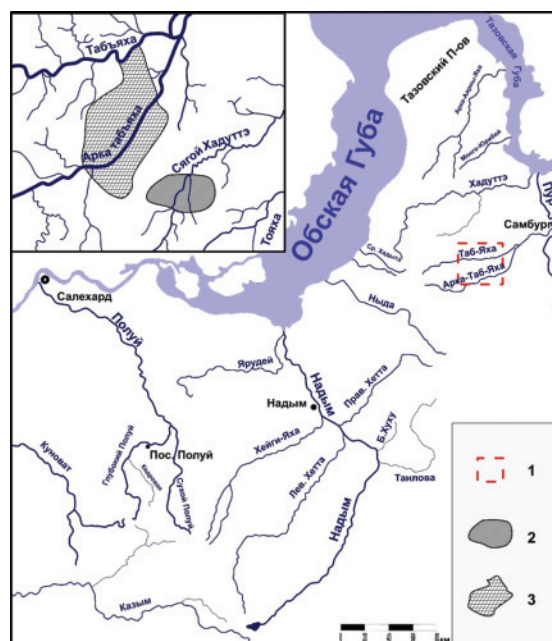


Рис. 1. Расположение объектов исследования: 1 – район распространения кремнистых пород; 2 – Сягойский участок; 3 – Арка-Табьяхинское месторождение

Fig. 1. Location of objects of research: 1 is the area of distribution of opal-cristobalite rocks; 2 is the Syagoy site; 3 is the Arka-Tabayakha deposit

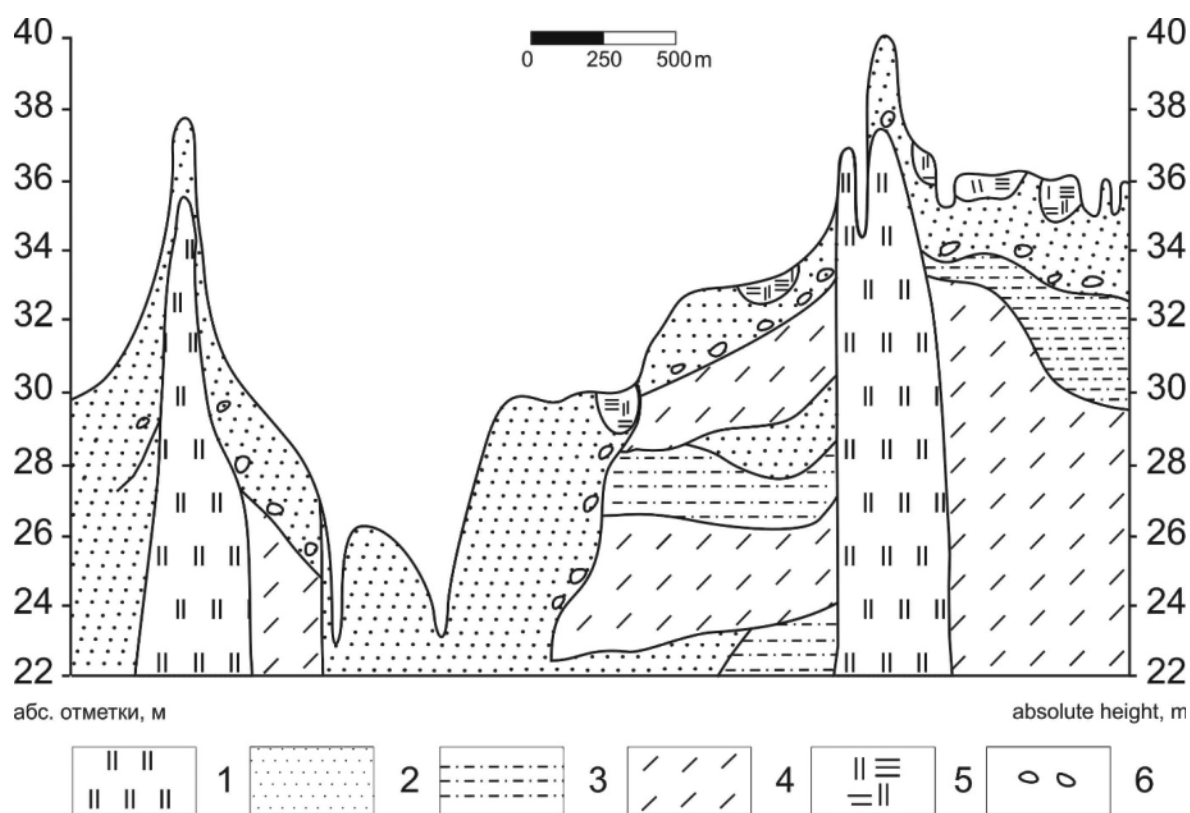
Кремниевые породы месторождения представлены диатомитами, диатомовыми глинами и глинистыми диатомитами ирбитской свиты эоцена, выходящими на дневную поверхность на участках развития параллельно-грядового рельефа Арка-Табьяхинской зоны дислокаций.

В настоящей работе представлены результаты полевых и лабораторных исследований диатомовых глин Сягойского участка. Образцы пород для дальнейших аналитических и микроскопических исследований отобраны А.Н. Шадриним, П.В. Смирновым и А.Н. Васильевым в нижней части осыпи по правому борту ручья по профилю скважин 46 и 47 (данные отчета А.П. Каменского, 1986). В естественном виде диатомовые глины светлые, сизо-серые с буроватым оттенком.

Лабораторные исследования включали рентгеноструктурный анализ, рентгенофлуоресцентный анализ, сканирующую электронную микроскопию, литолого-петрографический и термический анализ. Исследования общего химического и минерального составов были выполнены в Лаборатории изотопного и элементного анализа Института геологии и нефтегазовых технологий КФУ (г. Казань) и ООО «Западно-Сибирский Геологический центр» (г. Тюмень). Исследования химического состава проводились на рентгенофлуоресцентном волнодисперсионном спектрометре S8 Tiger (Bruker, Германия). По-

лученная таблетка помещалась в спектрометр, где проходил анализ стандартизированной методикой Geoquant. Полученный спектр обрабатывался методом фундаментальных параметров, удалялись ошибки автоматического распознавания, паразитные пики, учитывались дифракционные явления и матричные эффекты, для учета неопределяемых элементов использовалась величина потерь при прокаливании. Изучение геологических образцов с использованием сканирующей электронной микроскопии на аппаратно-программном комплексе на базе растрового электронного микроскопа JEOL JSM 6510A выполнен в Тюменском индустриальном университете; литолого-петрографический анализ в шлифах произведен в ООО «Западно-Сибирский Геологический Центр». Для глинистой фракции отдельно показаны соотношения глинистых минералов и полный минералогический состав, включавший диагностику минералов, которые ввиду малой размерности частиц принимают участие в формировании глинистой фракции, но к числу глинистых минералов не относятся.

Термический анализ выполнен в лаборатории физико-химических методов исследования Уральского научно-исследовательского химического института («УНИХИМ с ОЗ») в соответствии с методикой для исследования химических реакций, фазовых и других физико-химических превращений,



**Рис. 2.** Упрощенный геологический разрез Сягойского участка (по профилю I-I; по материалам Л.А. Миняйло, 1990): 1 – диатомовые глины; 2 – песок; 3 – глина песчаная; 4 – супесь; 5 – торф; 6 – галечный/гравийный материал

**Fig. 2.** Simplified geological section of the Syagoy section (along the I-I profile; according to the materials of L.A. Minyaylo, 1990): 1 is the clayey diatomite; 2 is the sand; 3 is the sandy clay; 4 is the sandy loam; 5 is the peat; 6 is the pebble/gravel material

происходящих под влиянием тепла в химических соединениях. Анализ производился на дериватографе MOM Q-1500 D венгерского производства при скорости подъема температуры 10 °С/мин, в диапазоне 20–1000 °С. С помощью дериватографа на одном образце можно одновременно определять потерю массы (кривая ТГ), скорость изменения массы (кривая ДТГ), тепловые эффекты (кривая ДТА) и изменение температуры (кривая Т).

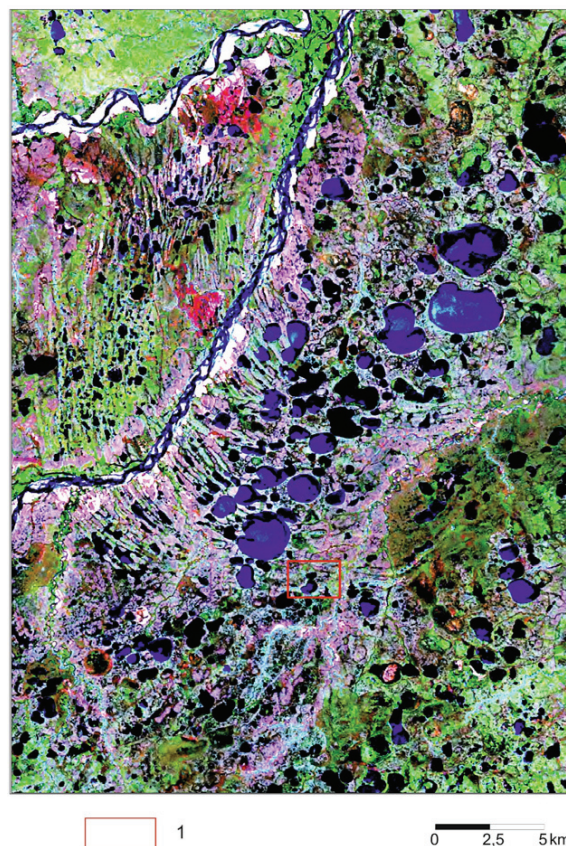
Результаты определений, представленные в работе, являются усредненными: для рентгеноструктурного анализа – по 5 пробам, рентгенофлуоресцентного анализа – по 8, термического анализа – по 5. При исследованиях с помощью растрового электронного микроскопа выполнено 40 микрозондовых определений состава породообразующих минералов, получено и интерпретировано более 50 изображений.

**Инженерно-геологические условия.** В пределах Сягойского участка развит грядово-холмистый рельеф с перепадами высот 5–10 м и крутизной склонов до 20–40°. Наиболее глубокие ложбины обводнены и заболочены, в крутых бортах наблюдаются незадернованные осыпи супесей и глин шириной до 10 м (рис. 2). Диатомиты, алевритистые диатомиты и диатомовые глины залегают в ядрах криогенных бугров пучения, цепь которых образует параллельные гряды, четко дешифрируемые на аэро-фото- и космоснимках (рис. 3).

Геокриологические условия отдельных гряд существенно различаются и обусловлены сочетанием локальных факторов, степенью дренированности, морфометрическими особенностями гряд и степенью трещиноватости пород. Высокая трещиноватость и брекчированность блоков кремнистых пород способствуют интенсивному формированию льда при промерзании. Морозобойное трещинообразование в залежах опал-кristобалитовых пород развито локально и по отношению к буграм и грядам пучения представляет собой явление вторичное и наложенное.

В целом для диатомовых глин характерна сильная изменчивость криогенного строения и высокая неравномерная по разрезу объемная льдистость, обусловленная содержанием льда-цемента и сегрегационного льда [17–20]. Диатомиты и диатомовые глины характеризуются наличием системы горизонтальных и наклонных прослоев льда толщиной 1–15 см с брекчевидными криогенными текстурами. В ядрах гряд до глубины около 10 м объемная льдистость диатомовых глин достигает 50–60 %, с глубиной постепенно уменьшается до 30–40 %. В песках, слагающих гряды и перекрывающих диатомиты, она равна 30–40 %, в межгрядовых понижениях – 15–25 % [15]. О значительной льдистости диатомитов и диатомовых глин свидетельствуют широкое развитие термокарстовых процессов и термокарстовых озер (рис. 3). Последние занимают межгрядовые понижения и по подсчетам на Арка-Табьяхинском месторождении составляют 2–3 %. Глубокие термокарстовые озера косвенно указывают, что силь-

нольдистые разности диатомитов и диатомовых глин при оттаивании будут давать усадку на 10–50 %, а в местах оттаивания крупных гидролакколитов еще выше [21, 22].



**Рис. 3.** Параллельно-грядовый рельеф и термокарстовые озера на территории Арка-Табьяхинского месторождения. Вид из космоса (по данным ASTER): 1 – Сягойский участок. Пространственное разрешение 30 м

**Fig. 3.** Parallel-ridge relief and thermokarst lakes in the territory of Arka-Tabayakha deposit. A view from outer space (according to ASTER): 1 is the Syagoy site. Spatial resolution is 30 m

## Результаты

**Литолого-петрографическая характеристика пород.** Диатомиты состоят преимущественно из опалового кремнезема, который формирует панцири диатомовых водорослей. Для крупных кремнистых фоссилий характерна хорошая сохранность и поровое пространство, отмытое от глинистых минералов и без глобулей кремнезема (рис. 4, а, с, d). Присутствует незначительная примесь алевритового материала в виде обломков кварца, полевого шпата, реже глинистых минералов. Повсеместно наблюдаются глинистые минералы, преимущественно смектиты и гидрослюда с чешуйчатой и хлопьевидной морфологией частиц. Глины чаще ассоциируют между собой и с мелким диатомовым детритом, нередко образуя комковатые скопления (рис. 4, b), а в меньшей степени приурочены к крупным кремнистым микрофоссилиям (рис. 4).

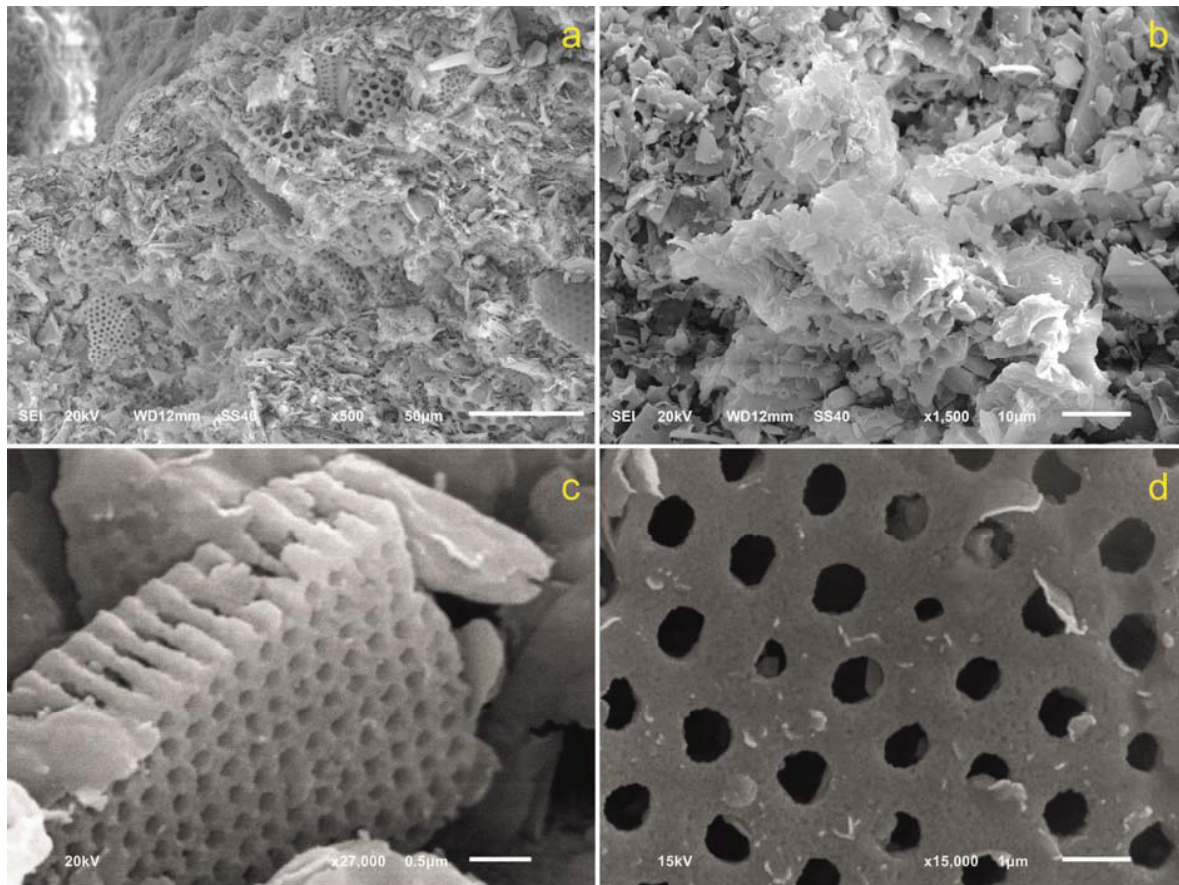


Рис. 4. Микроструктура диатомовых глин: а) общий вид; б) кремнисто-глинистые агрегаты; с, d) поровое пространство

Fig. 4. Microstructure of clayey diatomites: a) general view; b) siliceous-clay aggregates; c, d) porous space

При анализе доминирующих индексов-видов диатомовых водорослей изученные диатомиты можно отнести к комплексу *Coscinodiscus payeri* нижнего эоцена. Характерны *Pyxidicula moelleri* (A. Schmidt) *Strelnikova et Nikolaev*, *Coscinodiscus payeri* Grunow, *Moissevia uralensis* (Jousé) *Strelnikova*, *Stephanopyxis turris* (Greville in Gregory) *Ralf in Pritchard*, *Grunowiella gemmata* (Grunow) *Van Hearck*, *P. grunowii* Gleser, *P. polaris* (Grunow) Gleser, *Anuloplicata concentrica* (Grunow) Gleser, *A. ornata* (Grunow) Gleser, *Stephanopyxis edita* Jousé, *Trinacria excavata* Heiberg, *T. regina* Heiberg, *T. heibergii* Kitton, *Stellarima microtrias* (Ehrenberg) *Hasle et Sims*, *Vallodiscus lanceolatus* Suto, *Costopyxis broschii* (Grunow) *Strelnikova et Nikolaev*, *Pseudotriceratium chenevieri* (Meister) Gleser, *Soleum exsculptum* Heiberg.

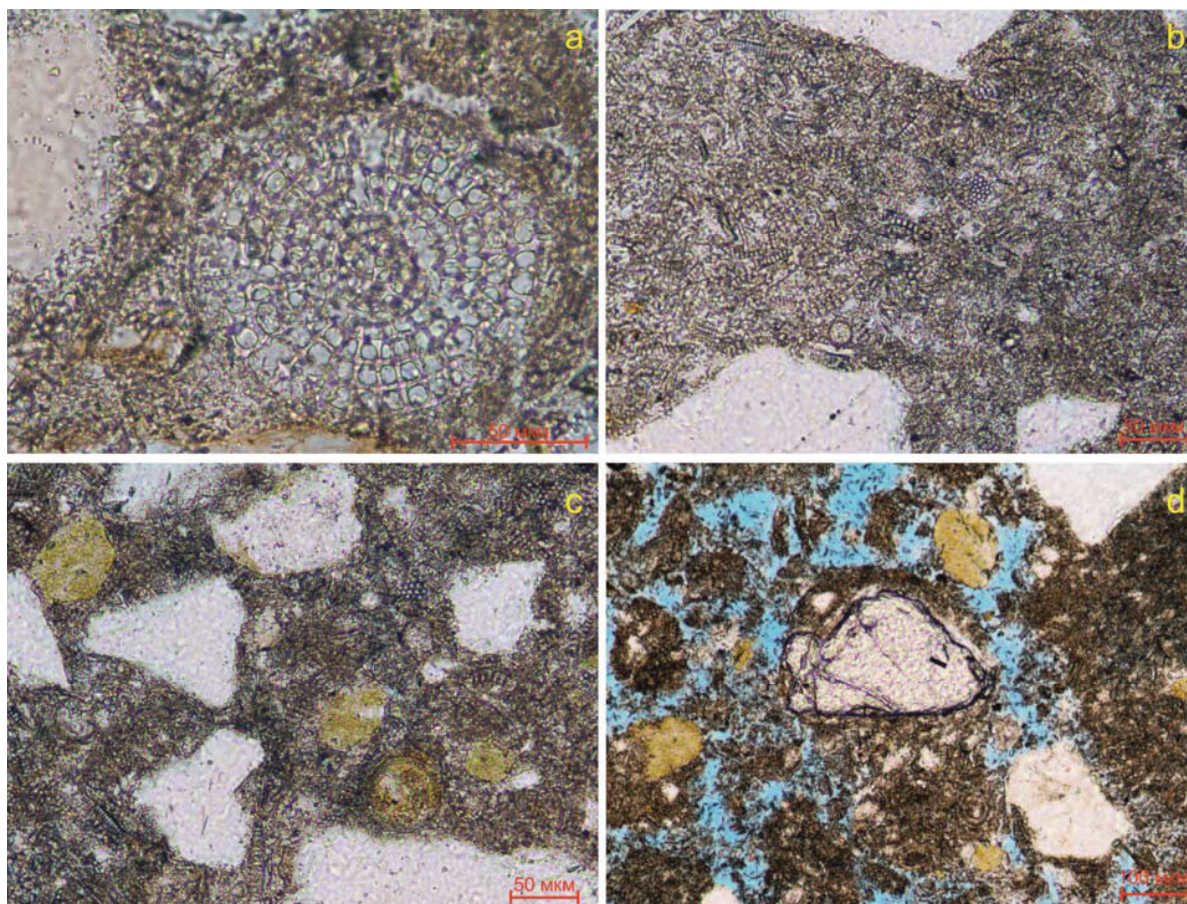
При литолого-петрографическом анализе (рис. 5) выявлено, что основная масса породы слабо отсортирована. Пустотное пространство нередко заполнено глинистым материалом с интерференционной окраской от светло-серого до желтого цвета, что характерно для гидрослюдистых минералов с примесью каолинита. На отдельных зернах минералов отмечаются следы частичного растворения и наличие глинистой каемки («рубашки»). Матрикс представлен микро-мелкорассеянной

смесью диатомовых обломков; составляет около 10 % от площади шлифа и распределен относительно равномерно. На терригенный материал приходится ~5 % от площади.

Таблица. Минеральный состав глинистой фракции  
Table. Mineral composition of clay fraction

| Минералы в составе глинистой фракции<br>Minerals in clay fraction structure                                    |                    |                 |            |                       |                   |                 |                          |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|-----------------|------------|-----------------------|-------------------|-----------------|--------------------------|
| Монтмориллонит<br>Montmorillonite                                                                              | Хлорит<br>Chlorite | Иллит<br>Illite | ССО<br>MLC | Каолинит<br>Kaolinite | Цеолит<br>Zeolite | Кварц<br>Quartz | Полевой шпат<br>Feldspar |
| Содержание собственно глинистых минералов, %<br>Content of clay minerals, %                                    |                    |                 |            |                       |                   |                 |                          |
| 27                                                                                                             | 37                 | 9               | 15         | 12                    | —                 | —               | —                        |
| Содержание всех видов минералов в глинистой фракции, %<br>Content of all types of minerals in clay fraction, % |                    |                 |            |                       |                   |                 |                          |
| 18                                                                                                             | 25                 | 6               | 10         | 8                     | 7                 | 20              | 6                        |

Во всем поле шлифа наблюдаются слегка угловатые зерна кварца и полевого шпата. Полевой шпат обладает низкой интерференцией серого цвета, в пределах 1,53, что характерно для анортита. Также отмечено присутствие округлых изотропных зерен



**Рис. 5.** Микроскопическое строение: а, б) раковины диатомовых водорослей и обломочный материал; в) глауконит (желтые зерна) и зерна кварца (белые); д) гранат (в центре) и глауконит (желтые зерна)

**Fig. 5.** Microscopic structure: а, б) diatom frustules and detrital material; в) glauconite (yellow grains) and grains of quartz (white); д) garnet (in the center) and glauconite (yellow grains)

глауконита всегда желтого цвета, который, как правило, формирует ассоциации зерен и нередко тяготеет к аналогичным скоплениям обломочного материала (рис. 5, в). Из аутигенных минералов встречаются кальцит и пирит, из аксессуарных минералов – гранат, эпидот, цоизит, сфен и циркон.

В составе глинистой фракции преобладают монтмориллонит и хлорит (более половины), среди прочих минералов диагностированы цеолит (морденит), полевой шпат и кварц (таблица). Содержание последнего в глинистой фракции достигает 20 %.

В соответствии с результатами анализа кривых дифференциально-термического анализа и дифференциально-термогравиметрического анализа можно утверждать, что в целом характер обезвоживания характерен для глинистых минералов гидрослюдисто-монтмориллонитового типа. Диатомовые глины характеризуются четырьмя эндотермическими и двумя экзотермическими эффектами, а также не фиксируется резкого излома между потерей межслоевой воды (100 °С) и температурой потери воды из кристаллической решетки (500 °С). Эндотермический эффект в интервале 30–150 °С с максимумом в 107 °С связан с удалением адсорбированной

влаги и межпакетной воды из структуры глинистых минералов. Слабоинтенсивная экзотермическая реакция с максимумом 332 °С также типична для монтмориллонита и связана с окислением органического вещества. Эндотермический эффект 537 °С обусловлен выделением конституционной воды из гидрослюды. Эндотермический эффект с максимумом при 566 °С характерен для минералов монтмориллонита. Вторая экзотермическая реакция с максимумом 925 °С связана с перекристаллизацией аморфных продуктов разложения гидрослюды.

По данным рентгенофлуоресцентного анализа диатомовые глины относятся к числу высококремнеземистого сырья, среднее содержание  $\text{SiO}_2$  – не менее 74 %, на  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  приходится по 9,83 и 3,57 % соответственно. Остальные оксиды находятся в подчиненном положении:  $\text{MgO}$  (1,56 %),  $\text{K}_2\text{O}$  (1,12 %),  $\text{TiO}_2$  (0,46 %),  $\text{Na}_2\text{O}$  (0,22 %),  $\text{MnO}$  (0,03 %),  $\text{P}_2\text{O}_5$  (0,02 %).

#### Обсуждение

По содержанию основных минеральных фаз, диатомовые глины близки к диатомитам Зауралья и Казахстана [23–26], по содержанию диоксида

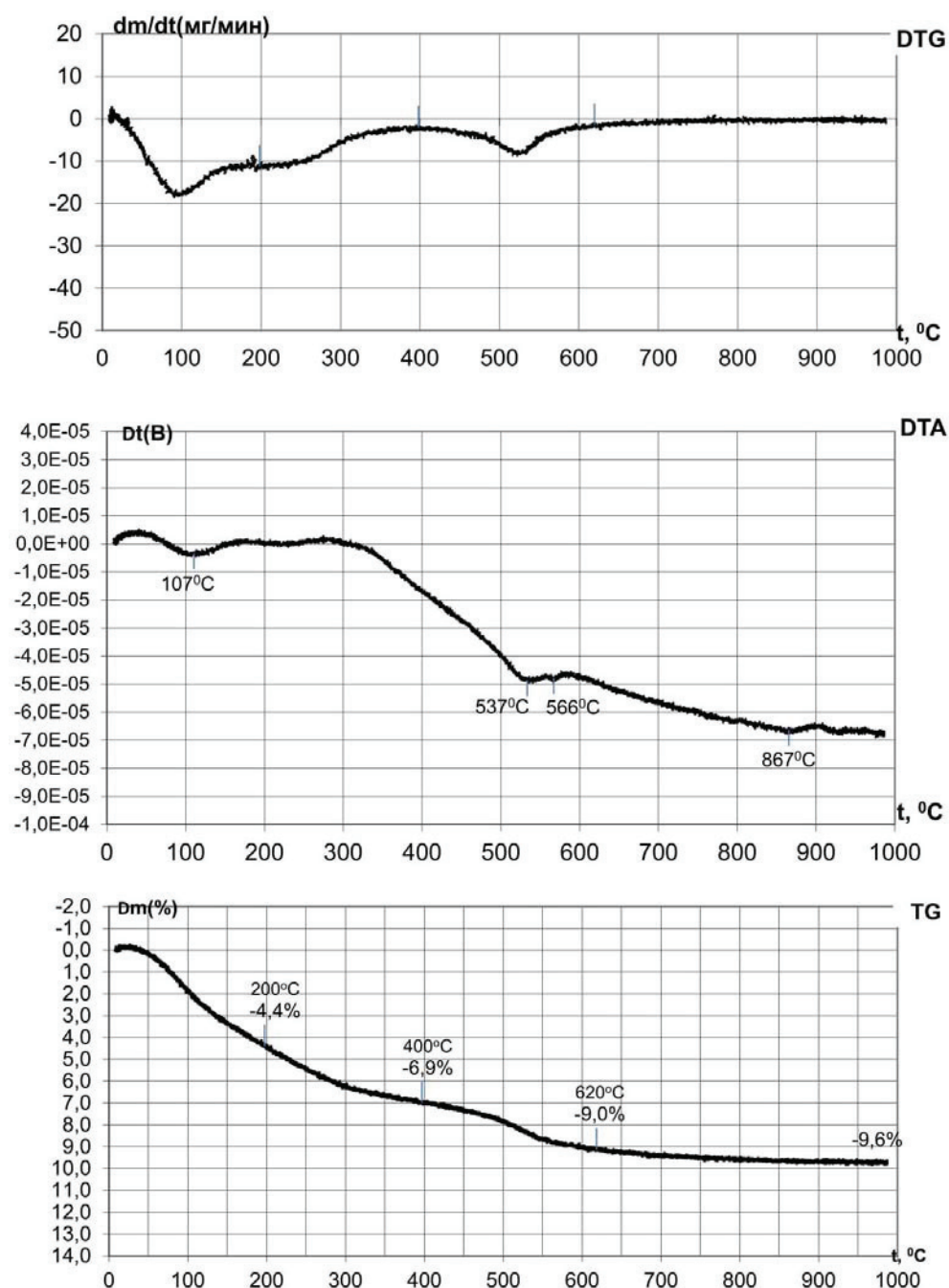


Рис. 6. Кривые дифференциально-термического анализа и дифференциально-термогравиметрического анализа

Fig. 6. Curves of differential-thermal analysis and differential-thermogravimetric analysis

кремния превосходят как глинистые разности диатомитов Зауралья [27] и Европейской части России [28], так и разности ряда месторождений зарубежных стран [29–32].

Таким образом, рассматриваемые породы исходя из результатов исследований литологических особенностей пригодны как сырье для производства большинства строительных и конструкционных материалов, что согласуется с результатами технологических испытаний, выполненных в 80-х гг.

Для использования изученных пород при производстве фильтровальных порошков или сорбентов, потребуется повысить содержание кремнезема до 80 % и снизить содержание  $\text{Al}_2\text{O}_3$  до 5 %. Вместе с тем, учитывая реальные потребности предприятий севера Тюменской области именно в строительных материалах, переработка диатомитов и диатомовых глин для нужд отраслей, отличных или несмежных с промышленностью строительных материалов, представляется маловероятной.

Химический и минеральный составы кремниевых пород не являются единственными критериями их пригодности для промышленного использования. Существенными факторами, ограничивающими возможность разработки перспективного участка, являются геокриологические и геоморфологические условия и удаленность от объектов инфраструктуры. Геоморфологические и геокриологические особенности участков распространения параллельно-грядового рельефа обуславливают высокую неоднородность пород продуктивной толщи, усложняя возможность подсчета реально извлекаемых запасов полезного ископаемого [20]. Общая льдистость пород в пределах таких участков, которая с учетом содержания льда-цемента в породе может достигать 50–60 %, окажет критическое влияние на стоимость технологических операций, связанных с разработкой месторождения, транспортировкой, хранением и переработкой сырья, сделает проект освоения этого и аналогичных по инженерно-геологическим условиям месторождений убыточным.

В пределах Надым-Пурского междуречья сильнольдистыми являются только породы, слагающие криогенные бугры и гряды. На участках, где эти формы отсутствуют, льдистость незначительна: это относится к юго-западной части Тазовского полуострова и бассейнам р. Нижняя, Средняя и Верхняя Хадыта [17]. По всей видимости, реальные перспективы разработки опал-кristобалитовых пород на Крайнем Севере Западной Сибири существуют именно для таких месторождений – сочетающих в себе близость к потенциальным потре-

бителям сырья и относительно благоприятные экономические и инженерно-геологические условия их освоения.

### Заключение

Результаты изучения диатомовых глин Сягойского участка свидетельствуют о том, что данные породы по своим свойствам, химическому составу, сохранности и составу диатомовой флоры сопоставимы с кремниевыми породами крупных месторождений Зауралья и других регионов Западной Сибири.

При планировании практического использования и разработке проектов промышленного освоения участка должно быть принято во внимание, что:

- 1) диатомовые глины Сягойского участка соответствуют комплексу *Coscinodiscus payeri* нижнего эоцена, что роднит их с крупными месторождениями Зауралья по ряду технологических свойств;
- 2) по соотношению  $\text{SiO}_2$ :  $\text{Al}_2\text{O}_3$ :  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (74,53: 9,83: 3,57) породы относятся к сырью, пригодному для производства широкого ряда строительных материалов;
- 3) в составе глинистой фракции велико содержание кварца (до 20 %), среди собственно глинистых минералов преобладают хлорит и монтмориллонит;
- 4) геоморфологические и геокриологические условия являются существенными ограничивающими факторами для промышленной добычи кремнистого сырья в регионе.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Золотовская Ю.Б. Стратегические направления реконструкции производства, инфраструктуры и социальной сферы Ямало-Ненецкого автономного округа до 2030 г. // Инновационные технологии управления социально-экономическим развитием регионов России: Материалы VII Всероссийской научно-практической конференции с Международным участием. – Уфа, 2015. – С. 61–66.
2. Стратегия социально-экономического развития Ямало-Ненецкого Автономного Округа / В.И. Суслов и др. // Регион: экономика и социология. – 2003. – № 3. – С. 3–38.
3. Татаркин А.И., Захарчук Е.А., Логинов В.Г. Современная парадигма освоения и развития Арктической зоны Российской Федерации // Экономика и управление народным хозяйством Арктической зоны. – 2015. – Т. 18. – № 2. – С. 4–13.
4. Татаркин А.И., Литовский В.В. Россия в Арктике: стратегические приоритеты комплексного освоения и инфраструктурной политики // Вестн. Мурман. гос. техн. ун-та. Соц.-экон. науки. – 2014. – Т. 17. – № 3. – С. 573–587.
5. Dobretsov N.L., Pokhilenko N.P. Mineral resources and development in the Russian Arctic // Russian Geology and Geophysics. – 2010. – № 1. – P. 98–111. DOI: 10.1016/j.rgg.2009.12.009
6. Observing trends and assessing data for Arctic mining / S. Haley et al. // Polar Geography. – 2011. – V. 34. – № 1–2. – P. 37–61. DOI: 10.1080/1088937X.2011.584449
7. Avango D., Nilsson A.E., Roberts P. Assessing Arctic futures: voices, resources and governance // Polar Geography. – 2013. – V. 3. – № 2. – P. 37–61. DOI: 10.1080/2154896X.2013.790197
8. Стратегия освоения и изучения минерально-сырьевых ресурсов российской Арктики и Субарктики в условиях перехода к устойчивому развитию / Д.А. Додин и др. // Литосфера. – 2010. – № 6. – С. 3–24.
9. Russia in the Arctic / ed. by J. Stephen. – Blank Carlisle: Strategic Studies Institute, 2011. – 153 p.
10. Mineral Resources in the Arctic / ed. by R. Boyd, T. Bjerkgård, B. Nordahl, H. Schiellerup. – Trondheim: Geological Survey of Norway, 2016. – 484 p.
11. Sentsov A. The Arctic zone: possibilities and risks of development / A. Sentsov, Y. Bolsunovskaya, E. Melnikovich // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – V. 43. – № 1. DOI: 10.1088/1755-1315/43/1/012100
12. The Economy of the North 2008 / Statistics Norway. URL: [https://www.ssb.no/a/publikasjoner/pdf/sa112\\_en/sa112\\_en.pdf](https://www.ssb.no/a/publikasjoner/pdf/sa112_en/sa112_en.pdf) (дата обращения: 09.06.2017).
13. Геолого-промышленная оценка и эффективность использования опал-кristобалитовых пород Тюменской области / П.П. Генералов и др. // Геология нерудного сырья Западной Сибири: труды ЗапСибНИГНИ. – Тюмень: ЗапСибНИГНИ, 1987. – С. 10–18.
14. Астапов А.П. Основные направления развития сырьевой базы стройиндустрии Северной зоны Тюменского нефтегазового комплекса // Геология нерудного сырья Западной Сибири: труды ЗапСибНИГНИ. – Тюмень: ЗапСибНИГНИ, 1987. – С. 18–27.
15. Генералов П.П. Параллельно-грядовый рельеф Западной Сибири и основные аспекты его геологического анализа // Геология позднего кайнозоя Обского Севера: труды ЗапСибНИГНИ. – Тюмень, ЗапСибНИГНИ, 1981. – С. 51–70.

16. Каменских А.П. Оценка запасов кремнисто-опаловых пород на севере Тюменской области на основе первых результатов геологоразведочных работ // Опалиты Западной Сибири: труды ЗапСибНИГНИ. – Тюмень: ЗапСибНИГНИ, 1987. – С. 110–114.
17. Миняйло Л.А. Криогенное строение приповерхностных залежей эоценовых опалитов на севере Западной Сибири // Опалиты Западной Сибири: труды ЗапСибНИГНИ. – Тюмень: ЗапСибНИГНИ, 1987. – С. 95–99.
18. Генералов П.П., Миняйло Л.А. Строение приповерхностных залежей опаловых пород Тюменской области // Комплексное освоение минерально-сырьевых ресурсов Западной Сибири: труды ЗапСибНИГНИ. – Тюмень: ЗапСибНИГНИ, 1985. – С. 109–112.
19. Трофимов В.Т., Ваду Ю.Б., Дубиков Г.И. Криогенное строение и льдистость многолетнемерзлых пород Западно-Сибирской плиты. – М.: Изд-во МГУ, 1980. – 246 с.
20. Смирнов П.В., Константинов А.О. Кремниевые породы Севера Тюменской области: литология, условия залегания и особенности подсчета запасов // Проблемы геологии и освоения недр: Труды XX Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых учёных, посвященного 120-летию со дня основания Томского политехнического университета. Т. 1. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2016. – Т. 1. – С. 259–260.
21. Thermokarst and Thaw-Related Landscape Dynamics – an Annotated Bibliography with an Emphasis on Potential Effects on Habitat and Wildlife / ed. by B.M. Jones, C.L. Amundson, J.C. Koch. – Reston: U.S. Geological Survey, 2013. – 60 p.
22. Karlsson J.M. Thermokarst lake, hydrological flow and water balance indicators of permafrost change in Western Siberia / J.M. Karlsson, S.W. Lyon, G. Destouni // Journal of Hydrology. – 2012. – V. 464–465. – P. 459–466.
23. Микроструктура перспективных теплоизоляционных материалов на основе диатомитов Среднего Поволжья / В.П. Селяев и др. // Строительные материалы и изделия. – 2013. – № 1. – С. 12–17.
24. Структурные, спектроскопические и теплофизические исследования природных диатомитов некоторых месторождений Республики Казахстан / В.П. Селяев и др. // Региональная архитектура и строительство. – 2015. – № 1. – С. 5–10.
25. Смирнов П.В. Результаты комплексных исследований вещественного состава диатомитов Ирбитского месторождения // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 6. – С. 93–104.
26. Смирнов П.В., Константинов А.О. Сравнительные исследования эоценовых и палеоценовых диатомитов Зауралья (на примере Камышловского месторождения и разреза Брусая) // Известия Томского Политехнического Университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 11. – С. 96–102.
27. Смирнов П.В., Константинов А.О. Диатомовые глины Шадринского месторождения (Курганская область) // Георесурсы. – 2016. – Т. 18. – № 3. – Ч. 2. – С. 240–244.
28. Селяев В.П., Неверов В.А., Куприяшкина Л.И. Рентгеноструктурные и рентгеноспектральные исследования цеолитосодержащих пород Атяшевского и Татарско-Шатрашанского месторождений Среднего Поволжья // Региональная архитектура и строительство. – 2014. – № 3. – С. 13–18.
29. Bogoevski S., Jančev S., Boškovski B. Characterization of diatomaceous earth from the Slavishko pole locality in the republic of Macedonia // Geologica Macedonica. – 2014. – V. 28. – № 1. – P. 39–43.
30. Ilić I.K., Stamatakis M.G., Perraki T.S. Mineralogy and technical properties of clayey diatomites from north and central Greece // Central European Journal of Geosciences. – 2009. – V. 1. – № 4. – P. 393–403. DOI:10.2478/v10085-009-0034-3
31. Stamatakis M.G., Hein J.R., Magganis A.C. Geochemistry and diagenesis of Miocene lacustrine siliceous sedimentary and pyroclastic rocks, Mytilinii basin, Samos Island, Greece // Sedimentary Geology. – 1989. – V. 64. – № 1–3. – P. 65–78.
32. Pedersen S.A.S. Paleogene diatomite deposits in Denmark: geological investigations and applied aspects // Geological Survey of Denmark and Greenland Bulletin. – 2008. – № 15. – P. 21–24.

Поступила 28.06.2017 г.

#### Информация об авторах

**Смирнов П.В.**, заместитель директора НОЦ «Геология нефти и газа» Тюменского индустриального университета; научный сотрудник Института геологии и палеонтологии технического университета Клаусталь.

**Константинов А.О.**, специалист НОЦ «Геология нефти и газа» Тюменского индустриального университета.

**Шадрин А.Н.**, начальник отдела минеральных ресурсов Сибирского научно-аналитического центра.

**Баталин Г.А.**, научный сотрудник Казанского федерального университета.

**Гареев Б.И.**, научный сотрудник Казанского федерального университета.

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

**Нафигин Р.Р.**, научный сотрудник Казанского федерального университета.

UDC 552.086; 552.581

## SYAGOY SITE OF ARKA-TABAYAKHA CLAYEY DIATOMITE DEPOSIT: LITHOLOGY OF ROCKS AND MINING POTENTIAL

**Pavel V. Smirnov<sup>1,2</sup>,**  
geolog.08@mail.ru

**Alexander O. Konstantinov<sup>1</sup>,**  
konstantinov.alexandr72@gmail.com

**Andrey N. Shadrin<sup>3</sup>,**  
shadrin\_a\_n@sibsac.ru

**Georgii A. Batalin<sup>4</sup>,**  
g@batalin.com

**Bulat I. Gareev<sup>4</sup>,**  
bulat@gareev.net

**Andrey A. Novoselov<sup>1</sup>,**  
mr.andreygeo@mail.ru

**Ramazan R. Nafigin<sup>4</sup>,**  
Ramzantez-lotus@mail.ru

<sup>1</sup> Tyumen Industrial University,  
38, Volodarsky Street, Tyumen, 625000, Russia.

<sup>2</sup> Technische Universität Clausthal, Adolph-Roemer-Strasse,  
2A, Clausthal-Zellerfeld, 38678, Germany.

<sup>3</sup> Siberian Scientific Analytical Center,  
46, Permyakov Street, Tyumen, 625016, Russia.

<sup>4</sup> Kazan Federal University,  
4/5, Kremlevskaya Street, Kazan, 420008, Russia.

**Relevance.** Modernization of infrastructure of the oil and gas complex of Western Siberia and development of the northern territories require the widespread use of local non-metallic raw materials. In areas that are almost directly adjacent to the main industrial sites in 1970–1980-s the colossal reserves of opal-cristobalite rocks – diatomites and opoka, were explored. They have a near-surface occurrence and industrial practice of their use in dozens of industries. Deficiency of natural raw materials in industrial sector of the north of the Tyumen region amounts to 50–70 %. This creates an economic basis for development of deposits of opal-cristobalite rocks. The Syagoy site – the largest in the near-Arctic zone Arka-Tabyakha deposit, due to its geological structure and confinement to the parallel-ridge relief, can be considered as a representative of other deposits of opal-cristobalite rocks in the north of Western Siberia.

**The main aim** is the study of lithology of clayey diatomite of Syagoy site and analysis of engineering-geological conditions of Syagoy site, with a view to assess the economic feasibility of developing the field.

**The methods:** field studies, X-ray diffraction, X-ray fluorescence analysis, differential thermal analysis, scanning electron microscopy, lithological and petrographic analysis.

**The results.** The Syagoy site has huge forecast resources and relatively high quality of raw materials, however, the main limiting factors for development of deposit are economic and geological factors. The geomorphological and geocryological conditions of the territory of the parallel-ridge relief along with the total ice content of 50–60 % will have a critical impact on the cost of technological operations related to field development, transportation, storage and processing of raw materials, making the development of such deposits unprofitable. Real prospects for development of opal-cristobalite rocks in the Far North of Western Siberia exist for deposits that combine proximity to potential consumers of raw materials and do not form cryogenic hillocks and ridges.

### Key words:

Opal-cristobalite rocks, diatomite, clayey diatomite, lithology, Irbit formation, Western Siberia, Yamalo-Nenets Autonomous District, non-metallic minerals, parallel-ridge relief.

### REFERENCES

1. Zolotovskaya Yu.B. Strategicheskie napravleniya rekonstruktsii proizvodstva, infrastruktury i sotsialnoy sfery Yamalo-Nenetskogo avtonomnogo okruga do 2030 [Strategic directions of reconstruction of production, infrastructure and social sphere of

the Yamalo-Nenets Autonomous District until 2030]. *Innovatsionnye tekhnologii upravleniya sotsialno-ekonomicheskimi razvitiem regionov Rossii. Materialy VII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s Mezhdunarodnym uchastiem* [Innovative technologies of management of social and economic development

- of Russian regions. Materials of the VII All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation]. Ufa, 2015. pp. 61–66.
2. Suslov V.I., Brekhuntsov A.M., Levinzon I.L., Korzhubaev A.G., Kharitonova V.N., Churashev V.N., Kontorovich A.E. Social and economic development strategy for the Yamalo-Nenets autonomous district. *Region: economics and sociology*, 2003, no. 3, pp. 3–38. In Rus.
3. Tatarkin A.I., Zakharchuk E.A., Loginov V.G. Sovremennaya paradigma osvoeniya i razvitiya Arkticheskoy zony Rossiyskoy Federatsii [The modern paradigm of development of the Arctic zone of the Russian Federation]. *Economics and management of the national economy of the Arctic zone*, 2015, vol. 18, no. 2, pp. 4–13.
4. Tatarkin A.I., Litovskiy V.V. Russia in the Arctic: Strategic Priorities for Integrated Development and Infrastructure Policy. *Vestnik of MSTU*, 2014, vol. 17, no. 3, pp. 573–587. In Rus.
5. Dobretsov N.L., Pokhilenko N.P. Mineral resources and development in the Russian Arctic. *Russian Geology and Geophysics*, 2010, no. 1, pp. 98–111. DOI: 10.1016/j.rgg.2009.12.009
6. Haley S., Klick M., Szymoniak N., Crow A. Observing trends and assessing data for Arctic mining. *Polar Geography*, 2011, vol. 34, no. 1–2, pp. 37–61. DOI: 10.1080/1088937X.2011.58444
7. Avango D., Nilsson A.E., Roberts P. Assessing Arctic futures: voices, resources and governance / D. Avango, A.E. Nilsson, P. Roberts. *Polar Geography*, 2013, vol. 3, no. 2, pp. 37–61. DOI: 10.1080/2154896X.2013.790197
8. Dodin D.A., Kaminsky V.D., Zoloev K.K., Koroteev V.A. Strategiya osvoeniya i izucheniya mineralno-syrevykh resursov rossiyskoy Arktiki i Subarkтики v usloviyakh perekhoda k ustoychivomu razvitiyu [A strategy of assimilation and study of Russian Arctic and Subarctic mineral product base in condition of passage to steady development]. *Litosphere*, 2010, no. 6, pp. 3–24.
9. *Russia in the Arctic*. Ed. by J. Stephen. Blank Carlisle, Strategic Studies Institute, 2011. 153 p.
10. *Mineral Resources in the Arctic*. Ed. by R. Boyd, T. Bjerkgård, B. Nordahl, H. Schiellerup. Trondheim, Geological Survey of Norway, 2016. 484 p.
11. Sentsov A., Bolsunovskaya Y., Melnikov E. The Arctic zone: possibilities and risks of development. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 43, no. 1. DOI: 10.1088/1755-1315/43/1/012100
12. *The Economy of the North 2008*. Statistics Norway. Available at: [https://www.ssb.no/a/publikasjoner/pdf/sa112\\_en/sa112\\_en.pdf](https://www.ssb.no/a/publikasjoner/pdf/sa112_en/sa112_en.pdf) (accessed 9 June 2017).
13. Generalov P.P., Plenkin A.P., Stepanov L.A., Minyaylo L.A., Gurdin Yu.G. Geologo-promyshlennaya otsenka i effektivnost ispolzovaniya opal-kristobalitovykh porod Tyumenskoy oblasti [Geological and commercial evaluation of the effectiveness of using opal-cristobalite rocks Tyumen region]. *Geologiya nerudnogo syrya Zapadnoy Sibiri: trudy ZapSibNIGNI* [Geology of non-metallic raw materials of Western Siberia]. Tyumen, ZapSibNIGNI Publ., 1987. pp. 10–18.
14. Astapov A.P. Osnovnye napravleniya razvitiya syrevoy bazy stroyindustrial Severnoy zony Tyumenskogo neftegazovogo kompleksa [The main directions in development of raw materials base of the construction industry in the Northern zone of the Tyumen oil and gas complex]. *Geologiya nerudnogo syrya Zapadnoy Sibiri: trudy ZapSibNIGNI* [Geology of non-metallic raw materials of Western Siberia]. Tyumen, ZapSibNIGNI Publ., 1987. pp. 18–27.
15. Generalov P.P. Parallelnogryadovyy relief Zapadnoy Sibiri i osnovnye aspekty ego geologicheskogo analiza [Parallel-ridge relief of Western Siberia and the main aspects of its geological analysis]. *Geologiya pozdnego kaynozoya Obshchego Severa: trudy ZapSibNIGNI* [Geology of the late Cenozoic of the Ob North]. Tyumen, ZapSibNIGNI Publ., 1981. pp. 51–70.
16. Kamenskikh A.P. Otsenka zapasov kremnistopopalovykh porod na severe Tyumenskoy oblasti na osnove pervykh rezultatov geologorazvedochnykh rabot [Estimation of reserves of siliceous-opaline rocks in the north of the Tyumen region on the basis of the first results of geological exploration]. *Opalitey Zapadnoy Sibiri: trudy ZapSibNIGNI* [Opalites of Western Siberia]. Tyumen, ZapSibNIGNI Publ., 1987. pp. 110–114.
17. Minyaylo L.A. Kriogennoe stroenie priповерхностnykh zalezhey eotsenovykh opalitev na severe Zapadnoy Sibiri [Cryogenic structure of near-surface deposits of Eocene opalites in the north of Western Siberia]. *Opalitey Zapadnoy Sibiri: trudy ZapSibNIGNI* [Opalites of Western Siberia]. Tyumen, ZapSibNIGNI Publ., 1987. pp. 95–99.
18. Generalov P.P., Minyaylo L.A. Stroenie priповерхностnykh zalezhey opalitev Tyumenskoy oblasti [The structure of near-surface deposits of opaline rocks in Tyumen region]. *Kompleksnoe osvoenie mineralno-syrevykh resursov Zapadnoy Sibiri: trudy ZapSibNIGNI* [Integrated development of mineral resources in Western Siberia]. Tyumen, ZapSibNIGNI Publ., 1985. pp. 109–112.
19. Trofimov V.T., Badu Y.B., Dubikov G.I. Kriogennoe stroenie i ldistost mnogoletnemerzlykh porod Zapadno-Sibirskoy plity [Cryogenic structure and ice content of perennial frozen rocks of the West Siberian Plate]. Moscow, MGU Publ., 1980. 246 p.
20. Smirnov P.V., Konstantinov A.O. Kremnievye porody Severa Tyumenskoy oblasti: litologiya, usloviya zaleganiya i osobennosti podscheta zapasov [Siliceous rocks of the North of Tyumen region: lithology, conditions of occurrence and features of reserves calculation]. *Problemy geologii i osvoeniya nedr. Trudy XX Mezhdunarodnogo simpoziuma imeni akademika M.A. Usova studentov i molodykh uchenykh, posvyashchennogo 120-letiyu so dnya osnovaniya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [Problems of Geology and Subsurface Development: Proc. of the 20<sup>th</sup> International Scientific Symposium of students, Postgraduates and young Scientists devoted to the 120<sup>th</sup> Anniversary of the founding of Tomsk Polytechnic University]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. House, 2016. P. I, 821 p.
21. *Thermokarst and Thaw-Related Landscape Dynamics – an Annotated Bibliography with an Emphasis on Potential Effects on Habitat and Wildlife*. Ed. by B.M. Jones, C.L. Amundson, J.C. Koch. Reston, U.S. Geological Survey, 2013. 60 p.
22. Karlsson J.M., Lyon S.W., Destouni G. Thermokarst lake, hydrological flow and water balance indicators of permafrost change in Western Siberia. *Journal of Hydrology*, 2012, vol. 464–465, pp. 459–466.
23. Selyaev V.P., Neverov V.A., Kupriyashkina L.I., Kolotushkin A.V., Sidorov V.V. Mikrostruktura perspektivnykh teploizolyatsionnykh materialov na osnove diatomitov Srednego Povolzhya [Microstructure of perspective thermal insulating materials made of diatomite from Middle Volga region]. *Regional architecture and construction*, 2013, no. 1, pp. 12–17.
24. Selyaev V.P., Nurliebaev R.E., Mamim B.F., Neverov V.A., Kupriyashkina L.I. Strukturnye, spektroskopicheskie i teplofizicheskie issledovaniya prirodnykh diatomitov nekotorykh mestorozhdeniy Respubliki Kazakhstan [Structural, spectroscopic and thermal researches of natural diatomite of some fields of the republic of Kazakhstan]. *Regional architecture and construction*, 2015, no. 1, pp. 5–10.
25. Smirnov P.V. Results of comprehensive studies of diatomite material composition from Irbit deposit. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 6, pp. 93–104. In Rus.
26. Smirnov P.V., Konstantinov A.O. Comparative studies of Eocene and Paleocene diatomite from Trans-Urals (on the example of Kamyslov deposit and section Brusyana). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 11, pp. 96–102. In Rus.

27. Smirnov P.V., Konstantinov A.O. Diatomaceous Clay of Shadrinsky deposit (Kurgan Region). *Georesources*, 2016, vol. 18, no. 3, pp. 240–244. DOI: 10.18599/grs.18.3.16 In Rus.
28. Selyaev V.P., Neverov V.A., Kupriyashkina L.I. Rentgenostrukturnye i rentgenospektralnye issledovaniya tseolitso-derzhashchikh porod Atyashevskogo i Tatarsko-Shatrashanskogo mestorozhdeniy Srednego Povolzhya [X-ray diffraction and X-ray spectral studies of zeolite-bearing rocks of the Atiaşevo and Tatar-Shatrashanskoye deposits of the Middle Volga region]. *Regional architecture and construction*, 2014, no. 3, pp. 13–18.
29. Bogoevski S., Jančev S., Boškovski B. Characterization of diatomaceous earth from the Slavishko pole locality in the Republic of Macedonia. *Geologica Macedonica*, 2014, vol. 28, no. 1, pp. 39–43.
30. Ilia I.K., Stamatakis M.G., Perraki T.S. Mineralogy and technical properties of clayey diatomites from north and central Greece. *Central European Journal of Geosciences*, 2009, vol. 1, no. 4, pp. 393–403. DOI: 10.2478/v10085-009-0034-3
31. Stamatakis M.G., Hein J.R., Magganis A.C. Geochemistry and diagenesis of Miocene lacustrine siliceous sedimentary and pyroclastic rocks, Mytilinii basin, Samos Island, Greece. *Sedimentary Geology*, 1989, vol. 64, no. 1–3, pp. 65–78.
32. Pedersen S.A.S. Paleogene diatomite deposits in Denmark: geological investigations and applied aspects. *Geological Survey of Denmark and Greenland Bulletin*, 2008, no. 15, pp. 21–24.

Received: 28 June 2017.

#### Information about the authors

**Pavel V. Smirnov**, deputy director, Research Education Center, Tyumen Industrial University.

**Alexander O. Konstantinov**, specialist, Research Education Center, Tyumen Industrial University.

**Andrey N. Shadrin**, head of Department, Siberian Scientific Analytical Center.

**Georgii A. Batalin**, scientific researcher, Kazan Federal University.

**Bulat I. Gareev**, scientific researcher, Kazan Federal University.

**Andrey A. Novoselov**, specialist, Research Education Center, Tyumen industrial university.

**Ramazan R. Nafigin**, scientific researcher, Kazan Federal University.

УДК 549.02: 553.08: 552.08: 552.14

## ГЛАУКОНИТ ИЗ ВЕРХНЕМЕЛОВЫХ ПОРОД ВАРВАРИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (ТОРГАЙСКИЙ ПРОГИБ, СЕВЕРНЫЙ КАЗАХСТАН)

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

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

**Капанов Али Сарсенович<sup>1</sup>,**  
kapanov016@gmail.com

**Соктоев Булат Ринчинович<sup>1</sup>,**  
bulat2670@mail.ru

**Буяков Алесь Сергеевич<sup>1,2</sup>,**  
alesbuyakov@gmail.com

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

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

Глауконит – это диоктаэдрический слюдястый минерал с высоким содержанием Fe, структура которого состоит из 2:1 слоев, соединенных межслоевыми катионами калия. Широкое распространение среди морских осадочных отложений и уникальные структурно-химические особенности глауконита привлекают внимание исследователей как с целью палеогеографических реконструкций, так и для определения возможностей использования в различных хозяйственных отраслях.

Основная цель работы заключалась в детальном исследовании минералогических и структурно-химических характеристик глауконита из верхнемеловых пород Варваринского месторождения для определения его природы и получения исходной информации о возможностях практического использования глауконит-кварцевых пород.

Использовались следующие аналитические методы: сканирующая электронная микроскопия, рентгенодифракционный анализ, термический анализ, инфракрасная спектроскопия, рентгенофлуоресцентный анализ, оптическая микроскопия и петрографический анализ. В результате проведенных исследований получены следующие основные выводы. Формирование глауконит-кварцевых песчаников и песков происходило в прибрежных фациальных условиях вблизи источника привноса терригенного материала в субкислородной и даже анаэробной среде морского осадка. Содержание глауконита в изученных породах составляет 9,2...9,4 %, остальное приходится главным образом на терригенный кварц (82,6...86,8 %). Глауконит характеризуется следующим составом (%): K<sub>2</sub>O – 6,73...8,89, SiO<sub>2</sub> – 49,61...55,99, Fe<sub>2</sub>O<sub>3(total)</sub> – 19,36...26,85, MgO – 3,26...4,91, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 3,90...7,31. По данным термического анализа общее содержание адсорбционной и кристаллизационной воды составляет 3,46 и 7,12 %, соответственно. По степени зрелости глауконит относится к зрелой и высоко зрелой разновидности. Глауконит имеет in situ природу. Процесс глауконитизации протекал по органическому субстрату, согласно модели «озеленения», за счет химической диффузии и преобразования исходного железистого и железо-алюминиевого смектита, о чем свидетельствует структурная и кристаллохимическая характеристика глауконита. Изученные структурно-химические характеристики глауконита свидетельствуют о возможности его разнопланового использования.

### Ключевые слова:

Глауконит, кварцевые песчаники, верхний мел, рентгенодифракционный анализ, сканирующая электронная микроскопия, ИК-спектроскопия, термический анализ, Варваринское месторождение, Торгайский прогиб, Казахстан.

### Введение

Глауконит относится к подклассу филлосиликатов, группе слюд с дефицитом межслоя [1]. Это диоктаэдрический слюдястый минерал с высоким содержанием Fe, структура которого состоит из 2:1 слоев (Т:О:Т), соединенных межслоевыми катионами калия. В структуре природных глауконитов помимо калиевых имеются смектитовые межслои, концентрация которых может достигать 25 % [2–5]. Последнее связано с условиями формирования и эволюции минерала, что обеспечивает широкую вариацию его химического состава [5–10]. Общая кристаллохимическая формула глауконита имеет следующий вид (K,Na,Ca)(Fe,Al,Mg,Mn)<sub>2</sub>(Si,Al)<sub>4</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub> [5, 11]. Ши-

рокое распространение среди морских осадочных отложений и уникальные структурно-химические особенности глауконита привлекают внимание ученых уже на протяжении более 100 лет [12]. Несмотря на долгую историю, изучение этого минерала продолжается и выходит на новый уровень как с целью палеогеографических реконструкций [12–14], так и для определения возможностей использования в различных хозяйственных отраслях [15–20]. В палеогеографии глауконит является ценным индикатором морского режима осадкообразования [4–7, 21–23], а также служит минералом для датировки абсолютного геологического возраста К-Аг методом [23]. Его генезис во многом помогает при определении геохимиче-



Рис. 1. Обзорная карта (Google Earth) расположения Варваринского месторождения

Fig. 1. Google Earth images of Varvarinskoye deposit

ских условий диагенеза осадков и трансгрессивно-регрессивных режимов [24–30]. С прикладной стороны на сегодняшний день можно выделить три основные и наиболее апробируемые области применения [31]: (1) сельское хозяйство, где глауконитовые породы выступают как источник или самостоятельный продукт для минеральных калийных удобрений [15, 16, 20, 32–34]; (2) водоочистка, в рамках которой глаукониты служат сорбционным материалом [35–39]; и (3) лакокрасочная промышленность, в которой глаукониты за счет наличия красящих пигментов являются источником зеленой краски [40]. В вышеописанном кратком обзоре приводится далеко не исчерпывающий перечень работ по исследованию глауконита, что позволяет подчеркнуть важность изучения этого минерала в различных осадочных образованиях.

Данная работа посвящена детальному исследованию глауконита из верхнемеловых кварцевых песчаников Торгайского прогиба на примере вскрышных пород Варваринского месторождения. В верхнем мелу территория Торгайской депрессии представляла собой узкий и вытянутый в меридиональном направлении морской пролив [41–45] (или Торгайское узкое море), соединяющий древний океан Паратетис с Северно-Ледовитым океаном через Западно-Сибирское море. Сам по себе Торгайский пролив является уникальным объектом для палеогеографических исследований, так как не имеет современных аналогов. С другой стороны, изучаемые кварцевые песчаники – это вскрышные породы, то есть отходы при добыче золотомедных руд Варваринского месторождения. Выявление возможностей практического использования этих пород послужит ценным результатом на пути горнодобывающего предприятия к безотходному и рациональному природопользованию.

Цель работы заключалась в детальном исследовании минералогических и структурно-химических характеристик глауконита для определения его природы и получения исходной информации о возможностях практического использования глауконит-кварцевых пород.

#### Объект исследования

Объектом для проведения исследований послужили верхнемеловые вскрышные породы золотомед-

ного Варваринского месторождения ( $52^{\circ}57'00''\text{С}$ ;  $62^{\circ}09'00''\text{В}$ ). Месторождение расположено в Костанайской области Республики Казахстан в 130 км к юго-западу от г. Костанай и в 4 км от границы с Россией (рис. 1). Изучаемые породы представляют собой вскрышные толщи глауконит-кварцевых песков и песчаников эгинсайской свиты (верхний мел, сантон-кампан) Торгайской депрессии. Пласты кварцевых песчаников в среднем имеют мощность 2 м, кварцевых песков – 1 м, однако в некоторых областях отмечается увеличение мощности этих толщ до 10 м.

#### Материал и методика исследования

Для лабораторных исследований было отобрано 8 репрезентативных проб весом 5...10 кг из горизонта 195...190 м Центрального карьера (рис. 2, а). Пробы соответствовали двум основным типам глауконит-содержащих пород: кварцевым песчаниками (рис. 2, b) и пескам (рис. 2, c).

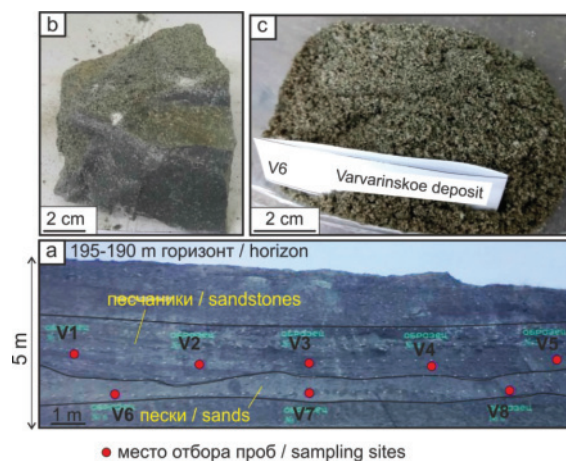
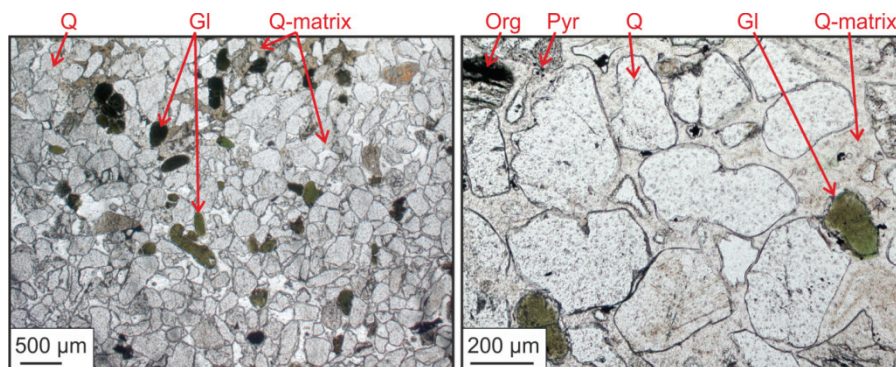


Рис. 2. (а) Снимок обнажения глауконит-кварцевых пород в борту Центрального карьера и фотографии песчаника (b) и песка (c)

Fig. 2. (a) Field photo showing glauconite-quartz rocks in the pit edge of Central carrier and (b) photos of sandstone (b) and sand (c)

Общий минеральный и химический состав, текстурные особенности пород изучались с использованием классического минералогического



**Рис. 3.** Снимки глауконит-кварцевого песчаника в проходящем свете (без анализатора): Gl – глауконит, Q – кварц, Q-matrix – кварцевый цемент, Org – органический материал, Pyr – пирит

**Fig. 3.** Photomicrographs of glauconite-quartz sandstone by ordinary light: Gl – glauconite, Q – quartz, Q-matrix – quartz matrix, Org – organic matter, Pyr – pyrite

анализа, петрографического микроскопа, рентгенодифракционного анализа (РДА), рентгенофлуоресцентного анализа (РФА) и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Детальное изучение глауконита выполнялось при помощи следующих методов: СЭМ, РДА, термический анализ (ТА) и инфракрасная спектроскопия (ИК-спектроскопия).

Минералогический анализ выполнялись по следующей методике: первичное описание на оптическом микроскопе, дробление исходной породы, отмучивание в дистиллированной воде, гранулометрическое просеивание мокрым способом, электромагнитная сепарация (ЭВС 10/5), очистка и выделение мономинеральной фракции глауконита под биноклем. Петрографические исследования полированных шлифов осуществлялись на микроскопе (ZEISS Axio Imager.A2m). РДА производился на рентгеновском дифрактометре Bruker D2 Phaser с  $\text{CuK}_\alpha$  излучением. Истертые до размера менее  $10\text{ }\mu\text{m}$  препараты сканировались в интервале углов  $2\theta$   $3\ldots 70^\circ$  с шагом  $0,02^\circ$ , скоростью сканирования  $1\text{ с}$ , при параметрах измерения  $40\text{ кВ}$  и  $40\text{ мА}$ . РФА как метод реализации силикатного анализа выполнялся с использованием микроанализатора HORIBA X-Ray Analytical Microscope XGT 7200, оснащенного энергодисперсионным детектором с пределом обнаружения химических элементов до  $0,01\text{ }\%$ . Анализ производился на подготовленных препаратах (таблетках) при параметрах: напряжение  $50\text{ кВ}$ , сила тока  $0,5\text{ мА}$ , время сканирования  $100\text{ с}$ , площадь сканирующего луча  $1,2\text{ мм}$ . Таблетки изготавливались следующим образом: истертая проба спрессовывалась под гидравлическим прессом, после чего спекалась в муфельной печи в течение 9 часов при температуре  $900\text{ }^\circ\text{C}$ . Потери при прокаливании (ППК) определялись как разница между исходным весом и весом после прокаливания пробы в муфельной печи при  $900\text{ }^\circ\text{C}$ . СЭМ проводилась с использованием микроскопа TESCAN VEGA 3 SBU, оснащенного приставкой для рентгенофлуоресцентного энергодисперсионного анализа (ЭДС) OXFORD X-Max 50 с Si/Li кристаллическим детектором.

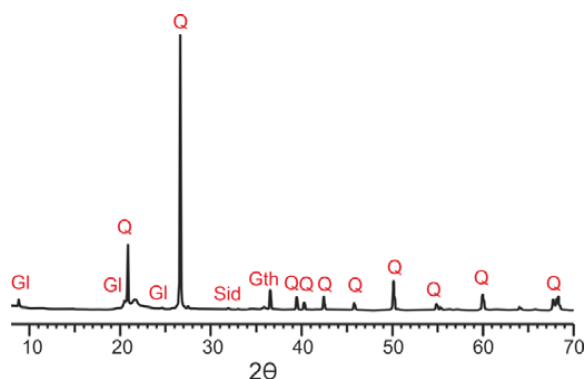
Ускоряющее напряжение для СЭМ съемки и анализа было  $20\text{ кВ}$  с интенсивностью тока зонда в пределах  $4\ldots 12,2\text{ нА}$ . Для изучения морфологии глауконитовые зерна прикреплялись на предметное стекло при помощи двухстороннего углеродного скотча и исследовались в режиме низкого вакуума с применением LVSTD (Low Vacuum Secondary Tescan Detector) детектора. Рентгеноспектральный анализ и определение минеральных микровключений производились на полированных пашках, представляющих собой скопление глауконитовых зерен в эпоксидной смоле и покрытые тонким слоем углерода ( $30\text{ нм}$ ). Термогравиметрический (ТГА) и дифференциальный термический (ДТА) анализы проводились с помощью термоанализатора TA Instruments SDT Q600 при следующих параметрах: интервал температур  $10\ldots 1100\text{ }^\circ\text{C}$ , масса навески –  $28,4\text{ мг}$ , скорость нагрева  $10\text{ }^\circ\text{C}/\text{мин}$ . ИК-спектроскопия выполнялась с помощью ИК-Фурье спектрометра Shimadzu IR Prestige-21 в режиме поглощения и интервале  $400\ldots 4000\text{ см}^{-1}$  с разрешением  $2\text{ см}^{-1}$ .

## Результаты

Петрографическая и минералого-химическая характеристика пород

Глауконит-кварцевые песчаники и пески залегают в виде вытянутых линз среди прибрежно-морских и морских отложений эгинсайской свиты (верхний мел, сантон-кампан), которые местами с размывом перекрывают подстилающие толщи. Породы мелкозернистые (рис. 3), иногда с неясно выраженной косослоистостью. Цементирующим материалом в песчаниках служит микрокристаллический кварц с незначительной примесью карбоната (сидерита). Рентгеновские дифрактограммы изучаемых пород, показывающие пики основных минералов, представлены на рис. 4. Содержание глауконита в этих породах составляет  $9,2\ldots 9,4\text{ }\%$ , остальное приходится на терригенный кварц ( $82,6\ldots 86,8\text{ }\%$ ), незначительное содержание сидерита, гетита, пирита (в песчаниках) и органи-

ческого материала (рис. 3), а также единичные зерна ильменита, рутила, апатита, вивианита.



**Рис. 4.** Рентгеновская дифрактограмма образца глауконит-кварцевого песчаника: Gl – глауконит, Q – кварц, Sid – сидерит, Gth – гетит

**Fig. 4.** XRD pattern of glauconite-quartz sandstone: Gl – glauconite, Q – quartz, Sid – siderite, Gth – goethite

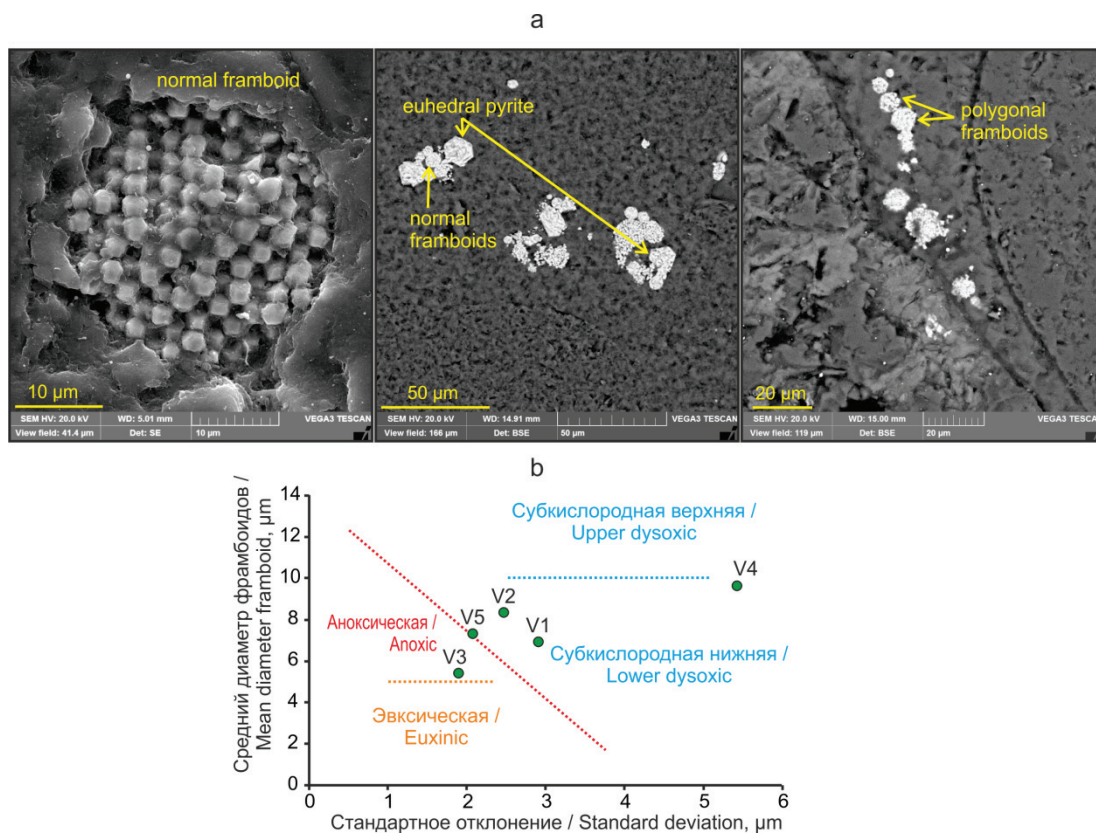
Пирит распространен в песчаниках как в виде фрамбоидов, так и в форме идиоморфных кристаллов. Фрамбоиды пирита представляют собой скопления микрокристаллов и имеют следующие морфологические виды (согласно терминологии [46–49]): нормальные фрамбоиды, фрамбоиды вы-

полнения, полигональные фрамбоиды, кольцевые фрамбоиды или «подсолнухи» (в зарубежной литературе «sunflowers» [48, 49]). Идиоморфные кристаллы имеют преимущественно пентагондодекаэдрический габитус. Размеры фрамбоидов пирита изменяются от 2,1 до 30,2 мкм при средней вариации 4,1...10,9 мкм (первый и третий квартиль, соответственно). Средний диаметр и стандартное отклонение фрамбоидов пирита представлено на рис. 5, b.

Химический состав (главных оксидов) глауконит-кварцевых песчаников и песков показан в табл. 1. В валовом составе пород на долю  $K_2O$  приходится 0,7...1,1 %, при преобладании  $SiO_2$  (82,2...83,8 %).

Морфология глауконитовых зёрен

Среди морфологических разновидностей глауконитовых зёрен (или гранул, глобулей) отмечаются следующие: пеллеты, представляющие собой сферические гранулы (рис. 7, a), вытянутые глобулы, биоморфозы по фораминиферам (рис. 7, b). Поверхность зёрен гладкая, вплоть до блестящей, иногда отмечаются трещинки похожие на полости синерезиса. Окраска глауконита преимущественно зеленая до темно-зеленой. Внутреннее строение глобулей представлено хаотично расположенными пластинками с изрезанными очертаниями (рис. 7, c).



**Рис. 5.** (a) СЭМ-снимки фрамбоидов пирита в глауконит-кварцевых песчаниках и (b) диаграмма отношения среднего диаметра и стандартного отклонения фрамбоидов пирит в зависимости от геохимических условий по [50] с дополнениями [49, 51]

**Fig. 5.** (a) SEM-images of pyrite framboids in glauconite-quartz sandstones and (b) plot of mean diameter vs. standard deviation of pyrite framboids depending on geochemical environment according to [50] as supplemented [49, 51]

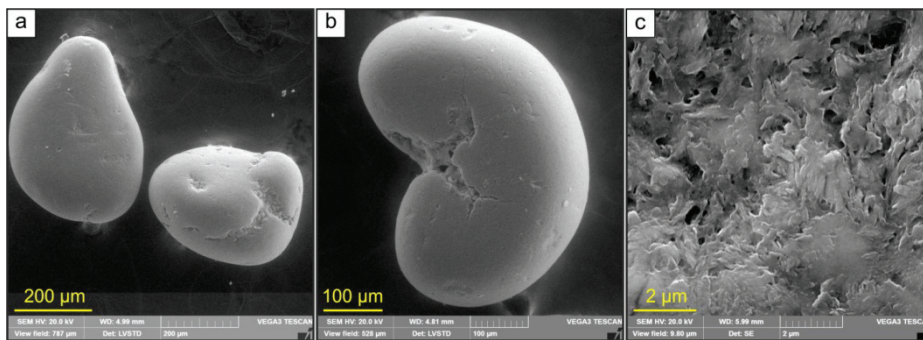


Рис. 6. СЭМ-изображения глауконитовых зёрен: а) пеллеты; б) биоморфная форма; в) внутренняя структура

Fig. 6. SEM-images of glauconite grains: a) pellets; b) biomorphic; c) internal structure

Таблица 1. Валовый химический состав (вес. %) глауконит-кварцевых песчаников и песков из верхнемеловых отложений Варваринского месторождения

Table 1. Chemical composition (wt. %) of glauconite-quartz sandstones and sands from Upper Cretaceous formations of Varvarinskoe deposit

| Проба/Sample                           | V4    | V6    | V8    |
|----------------------------------------|-------|-------|-------|
| Na <sub>2</sub> O                      | 0,51  | 0,57  | 0,51  |
| MgO                                    | 0,34  | 0,49  | 0,30  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>         | 0,53  | 1,45  | 1,93  |
| SiO <sub>2</sub>                       | 83,84 | 83,26 | 82,21 |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>          | 0,21  | 0,30  | 0,43  |
| K <sub>2</sub> O                       | 0,69  | 0,94  | 1,07  |
| CaO                                    | 0,14  | 0,44  | 0,48  |
| TiO <sub>2</sub>                       | 0,12  | 0,15  | 0,29  |
| MnO                                    | 0,08  | 0,03  | 0,03  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (total) | 3,28  | 3,06  | 2,99  |
| Сумма/Total                            | 89,72 | 90,68 | 90,24 |
| ППК/L.O.I.                             | 10,28 | 9,32  | 9,76  |

Примечание: ППК – потери при прокаливании при 900 °С; V4 – глауконит-кварцевый песчаник; V6, V8 – глауконит-кварцевый песок.

Note: Loss on ignition (L.O.I.) was obtained by heating sample powders to 900 °C; V4 – glauconite-quartz sandstone; V6, V8 – glauconite-quartz sand.

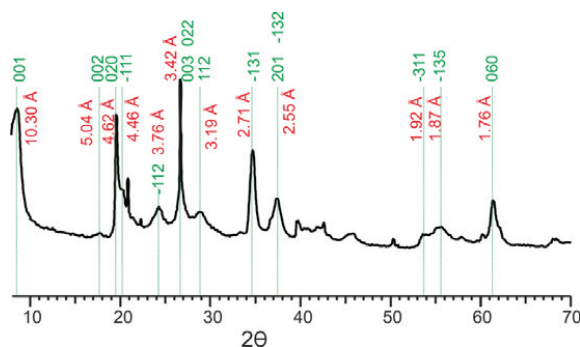


Рис. 7. Рентгеновская дифрактограмма образца глауконита

Рис. 7. XRD pattern of glauconite sample

Рентгенодифракционный анализ

Рентгеновские дифрактограммы препаратов глауконита (рис. 7), высушенных при комнатной

температуре, показывают следующие основные базальные отражения: 10,3 Å; 5,04 Å; 3,42 Å и 1,76 Å. Дополнительно на дифрактограммах отражаются *hkl* рефлексы: 4,62 Å (020); 3,76 Å (-112); 3,19 Å (112); 2,71 Å (-131) и 2,55 Å (-132). Наиболее интенсивный пик основного базального отражения 10,3 Å (001) имеет слабо ассиметричную форму и соответствует толщине структурного пакета минерала, включающего 2:1 слой и межслоевой промежуток.

Основной химический состав глауконитовых гранул

Химический состав глауконита представлен в табл. 2. Измерения проводились в различных областях зёрен, как в центре, так и в краевых частях, при этом значимых изменений состава не наблюдалось. Изученный глауконит характеризуется следующим химическим составом (%): SiO<sub>2</sub> – 49,61...55,99, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(total) – 19,36...26,85, K<sub>2</sub>O – 6,73...8,89, MgO – 3,26...4,91, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 3,90...7,31. Помимо основных минералообразующих элементов отмечаются следующие примеси (%): CaO – 0,21...0,56, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – 0,3...1,18, SO<sub>3</sub> – 0,32...0,45. Формульные коэффициенты глауконитов рассчитывались на основе предположения о постоянстве анионного каркаса O<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub><sup>-22</sup> [2, 3]. В октаэдрических позициях преобладающим катионом является Fe на долю которого приходится 0,95...1,45 формульных единиц (ф.е.). Тетраэдрические позиции, как это и принято, состоят из Si (преимущественно) и Al. Межслоевые катионы представлены K, в некоторых случаях отмечается Ca. Степень железистости (отношение октаэдрического Fe к сумме всех октаэдрических катионов по [7]) изменяется в пределах 0,53...0,79.

Минеральные микровключения в глауконитах

Среди минеральных микровключений (рис. 8), по данным СЭМ, были обнаружены следующие: пирит, барит, фосфат редкоземельных элементов (РЗЭ), титанит, рутил, магнетит, монацит, минеральные фазы Sn-Cu-Ni и Zn-Cu-Sn. Пирит является распространенным минеральным включением внутри глауконитовых зёрен (рис. 8). Наблюдается он в виде крупных – до 60 мкм – идиоморфных

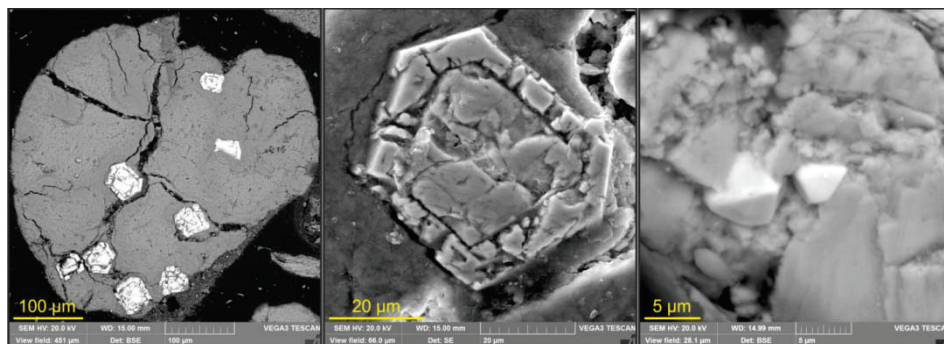


Рис. 8. СЭМ-снимки минеральных включений идиоморфных кристаллов пирита в глауконите

Fig. 8. SEM-images of euhedral pyrite crystals into glauconite

Таблица 2. Химический состав (вес. %) глауконита Варваринского месторождения по данным энергодисперсионного рентгеноспектрального анализа

Table 2. Chemical composition (wt. %) of glauconite from Varvarinskoe deposit based on energy dispersive X-ray microanalysis

| Проба<br>Sample     | MgO  | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | SiO <sub>2</sub> | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | SO <sub>3</sub> | K <sub>2</sub> O | CaO  | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (total) | Сумма<br>Total |
|---------------------|------|--------------------------------|------------------|-------------------------------|-----------------|------------------|------|----------------------------------------|----------------|
| V4                  | 3,81 | 7,3                            | 54,89            | –                             | –               | 8,89             | 0,33 | 25,27                                  | 100,5          |
|                     | 3,91 | 6,86                           | 55,24            | 0,36                          | –               | 8,45             | 0,29 | 24,7                                   | 99,8           |
|                     | 3,69 | 6,78                           | 53,62            | –                             | 0,45            | 7,69             | 0,24 | 24,51                                  | 96,98          |
|                     | 3,65 | 5,24                           | 50,98            | –                             | –               | 7,45             | 0,29 | 23,93                                  | 91,55          |
|                     | 4,26 | 5,29                           | 51,36            | –                             | –               | 8,25             | 0,35 | 23,23                                  | 92,74          |
|                     | 3,63 | 5,91                           | 50,7             | –                             | 0,34            | 7,65             | 0,35 | 23,83                                  | 92,41          |
|                     | 3,51 | 6,46                           | 50,59            | –                             | –               | 7,76             | 0,3  | 22,73                                  | 91,35          |
|                     | 3,82 | 6,64                           | 51,48            | –                             | –               | 7,78             | 0,26 | 21,87                                  | 91,85          |
|                     | 3,77 | 6,74                           | 51,94            | –                             | –               | 8,15             | 0,24 | 22,98                                  | 93,82          |
|                     | 3,6  | 6,36                           | 50,71            | –                             | 0,35            | 7,65             | 0,21 | 22,98                                  | 91,86          |
|                     | 3,63 | 5,67                           | 51,23            | –                             | –               | 8,06             | 0,31 | 23,52                                  | 92,42          |
|                     | 3,26 | 5,46                           | 49,61            | 0,33                          | 0,32            | 7,01             | 0,22 | 23,86                                  | 90,07          |
|                     | 3,9  | 5,43                           | 51,26            | –                             | –               | 7,75             | –    | 23,64                                  | 91,98          |
|                     | 4,02 | 5,42                           | 52,81            | 0,42                          | –               | 8                | 0,27 | 24,36                                  | 95,29          |
|                     | 4,13 | 7,31                           | 50,77            | 0,5                           | 0,35            | 6,73             | 0,26 | 19,36                                  | 89,41          |
|                     | 3,26 | 5,98                           | 50,89            | –                             | –               | 7,45             | 0,34 | 24,81                                  | 92,73          |
| V6                  | 4,11 | 5,99                           | 53,07            | –                             | –               | 8,27             | 0,36 | 23,68                                  | 95,46          |
|                     | 4,33 | 4,82                           | 55,99            | –                             | –               | 8,61             | 0,42 | 26,85                                  | 101,01         |
|                     | 3,55 | 5,8                            | 51,77            | –                             | –               | 7,76             | 0,48 | 25,53                                  | 94,9           |
|                     | 3,7  | 5,78                           | 53,1             | –                             | –               | 7,35             | 0,56 | 25,41                                  | 95,9           |
|                     | 3,86 | 5,11                           | 52,4             | –                             | –               | 8,07             | 0,31 | 25,74                                  | 95,48          |
|                     | 3,45 | 6,33                           | 50,14            | –                             | –               | 7,55             | 0,42 | 24,11                                  | 92             |
|                     | 4,26 | 6,18                           | 55,39            | 0,5                           | –               | 7,82             | 0,5  | 23,58                                  | 98,24          |
|                     | 3,59 | 6,11                           | 52,2             | –                             | –               | 7,74             | 0,43 | 24,73                                  | 94,79          |
|                     | 3,5  | 5,38                           | 52,76            | 0,37                          | –               | 6,91             | 0,55 | 25,38                                  | 94,86          |
|                     | 3,8  | 6,07                           | 52,72            | 0,36                          | –               | 8,21             | 0,33 | 24,74                                  | 96,22          |
|                     | 3,29 | 5,68                           | 52,15            | 0,61                          | –               | 7,19             | 0,49 | 25,16                                  | 94,57          |
|                     | 4,22 | 3,9                            | 53,54            | –                             | –               | 8,46             | 0,31 | 25,1                                   | 95,53          |
|                     | 3,91 | 7,06                           | 53,94            | –                             | –               | 7,66             | 0,47 | 22,68                                  | 95,72          |
|                     | 4,29 | 7,12                           | 52,97            | 0,3                           | –               | 8,15             | 0,43 | 21,04                                  | 94,3           |
|                     | 3,71 | 5,19                           | 52,73            | –                             | –               | 7,83             | 0,46 | 25,52                                  | 95,44          |
|                     | 3,46 | 4,53                           | 50,57            | 0,31                          | –               | 7,08             | 0,51 | 25,79                                  | 92,26          |
|                     | 4,91 | 6,28                           | 55,87            | –                             | –               | 8,75             | 0,25 | 22,99                                  | 99,04          |
|                     | 3,58 | 5,29                           | 50,88            | 1,18                          | –               | 7,32             | 0,52 | 26,18                                  | 94,94          |
|                     | 4    | 5,5                            | 53,63            | –                             | –               | 8,34             | –    | 25,14                                  | 96,6           |
| среднее<br>average  | 3,81 | 5,91                           | 52,40            | 0,48                          | 0,36            | 7,82             | 0,37 | 24,14                                  | –              |
| минимум<br>minimum  | 3,26 | 3,90                           | 49,61            | 0,30                          | 0,32            | 6,73             | 0,21 | 19,36                                  | –              |
| максимум<br>maximum | 4,91 | 7,31                           | 55,99            | 1,18                          | 0,45            | 8,89             | 0,56 | 26,85                                  | –              |

кристаллов пентагондодекаэдрического габитуса, мелких 2...6 мкм единичных кристаллов октаэдрического габитуса, и реже в форме фрамбOIDов размером до 5 мкм. Барит отмечается в виде ксеноморфных кристаллов размером до 2,7 мкм. В срезе зёрен глауконита практически во всех случаях микровключения пирита и барита фиксируются в микротрещинах (рис. 8).

Фосфат редкоземельных элементов характеризуется следующим составом (%): P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – 44,8...47,6, Ce<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 27,2...31,8, La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 6,7...9,4, Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 5,9...7,1. Этот фосфат встречается в виде агрегатов и скоплений микросферолитов неправильной формы размером до 10 мкм. Такие минералы, как титатин, рутил, магнетит, монацит, фиксируются в единичных случаях и имеют вид обломков.

Инфракрасная спектроскопия (поглощения)

Инфракрасные спектры поглощения, снятые с глауконитовых монофракций (рис. 9) отражают специфические структурно-химические особенности минерала. Широкая полоса поглощения в диапазоне 3200...3700 см<sup>-1</sup> обусловлена колебаниями абсорбированной воды. Эта полоса осложнена пиком поглощения 3530 см<sup>-1</sup> и слабо проявленным поглощением при 3600 см<sup>-1</sup> (рис. 9), которые относятся к колебаниям молекул катион-ОН-катион, а именно Fe-ОН-Fe и Al-ОН-Al, соответственно [2, 3, 52]. Полоса при 2360 см<sup>-1</sup>, вероятно, связана с органическими примесями. Слабая полоса поглощения с пиком 1630 см<sup>-1</sup> отражает наличие смектитовых слоев [53]. Пики поглощения в интервале 600...1100 см<sup>-1</sup> (рис. 9) обусловлены деформационными колебаниями ОН-группы, а также Si-O-Si (для 1070, 960 см<sup>-1</sup>). В этом диапазоне с полосами 810 и 670 см<sup>-1</sup> связаны колебания Fe<sup>3+</sup>-ОН-Fe<sup>3+</sup> и Fe<sup>3+</sup>-ОН-Mg, соответственно [40, 54]. Пики поглощения в интервале 400...600 см<sup>-1</sup> отражают колебания Si-O-Si.

Термогравиметрический анализ

Кривые ТГА и ДТА анализов (рис. 10) характеризуются следующими основными областями. Первая область 0...200 °С связана с первоначальной дегидратацией глауконита, то есть выделением адсорбированной влаги, содержание которой соот-

ветствует потере веса на 3,46 %. Вторая область 200...400 °С отражает разложение органического вещества при потере веса 4,28 % от исходной массы образца. Третья область 200...642 °С с двумя максимумами при 422,8 и 499,3 °С обусловлена выделением кристаллизационной воды, количество которой соответствует потере массы 7,12 % от массы образца вначале дегидроксиляции (200 °С).

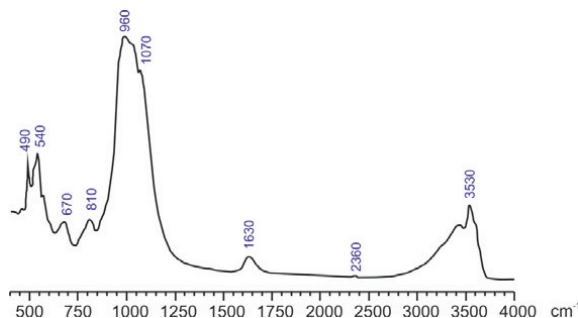


Рис. 9. ИК-спектр глауконита

Fig. 9. IR spectra of glauconite

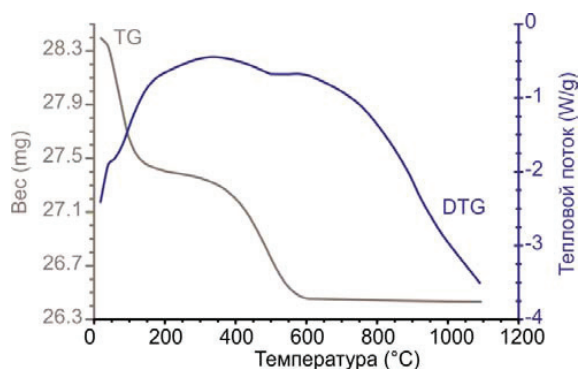


Рис. 10. Кривая потери веса (ТГ) и дифференциальная термогравиметрическая кривая (ДТА)

Fig. 10. Thermo-gravimetric (TG) and differential thermogravimetric (DTG) curves

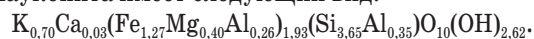
### Обсуждение результатов

Текстурные особенности и минеральный состав изучаемых пород свидетельствуют об их образовании в условиях активного привноса терригенного материала (кварцевых обломков). Ранний диагенез осадков отразился в образовании глауконита, кремнистого цементирующего материала и фрамбоидов пирита. Распределение размеров фрамбоидов пирита (рис. 5, б) свидетельствует о субкислородной и даже анаэробной геохимической среде морского осадка [46, 47, 49, 50]. Субкислородная обстановка, наличие разлагающегося органического вещества и, как следствие, высвобождение сульфид-иона, который взаимодействовал с  $\text{Fe}^{2+}$ , способствовали образованию фрамбоидов пирита среди илистого осадка, вплоть до агрегации в относительно крупные идиоморфные кристаллы. Морфология глауконита свидетельствует о формировании по органическому субстрату, а именно фекальным частицам (рис. 6, а) и остат-

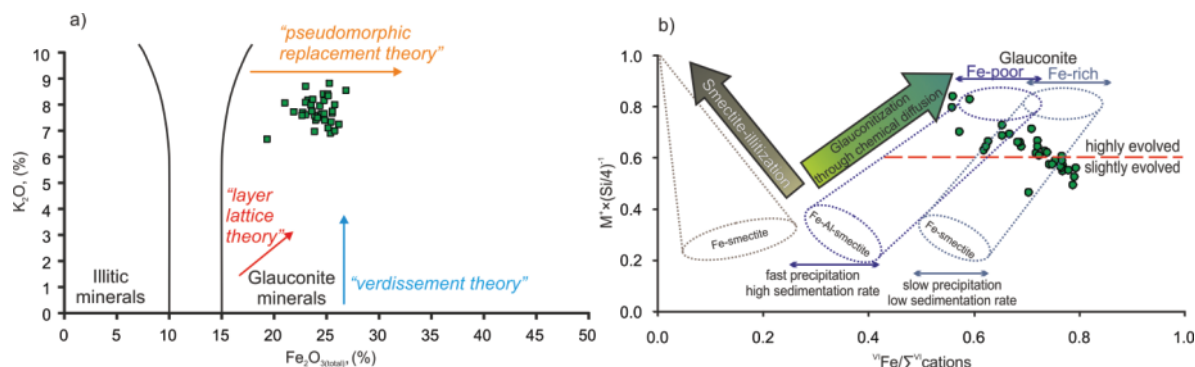
кам планктона (рис. 6, б). Гладкая поверхность гранул, отсутствие явного преобладания трещин и обломков зёрен, степень зрелости и отсутствие вторичных изменений отражают *in situ* (автохтонную или аутигенную) [5, 10] природу глауконита. Неясная косая слоистость пород, высокая доля терригенного материала и в то же время присутствие аутигенных минералов (глауконит, пирит, сидерит, кремнистый цемент) указывают на прибрежные фациальные условия осадкообразования вблизи источника сноса, вероятно, вблизи палеоэстуарий. Как известно, в общей геохронологической повестке верхнемеловой период на территории Торгайского пролива и Западно-Сибирского моря характеризуется как время широкого развития моря (трансгрессии), химического выветривания и расширения субкислородных или анаэробных придонных морских вод, что является благоприятным режимом для аутигенного минералообразования.

Изученные песчаники и пески эгинсайской свиты, несмотря на невысокую долю глауконита (до 9,4 %), могут служить источником для получения глауконитового концентрата как продукта разнопланового применения. При использовании простейших способов обогащения (ситование и электромагнитная сепарация) следует ожидать выход ликвидного продукта. Преобладающий в составе пород терригенный кварц, вероятно, будет отделяться от глауконита при электромагнитной сепарации, что позволит получить минеральный концентрат в магнитной фракции. Подобным образом в данной работе были выделены глауконитовые мономинеральные фракции для детальных минералого-геохимических исследований.

Изученный глауконит по степени зрелости [5] относится к зрелой («evolved») и даже высоко зрелой («highly evolved») разновидностям. Это подтверждается высокой концентрацией  $\text{K}_2\text{O}$  (6,73...8,89 %) (рис. 11, табл. 2), отношением между слоевым зарядом к четверти тетраэдрического заряда и степенью железистости (рис. 11, б), пиком основного базального отражения 10,3 Å (рис. 7), преимущественно зеленой окраской зёрен. Усредненная кристаллохимическая формула глауконита имеет следующий вид:



Высокая степень зрелости свидетельствует о формировании глауконита в стабильных диагенетических условиях в течении  $10^5$ ... $10^6$  лет, а также относительно низкой доле (менее 10 %) смектитовых слоёв в структуре минерала. Отношение  $\text{K}_2\text{O}$  к  $\text{Fe}_2\text{O}_{3(\text{total})}$  в составе минерала (рис. 11, а) отражает механизм образования по модели «озеленения» («verdissement theory»), согласно которой по средствам химической диффузии происходит вхождение калия в межслоевые промежутки исходного смектита [5, 10, 14]. Эта модель также подтверждается отношением слоевых и тетраэдрических зарядов к степени железистости (рис. 11, б), согласно уже выявленным тенденциям [7, 55].



**Рис. 11.** (а) Диаграмма отношения  $K_2O$  и  $Fe_2O_3(\text{total})$  в глауконитах и (б) диаграмма отношения суммарного межслоевого заряда к  $1/4$  ф.е. кремния и отношения ф.е. железа к сумме октаэдрических катионов, согласно [7] с дополнениями от [56]

**Fig. 11.** (a) relationship between  $K_2O$  and  $Fe_2O_3(\text{total})$  in glauconites and (b) compositional domains of glauconite plotted in the  $M^* \times (Si/4)^{-1}$  vs.  $^{VI}Fe/\Sigma^{VI}$  cations diagram according to [7] as supplemented [56]

Наличие как идиоморфных кристаллов, так и фрамбонидов пирита, а также кристаллов барита внутри глауконитовых гранул свидетельствует о протекании процессов минералообразования на микроминеральном уровне. Приуроченность пирита и барита к микротрещинам вероятней всего указывает на химическую диффузию между осадком (поровой водой) и глауконитовым зёрном. Этот факт подтверждает, что химическая диффузия является важнейшим механизмом при формировании глауконита в изучаемом разрезе. При этом диффузия протекает не только в системе преобразования смектит–глауконит, но и параллельно с процессом глауконитизации [9, 13], что приводит к минеральному новообразованию сульфидов железа (пирит) и сульфата бария (барит) внутри глауконита. Разложение органического субстрата в процессе роста глауконита приводит к высвобождению  $H_2S^-$  и  $SO_4^{2-}$ , которые вступают в реакцию с катионами  $Fe^{2+}$  и  $Ba^{2+}$ , поступающими из поровых вод. Источником бария, вероятно, служит морская вода [57–60]. В ранних работах авторов уже описывались подобные минеральные микровключения (в том числе и фосфата РЗЭ) в верхнемеловых глауконитах юго-восточной части Западной Сибири [61].

Результаты инфракрасной спектроскопии (рис. 9) отражают 2:1 диоктаэдрическую структуру глауконита, в котором октаэдрические катионные позиции заполнены преимущественно железом и магнием, тетраэдрические – кремнием и алюминием. При этом ИК-полосы поглощения в диапазоне  $1630\text{ см}^{-1}$  подтверждают наличие смектитовых слоев. По данным термического анализа (рис. 10) среднее содержание адсорбционной и кристаллизационной воды составляет 3,46 и 7,12 %, соответственно, что учитывалось при расчете кристаллохимической формулы глауконита.

Структурно-химическая характеристика изученного глауконита позволяют считать его потенциальным полифункциональным продуктом для разнопланового хозяйственного использования. Высокие зрелость и содержание  $K_2O$  (до 8,83 %) являются положительной характеристикой для

использования глауконита в качестве нетрадиционного калийного минерального удобрения. Наличие смектитовых слоев и мелкий размер глауконитовых зёрен служит благоприятными свойствами для рассматривания его в качестве сорбента. Концентрирование глауконита среди кварцевых песчаников и песков позволит получать минеральный концентрат с использованием простейших методов обогащения [28, 34], что является выгодной технологической характеристикой.

## Выводы

В результате проведенного комплекса детальных исследований глауконита из верхнемеловых пород Варваринского месторождения были получены следующие основные выводы.

1. Формирование глауконит-кварцевых песчаников и песков происходило в прибрежных фациальных условиях вблизи источника привноса терригенного материала в субкислородной и даже анаэробной среде морского осадка, что отразилось в аутигенном минералообразовании глауконита, фрамбонидов пирита и кремнистого цемента. Содержание глауконита в изученных породах составляет 9,2...9,4 %, остальное приходится главным образом на терригенный кварц (82,6...86,8 %).
2. Глауконит характеризуется следующим составом (%):  $K_2O$  – 6,73...8,89,  $SiO_2$  – 49,61...55,99,  $Fe_2O_3(\text{total})$  – 19,36...26,85,  $MgO$  – 3,26...4,91,  $Al_2O_3$  – 3,90...7,31. По данным термического анализа общее содержание адсорбционной и кристаллизационной воды составляет 3,46 и 7,12 %, соответственно. В структуре глауконита тетраэдрические катионы представлены Si и Al, октаэдрические – Fe, Mg, Al, межслоевые позиции заселены главным образом K и незначительным содержанием Ca в смектитовых слоях. Наличие смектитовых слоев подтверждается ИК-полосой поглощения в диапазоне  $1630\text{ см}^{-1}$ .
3. По степени зрелости глауконит относится к зрелой и высоко зрелой разновидности, что свидетельствует о его медленном росте в течении

$10^5 \dots 10^6$  лет в системе поровая вода – осадок и количестве смектитовых слоев в структуре минерала менее 10 %. Глауконит имеет *in situ* природу (автохтонный или аутигенный), что подтверждается его хорошей сохранностью, высокой зрелостью и отсутствием следов выветривания и вторичного изменения. Процесс глауконитизации протекал по органическому субстрату (фекальным частицам и остаткам планктона) согласно модели «озеленения» за счет химической диффузии и преобразования исходного железистого и железо-алюминиевого смектита, о

чем свидетельствует структурная и кристаллохимическая характеристика глауконита.

4. Структурно-химическая характеристика изученного глауконита свидетельствует о возможности его разнопланового использования как полифункционального продукта. Концентрирование глауконита среди кварцевых песчаников и песков позволяет ожидать выход ликвидного минерального концентрата при электромагнитной сепарации.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 17-77-10042).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Summary of recommendations of nomenclature committees relevant to clay mineralogy: Report of the Association International pour l'Etude des Argiles (AIPEA) Nomenclature Committee for 2006 (Clays and Clay Minerals) / S. Guggenheim, J.M. Adams, D.C. Bain, F. Bergaya, M.F. Brigatti, V.A. Drits, M.L.L. Formoso, E. Galan, T. Kogure, H. Stanjek // *Clays and Clay Minerals*. – 2007. – V. 55 (6). – P. 761–772.
2. Nature of the structural and crystal-chemical heterogeneity of the Mg-rich glauconite (Riphean, Anabar Uplift) / V.A. Drits, T.A. Ivanovskaya, B.A. Sakharov, B.B. Zvyagina, A. Derkowski, N.V. Gor'kova, E.V. Pokrovskaya, A.T. Savichev, T.S. Zaitseva // *Lithology and Mineral Resources*. – 2010. – V. 45 (6). – P. 555–576.
3. Drits V.A. Isomorphous Cation Distribution in Celadonites, Glauconites and Fe-illites Determined by Infrared, Mössbauer and EXAFS Spectroscopies // *Clay Minerals*. – 1997. – V. 32 (2). – P. 153–179.
4. McRae S.G. Glauconite // *Earth-Science Reviews*. – 1972. – V. 8 (4). – P. 397–440.
5. Odin G.S., Matter A. De glauconiarum origine // *Sedimentology*. – 1981. – V. 28 – P. 611–641.
6. Николаева И.В. Минералы группы глауконита в осадочных формациях. – Новосибирск: Наука, 1977. – 323 с.
7. Meunier A., El Albani A. The glauconite-Fe-illite-Fe-smectite problem: a critical review // *Terra Nova*. – 2007. – V. 19 (2). – P. 95–104.
8. Origin, Depositional Setting and Stratigraphic Implications of Palaeogene Glauconite of Kutch / S.L. Chatteraj, S. Banerjee, P.K. Saraswati, U. Bansal // *Special publication of the geological society of India*. – 2016. – V. 6. – P. 75–88.
9. Baldermann A., Grathoff G.H., Nickel C. Micromilieu-controlled glauconitization in fecal pellets at Oker (Central Germany) // *Clay Minerals*. – 2012. – V. 47 (4). – P. 513–538.
10. Amorosi A. Glaucony and sequence stratigraphy: a conceptual framework of distribution in siliciclastic sequences // *Journal of Sedimentary Research B: Stratigraphy & Global Studies*. – 1995. – V. B65 (4). – P. 419–425.
11. Odin G.S. Significance of Green Particles (Glaucony, Berthierine, Chlorite) in Arenites // *Provenance of Arenites* / ed. by G.G. Zuffa. – Dordrecht: Springer Netherlands, 1985. – P. 279–307.
12. Banerjee S., Bansal U., Thorat A.V. A review on palaeogeographic implications and temporal variation in glaucony composition // *Journal of Palaeogeography*. – 2016. – V. 5 (1). – P. 43–71.
13. The rate and mechanism of deep-sea glauconite formation at the Ivory Coast-Ghana Marginal Ridge / A. Baldermann, L.N. Warr, G.H. Grathoff, M. Dietzel // *Clays and Clay Minerals*. – 2013. – V. 61 (3). – P. 258–276.
14. Amorosi A. The occurrence of glaucony in the stratigraphic record: Distribution patterns and sequence-stratigraphic significance // *Rendiconti Online Societa Geologica Italiana*. – 2012. – V. 20. – P. 1–6.
15. The potential of glauconitic sandstone as a potassium fertilizer for olive plants / E. Karimi, A. Abdolzadeh, H.R. Sadeghipour, A. Aminei // *Archives of Agronomy and Soil Science*. – 2012. – V. 58 (9). – P. 983–993.
16. Franzosi C., Castro L.N., Celeda A.M. Technical Evaluation of Glauconies as Alternative Potassium Fertilizer from the Salamanca Formation, Patagonia, Southwest Argentina // *Natural Resources Research*. – 2014. – V. 23 (3). – P. 311–320.
17. Returning land contaminated as a result of radiation accidents to farming use / A.V. Voronina, M.O. Blinova, V.S. Semenishchev, D.K. Gupta // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2015. – V. 144. – P. 103–112.
18. Thermal and chemical solubilization of verdet for use as potassium fertilizer / W.O. Santos, E.M. Mattiello, L.M. da Costa, W.A.P. Abrahão, R.F. de Novais, R.B. Cantarutti // *International Journal of Mineral Processing*. – 2015. – V. 140. – P. 72–78.
19. Calculation of the dynamic sorbent capacity in the presence of two sorbates / V.I. Vigdorovich, L.E. Tsygankova, M.N. Esina, A.A. Uryadnikov, N.V. Shel // *Journal of Water Process Engineering*. – 2017. – V. 20. – P. 180–186.
20. Physico-chemical treatment of glauconitic sandstone to recover potash and magnetite / S. Shekhar, D. Mishra, A. Agrawal, K.K. Sahu // *Journal of Cleaner Production*. – 2017. – V. 147. – P. 681–693.
21. Amorosi A. Detecting compositional, spatial, and temporal attributes of glaucony: a tool for provenance research // *Sedimentary Geology*. – 1997. – V. 109 (1–2). – P. 135–153.
22. Wohlwend S., Hart M., Weissert H. Ocean current intensification during the Cretaceous oceanic anoxic event 2 – evidence from the northern Tethys // *Terra Nova*. – 2015. – V. 27 (2). – P. 147–155.
23. Николаева И.В. Минералогия и геохимия глауконита. – Новосибирск: СО РАН СССР, 1981. – 121 с.
24. Substantial iron sequestration during green-clay authigenesis in modern deep-sea sediments / A. Baldermann, L.N. Warr, I. Letofsky-Papst, V. Mavromatis // *Nature Geoscience*. – 2015. – V. 8 (11). – P. 885–889.
25. Distinctive compositional characteristics and evolutionary trend of Precambrian glaucony: Example from Bhalukona Formation, Chhattisgarh basin, India / S. Banerjee, S. Mondal, P.P. Chakraborty, S.S. Meena // *Precambrian Research*. – 2015. – V. 271. – P. 33–48.
26. The distinctive compositional evolution of glauconite in the Cretaceous Ukra Hill Member (Kutch basin, India) and its implications / U. Bansal, S. Banerjee, K. Pande, A. Arora, S.S. Meena // *Marine and Petroleum Geology*. – 2017. – V. 82. – P. 97–117.
27. Bornhold B.D., Giresse P. Glauconitic sediments on the continental shelf off Vancouver Island, British Columbia, Canada // *Journal of Sedimentary Petrology*. – 1985. – V. 55 (5). – P. 653–664.
28. Characterization and Exploitation of El-Gedida High-Mn Iron Ore, El-Bahariya Oasis, Western Desert, Egypt / G. El-Habaak, M.S. Askalany, M.G. Farghaly, M.S. Abdel-Hakeem // *American Journal of Energy Engineering*. – 2016. – V. 4 (4). – P. 34–39.

29. Glauconite from Paleogene volcano-terrigenous rocks in Western Kamchatka / A.R. Septner, T.A. Ivanovskaya, E.V. Pokrovskaya, N.P. Kuralenko // *Lithology and Mineral Resources*. – 2008. – V. 43 (3). – P. 228–249.
30. Structure of the carbon isotope excursion in a high-resolution lacustrine Paleocene–Eocene Thermal Maximum record from central China / Z. Chen, X. Wang, J. Hu, S. Yang, M. Zhu, X. Dong, Z. Tang, P. Peng, Z. Ding // *Earth and Planetary Science Letters*. – 2014. – V. 408 – P. 331–340.
31. Левченко Е.Н., Тигунов Л.П. Глауконит России: состояние, перспективы освоения и развития минерально-сырьевой базы. – М.: ВИМС, 2011. – 65 с.
32. Castro L., Tourn S. Direct Application of Phosphate Rocks and Glauconite as Alternative Sources of Fertilizer in Argentina // *Exploration and Mining Geology*. – 2003. – V. 12 (1–4). – P. 71–78.
33. Production and evaluation of potassium fertilizers from silicate rock / W.O. Santos, E.M. Mattiello, L. Vergutz, R.F. Costa // *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. – 2016. – V. 179 (4). – P. 547–556.
34. Economic potential of glauconitic rocks in Bakchar deposit (S-E Western Siberia) for alternate potash fertilizer / M. Rudmin, S. Banerjee, A. Mazurov, B. Makarov, D. Martemyanov // *Applied Clay Science*. – 2017. – V. 150. – P. 225–233.
35. Hao O.J., Tsai C.M., Huang C.P. The removal of metals and ammonium by natural glauconite // *Environment International*. – 1987. – V. 13 (2). – P. 203–212.
36. The study of selectivity of caesium sorption by a natural and surface-modified glauconite in presence of potassium and ammonium ions / V.S. Semenishchev, V.G. Ryabukhina, A.V. Voronina, M.A. Mashkovtsev, A.F. Nikiforov // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. – 2015. – V. 309 (2). – P. 583–588.
37. Synthesis, properties and antibacterial activity of the composites based on glauconite / S.B. Venig, R.K. Chernova, S.Y. Doronin, E.M. Soldatenko, E.I. Selifonova, V.G. Sergantov, A.M. Zaharevich, O.G. Shapoval // *BioNanoScience*. – 2017. – V. 7 (4). – P. 659–665.
38. Franus M., Bandura L. Sorption of heavy metal ions from aqueous solution by glauconite // *Fresenius Environmental Bulletin*. – 2014. – V. 23 (3A). – P. 825–839.
39. Ismael I.S., Kharbush S. Removing of As (V) from aqueous solution using natural and pretreated glauconite and halloysite // *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*. – 2013. – V. 8 (1). – P. 187–198.
40. Haaland M.M., Friesem D.E., Miller C.E., Henshilwood C.S. Heat-induced alteration of glauconitic minerals in the Middle Stone Age levels of Blombos Cave, South Africa: Implications for evaluating site structure and burning events // *Journal of Archaeological Science*. – 2017. – V. 86. – P. 81–100.
41. Environmental dynamics during the Paleocene–Eocene thermal maximum (PETM) in the northeastern Peri-Tethys revealed by high-resolution micropalaeontological and geochemical studies of a Caucasian key section / E. Shcherbinina, Y. Gavrilov, A. Iakovleva, B. Pokrovsky, O. Golovanova, G. Aleksandrova // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. – 2016. – V. 456. – P. 60–81.
42. Akhmetiev M.A., Zaporozhets N.I. Paleogene events in Central Eurasia: their role in the flora and vegetation cover evolution, migration of phytochore boundaries, and climate changes // *Stratigraphy and Geological Correlation*. – 2014. – V. 22 (3). – P. 312–335.
43. Найдин Д.П. Торгайский пролив в системе меридионального соединения позднемеловых морей Северного полушария // *Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел геологический*. – 2003. – Т. 7 (4). – С. 49–55.
44. Найдин Д.П. Разрез верхнего мела Кушмурун, Торгайский пролив // *Вестник Московского университета. Серия 4: Геология*. – 2006. – Т. 4. – С. 3–9.
45. Ронов А.Б., Хаин В.Е., Балуховский А.Н. Атлас литолого-палеогеографических карт мира. Мезозой и кайнозой континентов и океанов / под ред. В.Л. Барсукова, Н.П. Лавёрова. – Л.: ВСЕГЕИ, 1989. – 89 с.
46. Redox conditions across the G–L boundary in South China: Evidence from pyrite morphology and sulfur isotopic compositions / H. Wei, X. Wei, Z. Qiu, H. Song, G. Shi // *Chemical Geology*. – 2016. – V. 440. – P. 1–14.
47. Episodic euxinia in the Changhsingian (late Permian) of South China: Evidence from framboidal pyrite and geochemical data / H. Wei, T.J. Algeo, H. Yu, J. Wang, C. Guo, G. Shi // *Sedimentary Geology*. – 2015. – V. 319. – P. 78–97.
48. Sawlowicz Z. Pyrite framboids and their development: a new conceptual mechanism // *Geologische Rundschau*. – 1993. – V. 82 (1). – P. 148–156.
49. Merinero R., Cárdenes V. Theoretical growth of framboidal and sunflower pyrite using the R-package frambgrowth // *Mineralogy and Petrology*. – 2017. – P. 1–13. DOI 10.1127/0935-1221/2009/0021-1956
50. Wilkin R.T., Barnes H.L., Brantley S.L. The size distribution of framboidal pyrite in modern sediments: an indicator of redox conditions // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1996. – V. 60 (20). – P. 3897–3912.
51. Bond D.P.G., Wignall P.B. Pyrite framboid study of marine Permian–Triassic boundary sections: A complex anoxic event and its relationship to contemporaneous mass extinction // *Bulletin of the Geological Society of America*. – 2010. – V. 122 (7–8). – P. 1265–1279.
52. Crystal-chemical regularities and identification criteria in Fe-bearing k-dioctahedral micas 1m from X-Ray diffraction and infrared spectroscopy data / B.B. Zviagina, V.A. Drits, B.A. Sakharov, T.A. Ivanovskaya, O.V. Dorzhieva, D.K. McCarty // *Clays and Clay Minerals*. – 2017. – V. 65 (4). – P. 234–251.
53. Кристаллохимия и генезис глауконита из разреза «Меловатка» (сеноман, юго-восток Русской плиты) / Н.И. Афанасьева, С.О. Зорина, А.М. Губайдуллина, Н.И. Наумкина, Г.Г. Сучкова // *Литосфера*. – 2013. – Т. 2. – С. 65–75.
54. Odin G.S. Green marine clays: oolitic ironstone facies, verdine facies, glaucony facies and celadonite-bearing facies – a comparative study. – Amsterdam: Elsevier Science, 1988. – 445 p.
55. Baoumy H., Omran M., Fabritius T. Mineralogy, geochemistry and the origin of high-phosphorus oolitic iron ores of Aswan, Egypt // *Ore Geology Reviews*. – 2017. – V. 80. – P. 185–199.
56. The role of Fe on the formation and diagenesis of interstratified glauconite-smectite and illite-smectite: A case study of Upper Cretaceous shallow-water carbonates / A. Baldermann, M. Dietzel, V. Mavromatis, F. Mittermayr, L.N. Warr, K. Wemmer // *Chemical Geology*. – 2017. – V. 453. – P. 21–34.
57. Griffith E.M., Paytan A. Barite in the ocean – occurrence, geochemistry and palaeoceanographic applications // *Sedimentology*. – 2012. – V. 59 (6). – P. 1817–1835.
58. Paytan A., Moore W.S., Kastner M. Sedimentation rate as determined by <sup>226</sup>Ra activity in marine barite // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1996. – V. 60 (22). – P. 4313–4319.
59. Bishop J.K.B. The barite-opal-organic carbon association in oceanic particulate matter // *Nature*. – 1988. – V. 332 (6162). – P. 341–343.
60. Authigenic carbonate and barite mineralization in sediments of the Deryugin Basin (Sea of Okhotsk) / A.N. Derkachev, G. Bohrmann, J. Greinert, A.V. Mozherovsky // *Lithology and Mineral Resources*. – 2000. – V. 35 (6). – P. 504–519.
61. Rudmin M., Banerjee S., Mazurov A. Compositional variation of glauconites in Upper Cretaceous–Paleogene sedimentary iron-ore deposits in South-eastern Western Siberia // *Sedimentary Geology*. – 2017. – V. 355. – P. 20–30.

Поступила 10.01.2018.

#### **Информация об авторах**

**Рудмин М.А.**, кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Мазуров А.К.**, доктор геолого-минералогических наук, первый проректор, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Капанов А.С.**, студент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Соктоев Б.Р.**, кандидат геолого-минералогических наук, старший преподаватель отделения геологии Инженерной школы Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Буяков А.С.**, ассистент Инженерной школы новых производственных технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета; аспирант Национального исследовательского Томского государственного университета.

UDC 549.02: 553.08: 552.08: 552.14

## GLAUCONITE FROM UPPER CRETACEOUS FORMATIONS OF VARVARINSKOE DEPOSIT (TURGAY DEPRESSION, NORTHERN KAZAKHSTAN)

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

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

**Ali S. Kapanov<sup>1</sup>,**  
kapanov016@gmail.com

**Bulat R. Soktoev<sup>1</sup>,**  
bulat2670@mail.ru

**Ales S. Buyakov<sup>1,2</sup>,**  
bulat2670@mail.ru

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

<sup>2</sup> National Research Tomsk State University,  
36, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

*Glauconite is the dioctahedral micaceous mineral with a high Fe content and structure of 2:1 layers linked by interlayer K cations. Wide distribution among marine sedimentary deposits and specific structural and chemical features of glauconites attract considerable attention of scientists both for paleogeographic reconstructions and for practical economical applications.*

**The main aim** of the study is a detailed investigation of mineralogical and structural-chemical characteristics of glauconite from the Upper Cretaceous formations of the Varvarinskoe deposit to determine origin of glauconite and to obtain initial information about possibilities of its practical applications.

**The methods:** scanning electron microscopy, X-ray diffraction, thermogravimetric analysis, infrared spectroscopy, X-ray fluorescence analysis, optical microscopy and petrographic analysis.

As a result of this investigation the following main conclusions were obtained. The formation of glauconite-quartz sandstones and sands occurred in coastal facies near the terrigenous input in dysoxic and anoxic conditions. The studied rocks mainly consist of glauconite (9,2...9,4 %) and terrigenous quartz (82,6...86,8 %). Glauconite is characterized by the following chemical composition (%):  $K_2O$  – 6,73...8,89,  $SiO_2$  – 49,61...55,99,  $Fe_2O_{3(total)}$  – 19,36...26,85,  $MgO$  – 3,26...4,91,  $Al_2O_3$  – 3,90...7,31. The total content of adsorption and crystallization water is 3,46 and 7,12 %, respectively, according to the thermal analysis. Glauconite is evolved and highly evolved by degree of maturity. Glauconite is in situ origin. The glauconitization proceeded along the organic substrate according to the «verdissement» model due to chemical diffusion and transformation of the initial ferrous and ferrous-aluminum smectite, as evidenced by the structural and crystallochemical characteristics of glauconite. The studied structural and chemical characteristics of glauconite of the Varvarinskoe deposit indicate the possibility of its practical applications.

### Key words:

Glauconite, quartz sandstones, Upper Cretaceous, scanning electron microscopy, X-ray diffraction, infrared spectroscopy, thermogravimetric analysis, Varvarinskoe deposit, Turgay depression, Kazakhstan.

*This study was supported by the Russian Science Foundation within the framework of the research project 17–77–10042.*

### REFERENCES

1. Guggenheim S., Adams J.M., Bain D.C., Bergaya F., Brigatti M.F., Drits V.A., Formoso M. L.L., Galan E., Kogure T., Stanjek H. Summary of recommendations of nomenclature committees relevant to clay mineralogy: Report of the Association International pour l'Etude des Argiles (AIPEA) Nomenclature Committee for 2006 (Clays and Clay Minerals). *Clays and Clay Minerals*, 2007, vol. 55 (6), pp. 761–772.
2. Drits V.A., Ivanovskaya T.A., Sakharov B.A., Zvyagina B.B., Derkowski A., Gor'kova N.V., Pokrovskaya E.V., Savichev A.T., Zaitseva T.S. Nature of the structural and crystal-chemical heterogeneity of the Mg-rich glauconite (Riphean, Anabar Uplift). *Lithology and Mineral Resources*, 2010, vol. 45 (6), pp. 555–576.
3. Drits V.A. Isomorphous Cation Distribution in Celadonites, Glauconites and Fe-illites Determined by Infrared, Mössbauer and EXAFS Spectroscopies. *Clay Minerals*, 1997, vol. 32 (2), pp. 153–179.
4. McRae S.G. Glauconite. *Earth-Science Reviews*, 1972, vol. 8 (4), pp. 397–440.
5. Odin G.S., Matter A. De glauconiarum origine. *Sedimentology*, 1981, vol. 28, pp. 611–641.
6. Nikolaeva I. *Mineraly gruppy glaukonita v osadochnykh formatsiyakh* [Minerals of Glauconite Group in Sedimentary Formations]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1977. 319 p.
7. Meunier A., El Albani A. The glauconite-Fe-illite-Fe-smectite problem: a critical review. *Terra Nova*, 2007, vol. 19 (2), pp. 95–104.
8. Chatteraj S.L., Banerjee S., Saraswati P.K., Bansal U. Origin, Depositional Setting and Stratigraphic Implications of Palaeogene Glauconite of Kutch. *Special publication of the geological society of India*, 2016, vol. 6, pp. 75–88.

9. Baldermann A., Grathoff G.H., Nickel C. Micromilieu-controlled glauconitization in fecal pellets at Oker (Central Germany). *Clay Minerals*, 2012, vol. 47 (4), pp. 513–538.
10. Amorosi A. Glaucony and sequence stratigraphy: a conceptual framework of distribution in siliciclastic sequences. *Journal of Sedimentary Research B: Stratigraphy & Global Studies*, 1995, vol. 65, pp. 419–425.
11. Odin G.S. Significance of Green Particles (Glaucony, Berthierine, Chlorite) in Arenites. *Provenance of Arenites*. Ed. by G.G. Zuffa. Dordrecht, Springer Netherlands Publ., 1985. pp. 279–307.
12. Banerjee S., Bansal U., Thorat A.V. A review on palaeogeographic implications and temporal variation in glaucony composition. *Journal of Palaeogeography*, 2016, vol. 5 (1), pp. 43–71.
13. Baldermann A., Warr L.N., Grathoff G.H., Dietzel M. The rate and mechanism of deep-sea glauconite formation at the Ivory Coast-Ghana Marginal Ridge. *Clays and Clay Minerals*, 2013, vol. 61 (3), pp. 258–276.
14. Amorosi A. The occurrence of glaucony in the stratigraphic record: Distribution patterns and sequence-stratigraphic significance. *Rendiconti Online Societa Geologica Italiana*, 2012, vol. 20, pp. 1–6.
15. Karimi E., Abdolzadeh A., Sadeghipour H.R., Aminei A. The potential of glauconitic sandstone as a potassium fertilizer for olive plants. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2012, vol. 58 (9), pp. 983–993.
16. Franzosi C., Castro L.N., Celeda A.M. Technical Evaluation of Glauconies as Alternative Potassium Fertilizer from the Salamanca Formation, Patagonia, Southwest Argentina. *Natural Resources Research*, 2014, vol. 23 (3), pp. 311–320.
17. Voronina A.V., Blinova M.O., Semenishchev V.S., Gupta D.K. Returning land contaminated as a result of radiation accidents to farming use. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2015, vol. 144, pp. 103–112.
18. Santos W.O., Mattiello E.M., da Costa L.M., Abrahão W.A.P., de Novais R.F., Cantarutti R.B. Thermal and chemical solubilization of verdet for use as potassium fertilizer. *International Journal of Mineral Processing*, 2015, vol. 140, pp. 72–78.
19. Vigdorovich V.I., Tsygankova L.E., Esina M.N., Uryadnikov A.A., Shel N.V. Calculation of the dynamic sorbent capacity in the presence of two sorbates. *Journal of Water Process Engineering*, 2017, vol. 20, pp. 180–186.
20. Shekhar S., Mishra D., Agrawal A., Sahu K.K. Physico-chemical treatment of glauconitic sandstone to recover potash and magnetite. *Journal of Cleaner Production*, 2017, vol. 147, pp. 681–693.
21. Amorosi A. Detecting compositional, spatial, and temporal attributes of glaucony: a tool for provenance research. *Sedimentary Geology*, 1997, vol. 109 (1–2), pp. 135–153.
22. Wohlwend S., Hart M., Weissert H. Ocean current intensification during the Cretaceous oceanic anoxic event 2 – evidence from the northern Tethys. *Terra Nova*, 2015, vol. 27 (2), pp. 147–155.
23. Nikolaeva I. *Mineralogiya i geokhimiya glaukonita* [Mineralogy and geochemistry of glauconite]. Novosibirsk, SA RAS USSR Press, 1981. 121 p.
24. Baldermann A., Warr L.N., Letofsky-Papst I., Mavromatis V. Substantial iron sequestration during green-clay authigenesis in modern deep-sea sediments. *Nature Geoscience*, 2015, vol. 8 (11), pp. 885–889.
25. Banerjee S., Mondal S., Chakraborty P.P., Meena S.S. Distinctive compositional characteristics and evolutionary trend of Precambrian glaucony: Example from Bhalukona Formation, Chhattisgarh basin, India. *Precambrian Research*, 2015, vol. 271, pp. 33–48.
26. Bansal U., Banerjee S., Pande K., Arora A., Meena S.S. The distinctive compositional evolution of glauconite in the Cretaceous Ukra Hill Member (Kutch basin, India) and its implications. *Marine and Petroleum Geology*, 2017, vol. 82, pp. 97–117.
27. Bornhold B.D., Giresse pp. Glauconitic sediments on the continental shelf off Vancouver Island, British Columbia, Canada. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1985, vol. 55 (5), pp. 653–664.
28. El-Habaak G., Askalany M.S., Farghaly M.G., Abdel-Hakem M.S. Characterization and Exploitation of El-Gedida High-Mn Iron Ore, El-Bahariya Oasis, Western Desert, Egypt. *American Journal of Energy Engineering*, 2016, vol. 4 (4), pp. 34–39.
29. Geptner A.R., Ivanovskaya T.A., Pokrovskaya E.V., Kuralenko N.P. Glauconite from Paleogene volcano-terrestrial rocks in Western Kamchatka. *Lithology and Mineral Resources*, 2008, vol. 43 (3), pp. 228–249.
30. Chen Z., Wang X., Hu J., Yang S., Zhu M., Dong X., Tang Z., Peng P., Ding Z. Structure of the carbon isotope excursion in a high-resolution lacustrine Paleocene–Eocene Thermal Maximum record from central China. *Earth and Planetary Science Letters*, 2014, vol. 408, pp. 331–340.
31. Levchenko E., Tiginov L. *Glaukonit Rossii: sostoyanie, perspektivy osvoeniya i razvitiya mineralno-syrovoy bazy* [Glauconite of Russia: state, perspectives of exploitation and development of mineral resources]. Moscow, VIMS Publ., 2011. 65 p.
32. Castro L., Tourn S. Direct Application of Phosphate Rocks and Glauconite as Alternative Sources of Fertilizer in Argentina. *Exploration and Mining Geology*, 2003, vol. 12 (1–4), pp. 71–78.
33. Santos W.O., Mattiello E.M., Vergutz L., Costa R.F. Production and evaluation of potassium fertilizers from silicate rock. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2016, vol. 179 (4), pp. 547–556.
34. Rudmin M., Banerjee S., Mazurov A., Makarov B., Martemyanov D. Economic potential of glauconitic rocks in Bakchar deposit (S-E Western Siberia) for alternate potash fertilizer. *Applied Clay Science*, 2017, vol. 150, pp. 225–233.
35. Hao O.J., Tsai C.M., Huang C. The removal of metals and ammonium by natural glauconite. *Environment International*, 1987, vol. 13 (2), pp. 203–212.
36. Semenishchev V.S., Ryabukhina V.G., Voronina A.V., Mashkovtsev M.A., Nikiforov A.F. The study of selectivity of cesium sorption by a natural and surface-modified glauconite in presence of potassium and ammonium ions. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2015, vol. 309 (2), pp. 583–588.
37. Venig S.B., Chernova R.K., Doronin S.Y., Soldatenko E.M., Selifonova E.I., Sergantov V.G., Zaharevich A.M., Shapoval O.G. Synthesis, properties and antibacterial activity of the composites based on glauconite. *BioNanoScience*, 2017, vol. 7 (4), pp. 659–665.
38. Franus M., Bandura L. Sorption of heavy metal ions from aqueous solution by glauconite. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2014, vol. 23 (3A), pp. 825–839.
39. Ismael I.S., Kharbush S. Removing of As (V) from aqueous solution using natural and pretreated glauconite and halloysite. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, 2013, vol. 8 (1), pp. 187–198.
40. Haaland M.M., Friesem D.E., Miller C.E., Henshilwood C.S. Heat-induced alteration of glauconitic minerals in the Middle Stone Age levels of Blombos Cave, South Africa: Implications for evaluating site structure and burning events. *Journal of Archaeological Science*, 2017, vol. 86, pp. 81–100.
41. Shcherbinina E., Gavrilov Y., Iakovleva A., Pokrovsky B., Golovanova O., Aleksandrova G. Environmental dynamics during the Paleocene–Eocene thermal maximum (PETM) in the northeastern Peri-Tethys revealed by high-resolution micropaleontological and geochemical studies of a Caucasian key section. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2016, vol. 456, pp. 60–81.
42. Akhmetiev M.A., Zaporozhets N.I. Paleogene events in Central Eurasia: Their role in the flora and vegetation cover evolution, migration of phytochore boundaries, and climate changes. *Stratigraphy and Geological Correlation*, 2014, vol. 22 (3), pp. 312–335.

43. Naydin D.P. Turgai strait in the system of meridional connection of late cretaceous seas of northern hemisphere. *Bulletin of Moscow Society of Testers of Nature. Geological department*, 2003, vol. 7 (4), pp. 49–55. In Rus.
44. Naydin D.P. Section of the Upper Cretaceous Kushmurun, Turgai Strait. *Moscow University Geology Bulletin*, 2006, vol. 4, pp. 3–9. In Rus.
45. Ronov A.B., Khain V.E., Balukhovskiy A.N. *Atlas litologo-paleogeograficheskikh kart mira. Mezozoy i kaynozoy kontinentov i okeanov* [Atlas of lithologic-paleogeographic maps of the world. Mesozoic and Cenozoic continents and oceans]. Leningrad, VSEGEI Publ., 1989. 89 p.
46. Wei H., Wei X., Qiu Z., Song H., Shi G. Redox conditions across the G–L boundary in South China: Evidence from pyrite morphology and sulfur isotopic compositions. *Chemical Geology*, 2016, vol. 440, pp. 1–14.
47. Wei H., Algeo T.J., Yu H., Wang J., Guo C., Shi G. Episodic euxinia in the Changhsingian (late Permian) of South China: Evidence from framboidal pyrite and geochemical data. *Sedimentary Geology*, 2015, vol. 319, pp. 78–97.
48. Sawlowicz Z. Pyrite framboids and their development: a new conceptual mechanism. *Geologische Rundschau*, 1993, vol. 82 (1), pp. 148–156.
49. Merinero R., Cárdenas V. Theoretical growth of framboidal and sunflower pyrite using the R-package frambgrowth. *Mineralogy and Petrology*, 2017. pp. 1–13. DOI 10.1127/0935-1221/2009/0021-1956
50. Wilkin R.T., Barnes H.L., Brantley S.L. The size distribution of framboidal pyrite in modern sediments: an indicator of redox conditions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1996, vol. 60 (20), pp. 3897–3912.
51. Bond D.P.G., Wignall P.B. Pyrite framboid study of marine Permian-Triassic boundary sections: a complex anoxic event and its relationship to contemporaneous mass extinction. *Bulletin of the Geological Society of America*, 2010, vol. 122 (7–8), pp. 1265–1279.
52. Zviagina B.B., Drits V.A., Sakharov B.A., Ivanovskaya T.A., Dorzhieva O.V., McCarty D.K. Crystal-chemical regularities and identification criteria in Fe-bearing k-dioctahedral micas 1m from X-Ray diffraction and infrared spectroscopy data. *Clays and Clay Minerals*, 2017, vol. 65 (4), pp. 234–251.
53. Afanasyeva N.I., Zorina S.O., Gubaydullina A.M., Naumkina N.I., Suchkova G.G. Crystal chemistry and genesis of glauconite from «Melovatka» section (Cenomanian, of South-Eastern Russian plate). *Lithosphere*, 2013, vol. 2, pp. 65–75. In Rus.
54. Odin G.S. *Green marine clays: oolitic ironstone facies, verdine facies, glaucony facies and celadonite-bearing facies – a comparative study*. Amsterdam, Elsevier Science Publ., 1988. 445 p.
55. Baïoumy H., Omran M., Fabritius T. Mineralogy, geochemistry and the origin of high-phosphorus oolitic iron ores of Aswan, Egypt. *Ore Geology Reviews*, 2017, vol. 80, pp. 185–199.
56. Baldermann A., Dietzel M., Mavromatis V., Mittermayr F., Warr L.N., Wemmer K. The role of Fe on the formation and diagenesis of interstratified glauconite-smectite and illite-smectite: A case study of Upper Cretaceous shallow-water carbonates. *Chemical Geology*, 2017, vol. 453, pp. 21–34.
57. Griffith E.M., Paytan A. Barite in the ocean – occurrence, geochemistry and palaeoceanographic applications. *Sedimentology*, 2012, vol. 59 (6), pp. 1817–1835.
58. Paytan A., Moore W.S., Kastner M. Sedimentation rate as determined by <sup>226</sup>Ra activity in marine barite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1996, vol. 60 (22), pp. 4313–4319.
59. Bishop J.K.B. The barite-opal-organic carbon association in oceanic particulate matter. *Nature*, 1988, vol. 332 (6162), pp. 341–343.
60. Derkachev A.N., Bohrmann G., Greinert J., Mozherovskiy A.V. Authigenic carbonate and barite mineralization in sediments of the Deryugin Basin (Sea of Okhotsk). *Lithology and Mineral Resources*, 2000, vol. 35 (6), pp. 504–519.
61. Rudmin M., Banerjee S., Mazurov A. Compositional variation of glauconites in Upper Cretaceous-Paleogene sedimentary iron-ore deposits in South-eastern Western Siberia. *Sedimentary Geology*, 2017, vol. 355, pp. 20–30.

Received: 10 January 2018.

#### Information about the authors

**Maxim A. Rudmin**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

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

**Ali S. Kapanov**, student, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Bulat R. Soktoev**, Cand. Sc., assistant professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Ales S. Buyakov**, assistant, National Research Tomsk Polytechnic University; postgraduate, National Research Tomsk State University.

УДК 621.313.333:62–83

## РАЗРАБОТКА НАБЛЮДАТЕЛЯ ПОЛНОГО ПОРЯДКА С ОПЕРАТИВНЫМ МОНИТОРИНГОМ МОМЕНТА СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЛЯ ПОГРУЖНЫХ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Глазырин Александр Савельевич<sup>1</sup>,  
asglazyrin@tpu.ru

Кладиев Сергей Николаевич<sup>1</sup>,  
kladiev@tpu.ru

Афанасьев Кирилл Сергеевич<sup>1</sup>,  
afanks@tpu.ru

Тимошкин Вадим Владимирович<sup>1</sup>,  
timoshkinvv@tpu.ru

Слепнёв Иван Георгиевич<sup>1</sup>,  
slepnev.i@mail.ru

Полищук Владимир Иосифович<sup>2</sup>,  
polischuk\_vi@mail.ru

Sándor Halász<sup>3</sup>,  
halasz.sandor@vet.bme.hu

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

<sup>2</sup> Самарский государственный технический университет,  
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244.

<sup>3</sup> Будапештский университет технологии и экономики,  
Венгрия, H-1111, Будапешт, Jozef út. 18.

**Актуальность.** Эксплуатация установок электроцентробежных насосов для скважинной добычи нефти осложняется рядом факторов, к которым в первую очередь следует отнести газовые включения в откачиваемой жидкости, присутствие асфальтосмолопарафиновых отложений, вынос песка и других абразивных частиц, осаждение различных солей на рабочие органы погружных насосов, в частности таких, как карбонат кальция  $\text{CaCO}_3$ , сульфат кальция  $\text{CaSO}_4$ , сульфат бария  $\text{BaSO}_4$  и хлорид натрия  $\text{NaCl}$ . По мере работы погружного насоса в этих условиях постепенно увеличивается момент сопротивления нагрузки с общим снижением коэффициента полезного действия насоса вплоть до частичного или полного заклинивания вала. Увеличение момента сопротивления при подклинивании дополнительно статически нагружает и стенки насосно-компрессорных труб. Наличие газовых включений приводит к нарушению стационарности потока закачиваемой жидкости, и вследствие этого появляются дополнительные напряжения знакопеременного характера в стенках насосно-компрессорных труб. В ряде случаев происходит усталостное разрушение насосно-компрессорных труб и «полёт» погружного оборудования в устье скважины. Исходя из вышеописанного, появляется необходимость разработки методов и средств мониторинга момента сопротивления нагрузки на валу погружного асинхронного двигателя в режиме реального времени. Прямое измерение с помощью датчика момента или восстановления оценок момента по электрическим измерениям непосредственно на клеммах погружного асинхронного двигателя не представляется целесообразным по технико-экономическим соображениям. Наиболее перспективным является разработка наблюдателя полного порядка, учитывающего свойства погружного кабеля с помощью замеров токов и напряжений на выходе повышающего трансформатора – на входе кабельной линии. Исследование работоспособности такого наблюдателя оригинальной структуры представляет научный и практический интерес.

**Цель исследования:** разработка и апробирование на математических моделях оригинальной структуры наблюдателя полного порядка с оперативным мониторингом момента сопротивления нагрузки для погружных асинхронных двигателей, подключенных к источнику питания по длинному кабелю.

**Методы** исследования основаны на использовании теории наблюдателей полного порядка, численных методов решения систем обыкновенных дифференциальных уравнений, методов численного интегрирования, теории автоматического управления, теории фильтрации сигналов.

**Результаты.** Предложена оригинальная структура наблюдателя полного порядка с оперативным мониторингом сопротивления нагрузки на валу погружного асинхронного двигателя, подключенного к источнику питания по длинному кабелю. Для функционирования наблюдателя необходима информация о величине токов и напряжений на входе питающего кабеля, а также сигналы об оценках параметров схемы замещения и момента инерции от дополнительного устройства – идентификатора параметров (в данной статье не рассматривался). Продемонстрировано, что структура наблюдателя предоставляет пользователю оценки ортогональных проекций в осях  $\alpha$ ,  $\beta$  потокосцепления ротора, угловой частоты вращения, крутящего момента и момента сопротивления нагрузки на валу погружного асинхронного двигателя в реальном времени, как в установившихся, так и в переходных режимах: пуска, наброса и сброса нагрузки. Достоинствами наблюдателя являются высокие показатели качества оценивания при малом количестве настраиваемых параметров и относительной простоте настройки. Показано, что применение фильтров-постфильтрато-

ров по схеме Баттерворта улучшает качество оценки момента сопротивления нагрузки на валу погружного электродвигателя. Наличие сигналов оценок проекций потокоцепления ротора и угловой частоты вращения ротора позволяет рекомендовать такой наблюдатель для электроприводов, выполненных по схеме «преобразователь частоты – асинхронный двигатель». Исследования показали, что интегральные погрешности оценивания при отработке наблюдателем затяжных переходных процессов находятся на приемлемом уровне: по оценке угловой скорости, не превышают 0,5 %, а по оценке момента нагрузки на валу не более 19 %. Ошибка оценивания в установившихся режимах и при отсутствии изменений параметров составляет менее 1 %.

#### Ключевые слова:

Скважина, электроцентробежный насос, длинный кабель, погружной асинхронный двигатель, наблюдатель полного порядка, оценка угловой скорости, оценки проекций потокоцепления ротора в ортогональной системе координат  $\alpha$ ,  $\beta$ , мониторинг момента сопротивления.

#### Введение

Российская федерация является крупным экспортером газа и нефти. На мировом рынке доля России по экспорту нефтепродуктов составляет 10 % от общего объема [1]. Современные прогнозы показали, что спрос на энергоресурсы с каждым годом увеличивается.

На данный момент положение России на мировом рынке «черного золота» можно охарактеризовать как сложное. В 2016 г. цены на нефть опускались до 27 долларов за баррель [2]. Крупные нефтедобывающие компании на территории России пришли к выводу – чтобы остаться на плаву необходимо снижать себестоимость добычи нефти. Конкурировать России по добыче «черного золота» со странами Персидского залива достаточно сложно ввиду более благоприятных условий в этом регионе: преобладание легких фракций в составе нефти, низкая глубина её залегания, теплый климат, транспортная доступность месторождений.

Для повышения эффективности в нефтяной промышленности необходимо повышать надежность, энергосбережение и качество регулирования силовых установок [3].

К перспективным направлениям исследований относится повышение эффективности эксплуатации установок электроцентробежных насосов (УЭЦН). При работе в агрессивных условиях технико-экономические показатели УЭЦН меняются, что приводит к увеличению затрат и к снижению общего объема добычи нефти на месторождении. Продолжительная эксплуатация УЭЦН в неблагоприятных условиях может привести к выходу установки из строя ранее срока его службы. Анализ работы [4] показал, что основными причинами отказов УЭЦН являются: 8...22,5 % засорение электроцентробежных насосов (ЭЦН) механическими примесями; засорение ЭЦН пропантом 5...10 %, снижение сопротивление изоляции 8...10 % [5]; снижение производительности (износ) 6...17,5 %; заклинивание установки 9...18 %, негерметичность насосно-компрессорных труб (НКТ) 6...8 %; снижение притока из пласта 4...7 %; другие причины 7...15 %.

Существует два основных типа заклинивания вала насоса – мягкое и жесткое. К жесткому заклиниванию вала УЭЦН относится образование солей в рабочих органах центробежного насоса. При попытке устранить такое заклинива-

ние может произойти срез шпонок или деформация вала [6]. Мягкое заклинивание обычно вызвано заиливанием, засорением и устраняется путем реверса погружного асинхронного электродвигателя (ПЭД) с постепенным увеличением момента. Подобная проблема заклинивания роторов (их взаимного сцепления) возникает и в центрифугах со шнековой выгрузкой осадка при подготовке буровых растворов, а также при очистке растворов урана от механических примесей в ядерно-химической отрасли [7].

Анализ механических характеристик насоса и погружного двигателя при заклинивании показал, что увеличение момента на валу двигателя возможно до максимального значения, равного критическому моменту. В предельных режимах работы обмотки погружного электродвигателя подвержены сильному тепловому нагреву, что снижает допустимую продолжительность работы ПЭД в режиме перегрузки по току и моменту [8]. Помимо этого существенные знакопеременные колебания момента на валу двигателя воспринимаются колонной НКТ, в стенках которых постепенно накапливаются усталостные напряжения, что в конечном итоге может привести к аварийному разрыву труб по самому нагруженному сечению и к так называемому «полету», т. е. неконтролируемому падению части НКТ с ПЭД в скважину.

Для контроля расклинивания вала ЭЦН необходимо измерять момент на валу ПЭД и его угловую скорость. Установка дополнительного датчика момента и датчика угловой скорости на вал погружного двигателя приведет как к дополнительным трудностям в наладке и эксплуатации блока погружной телеметрии, так и к значительному увеличению стоимости УЭЦН [9]. Зарубежные [10–14] и отечественные работы показали [15–17], что момент на валу двигателя и угловую скорость можно успешно определять косвенными методами с помощью наблюдателя на основе измеренных данных с датчиков токов и напряжений. В упомянутых исследованиях влияние кабельной линии на работу наблюдателя подробно не рассматривалось. В виду того, что длина кабельной линии может достигать величины более двух километров, измеренные на поверхности токи и напряжения на входе питающего кабеля будут отличаться от тех же величин, которые были бы получены путем непосредственного измерения на клеммах по-

грузного двигателя. Для решения данной проблемы необходимо разработать работоспособную структуру наблюдателя полного порядка с оперативным мониторингом момента сопротивления для погружных асинхронных электродвигателей с учетом влияния кабельной линии и проверить эту структуру на адекватность получаемых оценок.

#### Разработка и проверка работоспособности метода оценивания угловой скорости и момента на валу погружного двигателя

Математическая модель наблюдателя момента нагрузки и угловой частоты вращения представлена в виде двух систем дифференциальных уравнений (1) и (2), где в (1) учитываются особенности погружного асинхронного двигателя, а в (2) – особенности кабельной линии.

Система дифференциальных уравнений (1) имеет пять переменных состояния: оценка проекций вектора тока статора  $\hat{i}_{1\alpha}, \hat{i}_{1\beta}$ , оценки проекции вектора потокоцепления ротора  $\hat{\Psi}_{2\alpha}, \hat{\Psi}_{2\beta}$ , оценка угловой скорости  $\hat{\omega}$  ротора АД, выходной сигнал интегратора  $\hat{U}_{\text{л2.н}}$ , который позволяет добиться приемлемых показателей оценивания частоты вращения и момента нагрузки.

$$\begin{cases} \frac{d\hat{i}_{1\alpha}(t)}{dt} = \frac{1}{\sigma L_1} \hat{U}_{1\alpha-k}(t) - \frac{R_2}{\sigma L_1} \hat{i}_{1\alpha}(t) + \frac{R_2' L_m}{\sigma L_1 L_2^2} \hat{\Psi}_{2\alpha}(t) + \\ + \frac{L_m}{\sigma L_1 L_2} z_p \hat{\omega} \hat{\Psi}_{2\beta}(t) + \frac{k_{\text{л1}\alpha}}{\sigma L_1} (\hat{i}_{1k-\alpha}(t) - \hat{i}_{1\alpha}(t)); \\ \frac{d\hat{i}_{1\beta}(t)}{dt} = \frac{1}{\sigma L_1} \hat{U}_{1\beta-k}(t) - \frac{R_2}{\sigma L_1} \hat{i}_{1\beta}(t) + \frac{R_2' L_m}{\sigma L_1 L_2^2} \hat{\Psi}_{2\beta}(t) - \\ - \frac{L_m}{\sigma L_1 L_2} z_p \hat{\omega} \hat{\Psi}_{2\alpha}(t) + \frac{k_{\text{л1}\beta}}{L_1} (\hat{i}_{1k-\beta}(t) - \hat{i}_{1\beta}(t)); \\ \frac{d\hat{\Psi}_{2\alpha}(t)}{dt} = -\frac{R_2'}{L_2} \hat{\Psi}_{2\alpha}(t) + \frac{R_2' L_m}{L_2} \hat{i}_{1\alpha}(t) - z_p \hat{\omega} \hat{\Psi}_{2\beta}(t); \\ \frac{d\hat{\Psi}_{2\beta}(t)}{dt} = -\frac{R_2'}{L_2} \hat{\Psi}_{2\beta}(t) + \frac{R_2' L_m}{L_2} \hat{i}_{1\beta}(t) + z_p \hat{\omega} \hat{\Psi}_{2\alpha}(t); \\ \frac{d\hat{\omega}(t)}{dt} = \frac{3L_m z_p k_{\text{л2}}}{2J_2 L_2} \left( \hat{\Psi}_{2\alpha}(t)(\hat{i}_{1k-\beta}(t) - \hat{i}_{1\beta}(t)) - \right. \\ \left. - \hat{\Psi}_{2\beta}(t)(\hat{i}_{1k-\alpha}(t) - \hat{i}_{1\alpha}(t)) \right) + \\ + U_{\text{л2.н}}(t); \\ \frac{d\hat{U}_{\text{л2.н}}(t)}{dt} = \frac{1}{T_{\text{л2}}} \frac{3L_m z_p}{2J_2 L_2} \left( \hat{\Psi}_{2\alpha}(t)(\hat{i}_{1k-\beta}(t) - \hat{i}_{1\beta}(t)) - \right. \\ \left. - \hat{\Psi}_{2\beta}(t)(\hat{i}_{1k-\alpha}(t) - \hat{i}_{1\alpha}(t)) \right), \end{cases} \quad (1)$$

где  $\hat{U}_{1\alpha-k}(t), \hat{U}_{1\beta-k}(t)$  – оценки проекций вектора напряжения в осях  $\alpha, \beta$  на клеммах погружного асинхронного двигателя – на выходе кабельной линии;  $T_{\text{л2}}, k_{\text{л1}\alpha}, k_{\text{л1}\beta}, k_{\text{л2}}$  – настроечные коэффициенты наблюдателя;  $L_1 = L_{1\sigma} + L_m$  – эквивалентная индуктивность обмотки статора;  $L_2 = L_{2\sigma} + L_m$  – эквивалентная индуктивность обмотки ротора;  $L_{1\sigma}$  – индуктивность рассеяния обмотки статора;  $L_{2\sigma}'$  – приведенная к статору индуктивность рассеяния обмотки ротора;  $L_m$  – результирующая индуктивность, обусловленная магнитным потоком в воз-

душном зазоре машины;  $R_2'$  – приведенное сопротивление ротора;  $R_1$  – активное сопротивление статора;  $z_p$  – число пар полюсов;  $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_1 L_2}$  – коэф-

фициент рассеяния;  $R_3 = R_1 + R_2' \frac{L_m^2}{L_2^2}$  – эквивалентное активное фазное омическое сопротивление;  $T_3 = \frac{\sigma L_1}{R_3}$  – электромагнитная постоянная времени статора.

Общая система дифференциальных уравнений, учитывающая влияние кабельной линии в нормальной форме Коши:

$$\begin{cases} \frac{d\hat{i}_{1k-\alpha}(t)}{dt} = \\ = \frac{1}{L_K} [U_{\text{ВХ.-}\alpha}(t) - \hat{i}_{1k-\alpha}(t) R_{1K} - \hat{U}_{1\alpha-k}(t)]; \\ \frac{d\hat{U}_{1\alpha-k}(t)}{dt} = \frac{1}{C_K} \left[ \hat{i}_{1k-\alpha}(t) - \frac{\hat{U}_{1\alpha-k}(t)}{R_{2K}} - \hat{i}_{1\alpha}(t) \right]; \\ \frac{d\hat{i}_{1k-\beta}(t)}{dt} = \\ = \frac{1}{L_K} [U_{\text{ВХ.-}\beta}(t) - \hat{i}_{1k-\beta}(t) R_{1K} - \hat{U}_{1\beta-k}(t)]; \\ \frac{d\hat{U}_{1\beta-k}(t)}{dt} = \frac{1}{C_K} \left[ \hat{i}_{1k-\beta}(t) - \frac{\hat{U}_{1\beta-k}(t)}{R_{2K}} - \hat{i}_{1\beta}(t) \right], \end{cases} \quad (2)$$

где  $\hat{i}_{1k-\alpha}(t), \hat{i}_{1k-\beta}(t)$  – оценки проекций вектора тока в кабельной линии;  $\hat{U}_{1\alpha-k}(t), \hat{U}_{1\beta-k}(t)$  – оценки проекций вектора напряжения на выходе кабельной линии;  $R_{1K}$  – активное сопротивление кабельной линии;  $L_K$  – индуктивное сопротивление кабельной линии;  $C_K$  – емкостное сопротивление кабельной линии;  $R_{2K}$  – сопротивление изоляции.

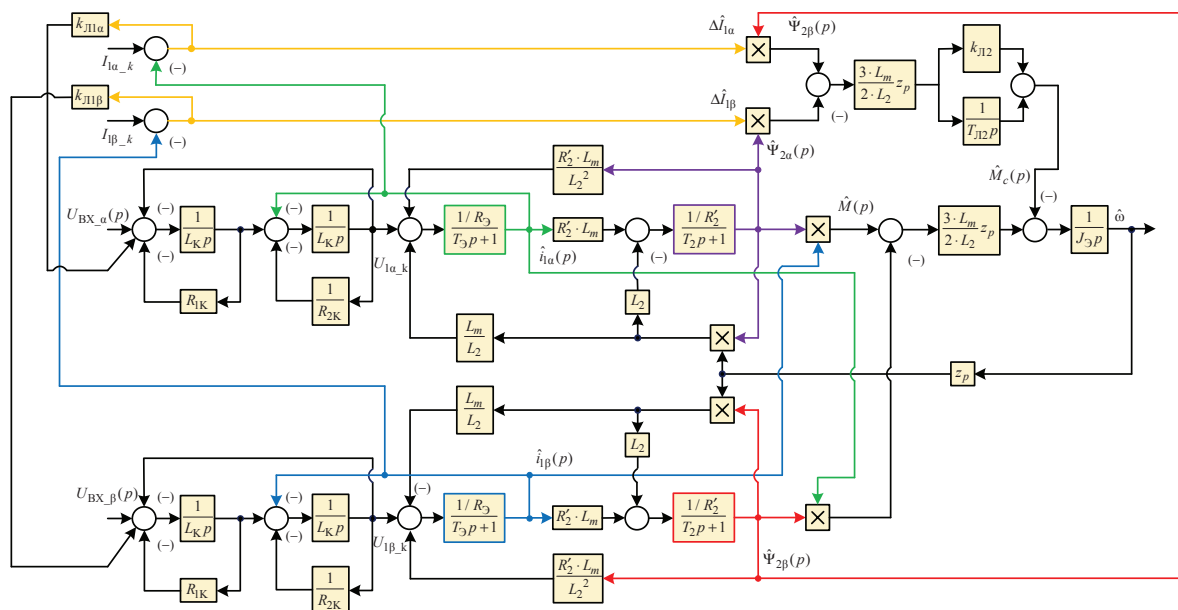
На основе дифференциальных уравнений составлена структурная схема наблюдателя (рис. 1), где электромагнитная постоянная времени ротора

$$T_2 = \frac{L_2}{R_2}.$$

#### Проверка адекватности работы идентификатора угловой скорости и момента на валу погружного двигателя на имитационной модели

Для проверки работоспособности наблюдателя угловой скорости был выбран погружной электродвигатель ПЭДН 40–117 [18] с параметрами схемы замещения, приведёнными в табл. 1.

При моделировании был выбран погружной кабель КППБ-90 с параметрами, представленными в табл. 2, который активно используется для погружных электродвигателей в нефтяной промышленности. Электрическое сопротивление изоляции, пересчитанное из погонного сопротивления на 1 км длины, составило 2500 МОм.



**Рис. 1.** Структурная схема наблюдателя полного порядка для погружного асинхронного двигателя, подключенного к источнику питания по длинному кабелю

**Fig. 1.** Schematic structure of a full order state observer for submersible induction motor power supplying from long cable

**Таблица 1.** Параметры погружного асинхронного электро-двигателя ПЭДН 40–117

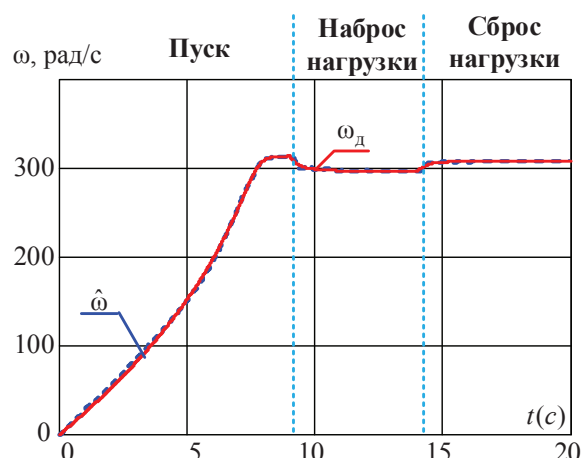
**Table 1.** Parameters of submersible induction motor PEDN 40–117

| $R_1$ , Ом/Ohm | $L_{1\sigma}$ , мГн/mH | $R_2'$ , Ом/Ohm | $L_{2\sigma}'$ , мГн/mH | $L_m$ , мГн/mH | $J$ , кг·м <sup>2</sup> /kg·m <sup>2</sup> | $Z_p$ |
|----------------|------------------------|-----------------|-------------------------|----------------|--------------------------------------------|-------|
| 2,995          | 8,493                  | 1,167           | 0,011                   | 0,211          | 2,63                                       | 2     |

**Таблица 2.** Параметры схемы замещения погружного кабеля марки КПБП

**Table 2.** Parameters of circuit diagram for KPBP type long cable

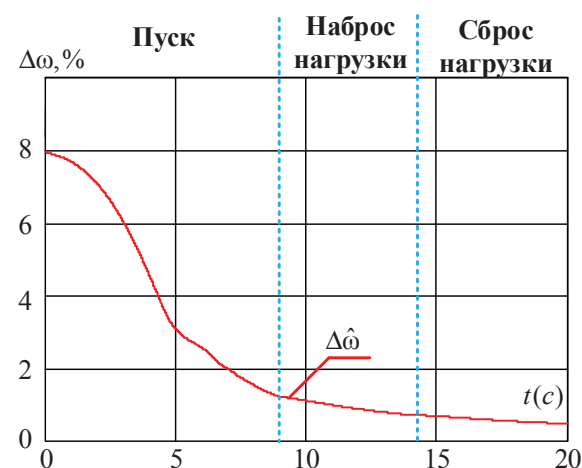
| Длина, м/Length, m | $R_{1k}$ , Ом/Ohm | $L_k$ , мГн/mH | $C_k$ , мкФ/μF |
|--------------------|-------------------|----------------|----------------|
| 2000               | 2,2               | 1,23           | 1,19           |



**Рис. 2.** Переходные процессы угловой скорости ротора ПЭД и ее оценки

**Fig. 2.** Transient processes of submersible induction motor speed and speed estimation

На рис. 2 представлены переходные процессы угловой скорости ротора ПЭД и ее оценки, из которых видно, что наблюдатель отрабатывает траекторию пуска, наброса и сброса нагрузки. Максимум частичного интеграла для расчёта ошибки оценивания по угловой скорости наблюдателя находится в начале процесса пуска, затем величина частичного интеграла постепенно снижается (рис. 3).



**Рис. 3.** Переходный процесс частичных интегралов для расчета интегральной ошибки оценивания по скорости

**Fig. 3.** Transient process of partial integrals for calculating the integral error of speed estimation

Из рис. 4 видно, что в переходном процессе оценки момента сопротивления нагрузки присутствует колебательная составляющая, которая существенно влияет на интегральную ошибку оценивания (рис. 5). Для уменьшения ошибки оценивания

ния было предложено ввести постфильтрацию сигнала оценивания момента сопротивления нагрузки по схеме Баттерворта. На рис. 4, 5 представлены сигналы оценки  $\hat{M}_{c01}$  и интегральной ошибки  $\Delta\hat{M}_{c01}$  без фильтрации,  $\hat{M}_{c02}$ ,  $\Delta\hat{M}_{c02}$  – сигналы, полученные с первой ступени фильтра-постфильтратора, где постоянная времени фильтра  $T_{\phi 1}=0,1$  с;  $\hat{M}_{c03}$ ,  $\Delta\hat{M}_{c03}$  – сигналы, полученные со второй ступени фильтра-постфильтратора, где постоянные времени первой и второй ступеней  $T_{\phi 1}=0,1$  с,  $T_{\phi 2}=0,1$  с;  $\hat{M}_{c04}$ ,  $\Delta\hat{M}_{c04}$  – сигналы, полученные с третьей ступени фильтра-постфильтратора, где постоянные времени первой, второй и третьей ступеней  $T_{\phi 1}=0,1$  с,  $T_{\phi 2}=0,1$  с,  $T_{\phi 3}=0,1$  с.

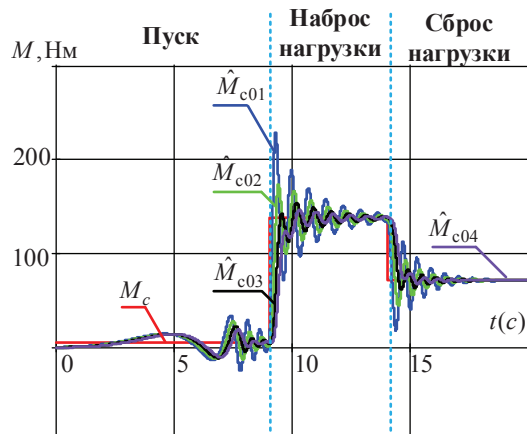


Рис. 4. Переходные процессы сигнала момента нагрузки на валу и его оценок на различных ступенях фильтра-постфильтратора

Fig. 4. Transient processes of the load torque signal on the shaft and its estimations at different stages of the filter-post-filter

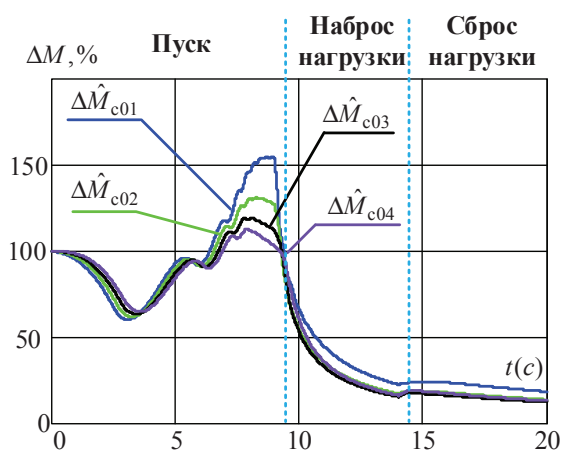


Рис. 5. Переходные процессы частичных интегралов для расчета интегральной ошибки оценивания момента нагрузки на различных ступенях постфильтратора

Fig. 5. Transient process of partial integrals for calculating the integral error of the load torque estimation at different stages of the filter-post-filter

На рис. 6. представлены переходные процессы вспомогательных координат для получения итоговых оценок угловой частоты вращения и момента нагрузки. Как в оценке результирующего модуля

тока, так и в оценке потокоцепления присутствует небольшие колебания.

Рис. 7 показывает, что с учётом влияния кабельной линии напряжение на клеммах двигателя меняется в зависимости от текущей нагрузки на валу двигателя.

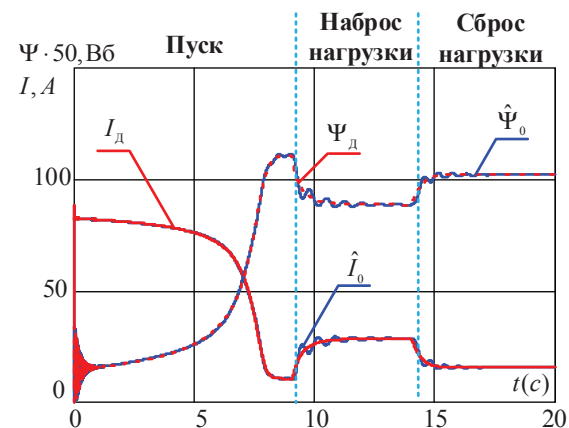


Рис. 6. Переходные процессы результирующих модулей векторов тока статора и потокоцепления ротора и их оценок

Fig. 6. Transient processes of resulting modules of stator current vectors and rotor flux vectors and their estimations

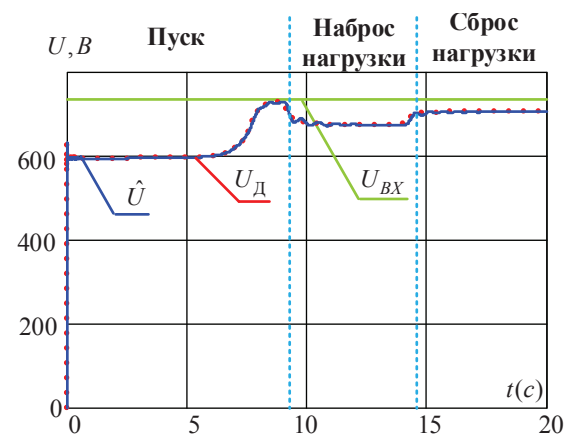


Рис. 7. Переходные процессы результирующих модулей векторов питающего напряжения, напряжения на клеммах погружного асинхронного двигателя и его оценки

Fig. 7. Transient processes of the resulting modules of supply voltage vectors, voltage at the terminals post of a submersible induction motor and their estimations

Эффективность работы наблюдателя угловой скорости и момента нагрузки подтверждают данные табл. 3. Максимальная ошибка оценивания угловой скорости и момента нагрузки в статике не превышает 1 %, а в динамике не более 20 %. Вычисление интегральной ошибки в динамике производилось по следующему выражению:

$$\Delta\omega_{\text{и}} = \frac{\int_{t_{\text{нач}}}^{t_{\text{конеч}}} |\omega(t) - \hat{\omega}(t)| dt}{\int_{t_{\text{нач}}}^{t_{\text{конеч}}} |\omega(t)| dt} \cdot 100 \%,$$

где  $t_{\text{нач}}$  и  $t_{\text{конеч}}$  – начальный и конечный момент интервала интегрирования в течение переходного процесса.

**Таблица 3.** Сводная таблица погрешностей оценивания угловой скорости и момента нагрузки на валу погружного электродвигателя в статике и динамике

**Table 3.** Table of errors in estimation of speed and load torque on the shaft of a submersible induction motor in static and dynamic

| Статика/Static            |            | Динамика/Dynamic          |                       |
|---------------------------|------------|---------------------------|-----------------------|
| $\Delta\omega_{\text{л}}$ | $\Delta M$ | $\Delta\omega_{\text{л}}$ | $\Delta M_{\text{л}}$ |
| %                         |            |                           |                       |
| 0,002                     | 0,1777     | 0,4774                    | 18,62                 |
| 0,002                     | 0,1529     | 0,4774                    | 13,99                 |
| 0,002                     | 0,024      | 0,4774                    | 12,54                 |
| 0,002                     | 0,033      | 0,4774                    | 13,39                 |

### Рекомендуемые меры по повышению эффективности разработанного наблюдателя при программно-алгоритмической реализации

Внедрение предложенного наблюдателя в технологический процесс механизированной добычи нефти с помощью установок ЭЦН предполагает большие перспективы повышения эффективности добычи при учёте особенностей компоновки силового канала электропривода. При программно-алгоритмической реализации разработанного наблюдателя необходимо учитывать следующие рекомендации:

1. Следует обеспечить существенное преобладание основной гармоники в спектральных составах тока и напряжения в питающем кабеле и в статоре погружного асинхронного двигателя. В настоящее время для этого во многих отечественных и зарубежных УЭЦН применяют специальные устройства, так называемые «синус-фильтры», которые включаются между выходами автономного инвертора напряжения, работающего в режиме широтно-импульсной модуляции, и входными обмотками повышающего трансформатора [19, 20]. Несоблюдение этого требования может вызвать необходимость рассмотрения волновых процессов в погружном кабеле, что существенно усложнит как структуру наблюдателя, так и процесс его настройки.
2. Работоспособность наблюдателя предложенной структуры может быть гарантирована только при условии поступления в наблюдатель в ре-

жиме реального времени сигналов об оценках параметров схемы замещения и момента инерции от дополнительного устройства – идентификатора параметров (в данной статье не рассматривался). Этот идентификатор авторы рекомендуют выполнять по методике, изложенной в статье [21].

### Выводы

1. Показана актуальность и целесообразность разработки наблюдателя полного порядка с оперативным мониторингом момента сопротивления для погружных асинхронных электродвигателей, как перспективного средства профилактики заклинивания вала электроцентробежных насосов при добыче нефти в осложнённых условиях.
2. Разработана структура наблюдателя полного порядка с оперативным мониторингом момента сопротивления для погружных асинхронных электродвигателей, учитывающая параметры схемы замещения и переменные состояния питающего кабеля – тока на входе и напряжения на выходе.
3. Проверка работоспособности разработанного наблюдателя на основе математического моделирования погружных асинхронных электродвигателей с учётом влияния длинного кабеля показала, что полученные оценки момента сопротивления на валу являются устойчивыми и несмещёнными, интегральная среднеквадратическая ошибка оценивания при отработке переходных процессов находится на приемлемом для практики уровне: интегральная погрешность оценивания момента сопротивления нагрузки на валу ПЭД в статике не превышает 0,2%, а в динамике – не более 19%; интегральная погрешность оценивания угловой частоты вращения вала ПЭД в статике не превышает 0,002%, а в динамике – не более 0,5%.
4. Полученные результаты позволяют рекомендовать разработанный наблюдатель к внедрению в случаях подавляющего преобладания основной гармоники в спектре напряжения на входе питающего ПЭД кабеля, что в настоящее время в основном обеспечивается в интеллектуальных станциях управления УЭЦН, оборудованных синус-фильтрами на выходе автономного инвертора напряжения, работающего в режиме ШИМ-модуляции.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рыженко В.Ю. Нефтяная промышленность России: состояние и проблемы // Перспективы Науки и Образования. – 2014. – № 1. – С. 300–308.
2. Етирмишли К.Э. Причины падения цен на нефть // Новая наука: Опыт, традиции, инновации. – 2016. – № 6-1. – С. 115–117.
3. Букреев В.Г., Сипайлова Н.Ю., Сипайлов В.А. Стратегия управления электротехническим комплексом механизированной добычи нефти на основе экономического критерия // Известия

Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 3. – С. 75–84.

4. Корабельников М.И., Корабельников А.М. Об основных причинах отказа УЭЦН и методах увеличения наработки на отказ на месторождениях Западной Сибири // Опыт, актуальные проблемы и перспективы развития нефтегазового комплекса: Материалы V региональной научно-практической конференции обучающихся ВО, аспирантов и ученых. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2015. – С. 241–249.
5. Оценка остаточного ресурса изоляции погружного электродвигателя установок электрических центробежных насосов добы-

- чи нефти при воздействиях импульсных перенапряжений / В.В. Сушков, В.В. Тимошкин, И.С. Сухачев, С.В. Сидоров // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 10. – С. 74–80.
6. Escobar J.A., Romero A.F., Lobo-Guerrero J. Failure analysis of submersible pump system collapse caused by assembly bolt crack propagation by stress corrosion cracking // Engineering Failure Analysis. – 2016. – V. 60. – P. 1–8.
  7. Kladiev S.N., Slobodyan S.M., Pishchulin V.P. Automation of preparation of uranium solutions // Tsvetnye Metally. – 2014. – № 8. – P. 77–82.
  8. Research on intelligent power supply control based on sensor-less temperature identification of Electric Submersible Motor / H. Zhang, J. Yu, Q. Jiang, L. Wang, D. Xu // Green World with Power Electronics: 9<sup>th</sup> International Conference on Power Electronics – ECCE Asia. – Seoul, Korea, 2015. – Paper № 7168168. – P. 2802–2807.
  9. Ведерников В.А., Гапанович В.С., Козлов В.В. Особенности применения погружных электроцентробежных насосов на нефтяных месторождениях Среднего Приобья // Вестник кибернетики. – 2008. – № 7. – С. 27–32.
  10. Herman I., Vaclavek P. Load torque and moment of inertia observability analysis for alternating current drive sensorless control // Industrial Electronics Conference (IECON) Proc. – Montreal, Quebec, Canada, 2012. – Paper № 6388917. – P. 1864–1869.
  11. Binder B.J.T., Pavlov A., Johansen T.A. Estimation of flow rate and viscosity in a well with an electric submersible pump using moving horizon estimation // IFAC Workshop on Automatic Control in Offshore Oil and Gas Production, OOGP 2015 Proc. – Florianopolis, Brazil, 2015. – V. 28. – Iss. 6. – P. 140–146.
  12. Rabbi S.F., Constantine M., Rahman M.A. A novel sensorless IPM motor drive for electric submersible pumps // IEEE International Electric Machines and Drives Conference, IEMDC. – Miami, FL, USA, 2017. – Conference Paper № 8002199. – P. 1–8.
  13. Messaoudi M., Sbita L. Sensorless direct torque and flux control of induction motor based on MRAS and Luenberger observer // International Conference on Green Energy and Conversion Systems, GECS 2017. – Hammamet, Tunisia, 2017. – Conference Paper № 8066224. – P. 1–7.
  14. Online robust estimation of flux and load torque in induction motors / M. Bahloul, L. Chrifi-Alaoui, A.N. Vargas, M. Chaabane, S. Drid // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2017. – V. 94 (5–8). – P. 2703–2713.
  15. Афанасьев К.С., Глазырин А.С. Наблюдатель полного вектора состояния и момента нагрузки асинхронного электродвигателя // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2013. – № 4. – С. 24–30.
  16. Лысенко О.А. Наблюдатель момента нагрузки асинхронного двигателя с двойной беличьей клеткой ротора // Омский научный вестник. – 2016. – № 5. – С. 85–89.
  17. Серьёзов Ю.В. Моделирование электропривода с наблюдателем // Science Time. – 2016. – № 11. – С. 466–470.
  18. Моделирование привода погружного насоса интеллектуальной скважины / А.В. Федотов, В.Г. Хомченко, В.В. Жильцов, А.Н. Компанейц, Н.Г. Скабкин. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2012. – 175 с.
  19. Design and implementation of position sensorless starting control in industrial drives with output filter and transformer for oil/pump applications / J. Liu, J. Dai, S. Royak, P. Schmidt, E. Al-Nabi, T. Nondahl // Proc. IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition – APEC, 2017. – Tampa, FL, USA, 2017. – Conference Paper № 7930752. – P. 578–584.
  20. Guzinski J., Abu-Rub H. Sensorless induction motor drive with voltage inverter and sine-wave filter // IEEE International Symposium on Sensorless Control for Electrical Drives and Predictive Control of Electrical Drives and Power Electronics. – München, Germany, 2013. – Conference Paper № 6684503. – P. 1–8.
  21. Боловин Е.В., Глазырин А.С. Метод идентификации параметров погружных асинхронных электродвигателей установок электроприводных центробежных насосов для добычи нефти // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 1. – С. 123–131.

Поступила 12.02.2018 г.

#### Информация об авторах

**Глазырин А.С.**, доктор технических наук, доцент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Кладиев С.Н.**, кандидат технических наук, доцент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Афанасьев К.С.**, кандидат технических наук, старший преподаватель отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Тимошкин В.В.**, кандидат технических наук, ассистент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Слепнёв И.Г.**, магистрант отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Полищук В.И.**, доктор технических наук, заведующий кафедрой электроснабжения промышленных предприятий Самарского государственного технического университета.

**Sándor Halász**, PhD, профессор Будапештского университета технологии и экономики.

UDC 621.313.333:62–83

## DESIGN OF FULL ORDER OBSERVER WITH REAL TIME MONITORING OF LOAD TORQUE FOR SUBMERSIBLE INDUCTION MOTORS

**Alexander S. Glazyrin<sup>1</sup>,**

asglazyrin@tpu.ru

**Sergey N. Kladiev<sup>1</sup>,**

kladiev@tpu.ru

**Kirill S. Afanasiev<sup>1</sup>,**

afanks@tpu.ru

**Vadim V. Timoshkin<sup>1</sup>,**

timoshkinvv@tpu.ru

**Ivan G. Slepnev<sup>1</sup>,**

slepnev.i@mail.ru

**Vladimir I. Polishchuk<sup>2</sup>,**

polischuk\_vi@mail.ru

**Sándor Halász<sup>3</sup>,**

halasz.sandor@vet.bme.hu

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

<sup>2</sup> Samara State Technical University,  
244, Molodogvardeyskaya street, Samara, 443100, Russia.

<sup>3</sup> Budapest University of Technology and Economics,  
H-1111, Jozef út 18, Budapest, Hungary.

*The operation of electric submersible pump for oil wells is complicated by a number of factors, which include gas inclusions in the pumped liquid, the presence of asphalt and tar paraffin sedimentation, raising of sand and other abrasive particles, deposition of various salts on the working parts of submersible pumps, in particular, calcium carbonate  $\text{CaCO}_3$ , calcium sulfate  $\text{CaSO}_4$ , barium sulfate  $\text{BaSO}_4$  and sodium chloride  $\text{NaCl}$ . As the submersible pump operates under these conditions, the load torque gradually increases, with total decrease in the efficiency of the pump up to a partial or full jamming of the shaft. The increase in the load torque during the wedging additionally statically loads the walls of the tubing. The presence of gas inclusions leads to disturbance in the stationary of the flow of injected liquid, and as a consequence, additional stresses of alternating character appear in the walls of the tubing in a wide range of vibrations. In a number of cases the fatigue destruction of tubing and «downfall» of submersible equipment occur at the wellhead. Therefore, it is time to develop the methods and means for monitoring the load torque on the shaft of a submersible induction motor in real time. Direct measurement with the help of a torque sensor or the restoration of torque estimates by electrical measurements directly on the terminals of a submersible induction motor is not advisable for technical and economic reasons. The most promising is the development of a full order state observer, taking into account the properties of the submerged cable by measuring the currents and voltages at the output of the step-up transformer – at the input of the cable line. Setting up such an observer of the original structure is of scientific and practical interest.*

**The aim** of research is to develop and test the mathematical models of the original structure of the full-order state observer with the real time monitoring of the load torque for submerged induction motors feeding on a long submersible cable.

**The main material and studies** are based on the use of the theory of full order state observers, numerical methods for solving systems of ordinary differential equations, numerical integration methods, automatic control theory, and the theory of signal filtering.

**Conclusion and outlines.** The original structure of the full order state observer is proposed with on-line monitoring of the load torque on the shaft of a submersible induction motor power supplying from a long cable. For observer functioning, one need the information on the magnitude of currents and voltages at the input of the submersible motor cable, as well as signals on the estimates of parameters of the replacement circuit and the moment of inertia from the additional device, the parameter identifier (not discussed in this article). It is demonstrated that the structure of the observer provides the user with estimates of the orthogonal projections in the axes  $\alpha$ ,  $\beta$  of the rotor flux coupling, the speed, the torque and the load torque on the shaft of the submersible induction motor in real time, both in steady-state conditions and in transient regimes: starting motor, on-off loading. The advantage of the observer is a high indicator of the quality of the evaluation with a small number of configurable parameters and rather simple setting. It is shown that the use of filter-post filters according to the Butterworth scheme improves the quality of evaluation of the load torque on the shaft of a submersible motor. The presence of signals evaluating the projections of the rotor flux linkage and the speed of the rotor makes it possible to recommend such an observer for electric drives made according to the scheme «frequency converter – induction motor». The studies shown that the integral errors of estimation during the observer working out of protracted transient processes are at an acceptable level: according to the speed estimation, they do not exceed 0,5 %, and according to the estimation of the load torque on the shaft no more than 20 %. The estimation error in steady-state regimes and in the absence of parameter variations is less than 1 %.

# Key words:

Oil well, electric submersible pump, long cable, submersible induction motor, full order state observer, speed estimation, estimation of the rotor flux-linkage projections in the orthogonal coordinate system  $\alpha, \beta$ , load torque monitoring.

# REFERENCES

1. Ryzhenko V.Yu. Oil industry in Russia: state and problems. *Perspektivy Nauki i Obrazovaniya*, 2014, no. 1, pp. 300–308. In Rus.
2. Etirmishli K.Eh. The reasons for the fall in oil prices. *Novaya nauka: Opyt, traditsii, innovatsii*, 2016, no. 6–1, pp. 115–117. In Rus.
3. Bukreev V.G., Sipaylova N.Yu., Sipaylov V.A. Control strategy in accordance with economical criterion for electrotechnical installation of mechanized oil production. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 3, pp. 75–84. In Rus.
4. Korabelnikov M.I., Korabelnikov A.M. Ob osnovnykh prichinakh otkaza UEHCN i metodakh uvelicheniya narabotki na otkaz na mestorozhdeniyakh Zapadnoy Sibiri [On the main reasons for the failure of the ESP and the methods of increasing the time between failures in the fields of Western Siberia]. *Opyt, aktualnye problemy i perspektivy razvitiya neftegazovogo kompleksa. Materialy V regionalnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii obuchayushchikhsya VO, aspirantov i uchenykh* [Experience, current problems and prospects for development of oil and gas complex. Materials of the V regional scientific and practical conference of students of VO, post-graduate students and scientists]. Tyumen, TyumGNGU Publ., 2015. pp. 241–249.
5. Sushkov V.V., Timoshkin V.V., Sukhachev I.S., Sidorov S.V. Evaluation of submersible electric motor insulation residual resource in oil production electric centrifugal pumps under the influence of impulse overvoltages. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 10, pp. 74–80. In Rus.
6. Escobar J.A., Romero A.F., Lobo-Guerrero J. Failure analysis of submersible pump system collapse caused by assembly bolt crack propagation by stress corrosion cracking. *Engineering Failure Analysis*, 2016, vol. 60, pp. 1–8.
7. Kladiev S.N., Slobodyan S.M., Pishchulin V.P. Automation of preparation of uranium solutions. *Tsvetnye Metally*, 2014, no. 8, pp. 77–82.
8. Zhang H., Yu J., Jiang Q., Wang L., Xu D. Research on intelligent power supply control based on sensor-less temperature identification of Electric Submersible Motor. *Green World with Power Electronics. 9<sup>th</sup> International Conference on Power Electronics – ECCE Asia*. Seoul, Korea, 2015. Conference Paper no. 7168168, pp. 2802–2807.
9. Vedernikov V.A., Gapanovich V.S., Kozlov V.V. Features of submersible electric centrifugal pumps application in the oil fields of the Middle Ob region. *Vestnik kibernetiki*, 2008, no. 7, pp. 27–32. In Rus.
10. Herman I., Vaclavek P. Load torque and moment of inertia observability analysis for alternating current drive sensorless control. *Industrial Electronics Conference (IECON) Proc.* Montreal, Quebec, Canada, 2012. Conference Paper no. 6388917, pp. 1864–1869.
11. Binder B.J.T., Pavlov A., Johansen T.A. Estimation of flow rate and viscosity in a well with an electric submersible pump using moving horizon estimation. *IFAC Workshop on Automatic Control in Offshore Oil and Gas Production, OOGP 2015 Proc.* Florianopolis, Brazil, 2015. Vol. 28, Iss. 6, pp. 140–146.
12. Rabbi S.F., Constantine M., Rahman M.A. A novel sensorless IPM motor drive for electric submersible pumps. *IEEE International Electric Machines and Drives Conference*. Miami, FL, USA, 2017. Conference Paper no. 8002199, pp. 1–8.
13. Messaoudi M., Sbita L. Sensorless direct torque and flux control of induction motor based on MRAS and Luenberger observer. *International Conference on Green Energy and Conversion Systems*. Hammamet, Tunisia, 2017. Conference Paper no. 8066224, pp. 1–7.
14. Bahloul M., Chrifi-Alaoui L., Vargas A.N., Chaabane M., Drid S. Online robust estimation of flux and load torque in induction motors. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, vol. 94 (5–8), pp. 2703–2713.
15. Afanasev K.S., Glazyrin A.S. The observer of the complete vector of the state and load moment of an induction motor. *Elektrotehnicheskiye komplekсы i sistemy upravleniya*, 2013, no. 4, pp. 24–30. In Rus.
16. Lysenko O.A. Observer of the load torque of an induction motor with a double squirrel cage of a rotor. *Omskiy nauchnyy vestnik*, 2016, no. 5, pp. 85–89. In Rus.
17. Seryoznov Yu.V. Simulation of electric drive with observer. *Science Time*, 2016, no. 11, pp. 466–470. In Rus.
18. Fedotov A.V., Khomchenko V.G., Zhiltsov V.V., Kompaneyts A.N., Skabkin N.G. *Modelirovaniye privoda pogrurnozhno nasosa intelektualnoy skvazhiny* [Modeling the drive of a submersible pump of an intellectual well]. Omsk, OmGTU Publ., 2012. 175 p.
19. Liu J., Dai J., Royak S., Schmidt P., Al-Nabi E., Nondahl T. Design and implementation of position sensorless starting control in industrial drives with output filter and transformer for oil/pump applications. *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition Proc.* Tampa, FL, USA, 2017. Conference Paper no. 7930752, pp. 578–584.
20. Guzinski J., Abu-Rub H. Sensorless induction motor drive with voltage inverter and sine-wave filter. *IEEE International Symposium on Sensorless Control for Electrical Drives and Predictive Control of Electrical Drives and Power Electronics*. München, Germany, 2013. Conference Paper no. 6684503, pp. 1–8.
21. Bolovin E.V., Glazyrin A.S. Method for identifying parameters of submersible induction motors of electrical submersible pump units for oil production. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 1, pp. 123–131. In Rus.

Received: 12 February 2018.

# Information about the authors

**Alexander S. Glazyrin**, Dr. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Sergey N. Kladiev**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Kirill S. Afanasiev**, Cand. Sc., senior lecturer, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Vadim V. Timoshkin**, Cand. Sc., assistant, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Ivan G. Slepnev**, graduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Vladimir I. Polishchuk**, Dr. Sc., head of the department, Samara State Technical University.

**Sándor Halász**, PhD, professor, Budapest University of Technology and Economics.

УДК 666.762.11.539.4

## НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЕ СПЕКАНИЕ КОРУНДОВЫХ ПОРОШКОВ

Матренин Сергей Вениаминович<sup>1</sup>,

vm-s@mail.ru

Ильин Александр Петрович<sup>1</sup>,

ilyin@tpu.ru

Кулявцева Светлана Владимировна<sup>2</sup>,

kazanzeva-latyan@mail.ru

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

<sup>2</sup> ФНПЦ «Алтай»,  
Россия, 658322, г. Бийск, ул. Социалистическая, 1.

Актуальность работы обусловлена необходимостью глубокой переработки минерального сырья и совершенствования технологии получения алюмооксидной керамики.

**Цель исследования:** разработка методов активирования спекания керамики на основе  $Al_2O_3$  путем механической обработки порошков в планетарной мельнице, добавления в шихту нанопорошков  $Al$ ,  $Al_2O_3$  и субмикронного порошка  $TiO_2$ , применения метода искрового плазменного спекания.

**Методы исследования:** ситовый анализ крупнодисперсных порошков с использованием анализатора А20, рентгенофазовый анализ исследуемых образцов, гидростатическое взвешивание для определения кажущейся плотности спеченных образцов, измерение микротвердости спеченных образцов с использованием микротвердомера ПМТ-3, измерение твердости HRA с помощью твердомера Роквелла.

**Результаты.** Добавка нанопорошка  $Al_2O_3$  в порошок корунда марки ГК-5 способствовала повышению плотности и микротвердости спеченной керамики. Такое активирующее влияние объясняется увеличением площади межчастичных контактов, которое связано с добавлением нанопорошка  $Al_2O_3$ . Механизм активирования спекания обусловлен повышенной структурной активностью и энергией поверхности нанопорошка  $Al_2O_3$ , которые определяются дефектностью кристаллического строения и малыми размерами частиц. Наиболее существенный прирост плотности наблюдался у керамики, содержащей 5...20 мас. % добавки нанопорошка  $Al_2O_3$ . Экспериментально подтверждено дополнительное активирование спекания нанопорошка  $Al_2O_3$  при добавлении нанопорошка алюминия: наблюдалось снижение его пористости. Активирование спекания добавлением нанопорошка  $Al$  объясняется окислением алюминия и фазовыми переходами (эффект Хедвалла). Наибольшим активирующим эффектом обладала добавка нанопорошка  $TiO_2$  в порошок  $Al_2O_3$ : плотность спеченной керамики, содержащей 1,5 мас. %  $TiO_2$ , достигала 3,48 г/см<sup>3</sup>.

### Ключевые слова:

Активирование, нанопорошки, прочная керамика, искровое плазменное спекание, механическое активирование, керамика, низкотемпературное спекание.

### Введение

На территории Российской Федерации имеются месторождения корунда и минералов, содержащих  $Al_2O_3$  [1]. Получение керамики и изделий из нее требует активирования спекания корунда. Это дает возможность понизить температуру спекания (1700 °С), что упрощает технологию и экономит ресурсы [2]. Прочная керамика на основе  $Al_2O_3$  является весьма перспективным конструкционным и функциональным материалом. Наиболее распространенными методами получения прочной корундовой керамики являются методы порошковой технологии, т. е. различные виды прессования и спекания, модифицированные применительно к керамике. Модификация сводится к выбору оптимальных параметров консолидирования керамики. Такими параметрами являются: давление прессования и способы его приложения, температурный режим спекания, среда и скорость проведения процесса. Компактирование керамических порошков можно проводить холодным статиче-

ским прессованием с одно- или двухсторонним приложением давления; горячим прессованием; холодным или горячим изостатическим прессованием в гидро- или газостатах; горячей экструзией; шликерным литьем; магнитно-импульсным, ударным и взрывным прессованием; ультразвуковым прессованием. Тем не менее, широкому практическому распространению прочной корундовой керамики препятствуют сложность и низкая производительность технологий горячего прессования [2, 3], позволяющих получать материалы с максимально высокими прочностными характеристиками [4]. Относительно простая технология одноосного прессования с последующим свободным спеканием, как правило, не позволяет получать керамику с высоким уровнем механических свойств [5]. Поэтому проблема активирования процессов спекания корундовой керамики имеет важное практическое значение [6].

Основы теории активированного спекания были заложены авторами [7]. В первую очередь по-

дразуется, что спекаемые порошки приведены в особое, так называемое «активное» состояние. Такое состояние может быть связано или с предысторией формирования частиц порошка в процессе его получения (высокая площадь удельной поверхности, дефектность кристаллического строения и структуры), или с теми активирующими изменениями, которые произошли в процессе прессования (деформация и разрушение частиц, образование напряженного состояния, метастабильных химических соединений в зоне контактов), или, наконец, с явлениями активирования, происходящими в самом процессе спекания (химические реакции, действие магнитных, электрических, звуковых полей, облучений). Вместе с тем активирование всегда связано с повышенной неравновесностью системы, подвергающейся спеканию, следовательно, с повышением запасенной энергии, сокращение которого и обуславливает экспериментально наблюдаемую интенсификацию процесса в целом.

Целью данной работы являлась методов активирования спекания керамики на основе  $Al_2O_3$  путем механической обработки порошков в планетарной мельнице, добавления в шихту нанопорошков (НП)  $Al$ ,  $Al_2O_3$  и субмикронного порошка  $TiO_2$  и применения технологии искрового плазменного спекания (ИПС).

#### Материалы и методы исследования

Использовали промышленные оксидные порошки  $Al_2O_3$ ,  $Al_2O_3$ - $ZrO_2$ - $Y_2O_3$ , полученные в условиях плазмохимического синтеза марки УДПО ВТУ 4–25–90. Химический состав порошков приведен в табл. 1.

**Таблица 1.** Химический состав исходных оксидных плазмохимических порошков

**Table 1.** Chemical content of initial oxide plasma-chemical powders

| $Al_2O_3$     | $ZrO_2$ | $Y_2O_3$ |
|---------------|---------|----------|
| мол./mol. / % |         |          |
| 100           | –       | –        |
| 80            | 19      | 1        |

Наиболее простой способ плазмохимического синтеза (ПХС) оксидных НП заключается в подаче водных растворов нитратов металлов ( $Al$ ,  $Zr$ ,  $Y$ ) в сопло плазмотрона, генерирующего плазму воздуха. В каплях раствора возникали чрезвычайно высокие температурные градиенты. Происходил очень быстрый процесс синтеза и кристаллизации требуемого оксида или смеси оксидов на поверхности капли с одновременным испарением воды через кристаллизующуюся сферическую корку. Поэтому оксидные порошки, полученные ПХС, имеют характерную форму полых сфер (частично шаров, если капля очень маленькая), состоящих из нанокристаллитов и аморфизированной межкристаллитной фазы [8]. Размер сфер зависит от давления

подачи раствора через форсунку в плазму и от температуры и варьируется в пределах 100...1000 нм, размер кристаллитов, образующих сферу, составляет 50...100 нм. Следует отметить высокую гомогенность твердых растворов  $ZrO_2$ , а также почти 100%-ю аморфизацию плазмохимических порошков  $Al_2O_3$  [9]. Существенным недостатком оксидных нанопорошков, получаемых в условиях указанного способа, является характерная сферическая форма частиц, которая обуславливает их крайне низкие технологические свойства.

Кроме плазмохимических нанопорошков в работе использовали порошок оксида алюминия марки ЧДА ТУ 6–09–426–75, порошок технического глинозема марки ГК-5 ГОСТ 30559–98 и электрокорунд марки 25А, состав которого приведен в табл. 2.

**Таблица 2.** Химический состав белого электрокорунда

**Table 2.** Chemical content of a white electrocorundum

| Марка<br>Trademark | мас./wt. / % |         |         |           |
|--------------------|--------------|---------|---------|-----------|
|                    | $Al_2O_3$    | $SiO_2$ | $Na_2O$ | $Fe_2O_3$ |
| 25А                | 99,1         | 0,1     | 0,26    | 0,06      |

Белый электрокорунд широко используется в технологии корундовой керамики, температура его обжига должна быть не ниже 1800 °С [10, 11]. С целью ее снижения в порошок белого электрокорунда добавляли субмикронный порошок  $TiO_2$  с размером частиц 0,5...2 мкм в количестве 1,5 мас. %.

В качестве активирующей добавки использовали также электровзрывной НП  $Al$ , полученный с использованием полупромышленной установки ЭВП в Томском политехническом университете. Среднеповерхностный диаметр частиц указанного НП ( $d_{cp} = 6/\rho S_{уд}$ , где  $\rho$  – плотность, г/см<sup>3</sup>;  $S_{уд}$  – площадь удельной поверхности порошка, м<sup>2</sup>/г, определенная с помощью газовой адсорбции БЭТ) не превышал 140 нм. Способ получения электровзрывных НП, их физико-химические и технологические свойства описаны в [11].

Ситовый анализ крупнодисперсных порошков марок чда и ГК-5 проводили с помощью анализатора А 20 в соответствии с ГОСТ 18318–94. Брали навески порошков массой 50 г, частота вибратора составляла 70 Гц, время рассева – 10 мин. После просева фракции взвешивали и вычисляли содержание каждой фракции.

Насыпную плотность, плотность после утряски, текучесть всех исследованных порошков определяли в соответствии с ГОСТ 19440–94, ГОСТ 25279–93, ГОСТ 20899–75.

Оксидные порошки обжигали в атмосфере воздуха в высокотемпературной печи сопротивления при 1450 °С в течение одного часа для перевода  $\gamma-Al_2O_3$  в  $\alpha-Al_2O_3$ .

Для улучшения технологических характеристик и повышения активности [12] обожженные порошки обрабатывали в энергонапряженной планетарной шаровой мельнице «Активатор 2SL» в течение 20 минут при частоте вращения размоль-

ных сосудов 30 Гц. Мелющими телами являлись диоксидциркониевые шары. В результате механического воздействия в приконтактных областях частиц происходила значительная пластическая деформация. Релаксация возникающих напряжений может происходить путем выделения тепла, образования новой поверхности, возникновения различных дефектов в кристаллах, инициирования твердофазных химических реакций [13–15]. По мере увеличения мощности механического импульса и времени воздействия происходил постепенный переход от релаксации путем выделения тепла к релаксации, связанной с разрушением, диспергированием и пластической деформацией материала и появлением аморфных структур различной природы. Каналом релаксации поля напряжений может быть также химическая реакция, инициируемая разными механизмами, такими как прямое возбуждение и разрыв связи, которые могут реализоваться в вершине трещины.

С целью установления активирующего влияния механической обработки на процесс консолидирования белый электрокорунд обрабатывали при различных режимах: частота вращения барабанов  $f$  – 20 и 30 Гц, время обработки  $\tau$  – 10, 20, 30 и 40 минут при каждой частоте.

Обработанные порошковые шихты просеивали через сито № 0045 в течение 10 минут на вибростенде С. 1 для получения фракции <45 мкм и пластифицировали водным раствором карбоксиметилцеллюлозы (КМЦ) из расчета: 5 мас. % КМЦ – 95 % порошка. После гранулирования и сушки пластифицированные порошки формовали с помощью одноосного прессования в стальной пресс-форме, давление прессования составляло 400 МПа. Полученные прессовки представляли собой цилиндры диаметром  $10 \pm 0,01$  мм и высотой  $5 \pm 0,01$  мм.

Спекание прессовок проводили в высокотемпературной печи сопротивления по режиму: скорость нагрева – 10 град/мин, температура и время изотермической выдержки – 1600 °C и 1 ч, охлаждение с печью. Обработанный непластифицированный плазмохимический НП  $Al_2O_3$  консолидировали методом ИПС в установке SPS-515S «Sumitomo». Режим спекания указан в табл. 3.

**Таблица 3.** Режимы искрового плазменного спекания

**Table 3.** Modes of spark plasma sintering

| Состав порошка<br>Powder composition | Давление прессования, МПа<br>Pressure, MPa | Время изотермической выдержки, мин<br>Time of isothermal holding, min | Температура спекания, °C<br>Sintering temperature, °C |
|--------------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| НП $Al_2O_3$                         | 40                                         | 5                                                                     | 1400                                                  |

Искровое плазменное спекание считается перспективным эффективным методом консолидации порошковых материалов [16–19]. По сравнению с традиционными методами консолидирования порошковых материалов, такими как печное спекание и горячее прессование (ГП), метод ИПС позво-

ляет получать высокоплотные спеченные материалы при меньшей температуре за короткий промежуток времени изотермической выдержки. Основным отличием ИПС от ГП является способ нагрева порошкового материала, осуществляемый периодическим импульсным электрическим током с энергией порядка 100 кДж, периодом 3...300 мс и частотой 50 Гц, который пропускается непосредственно через графитовую пресс-форму и размещенный в ней порошок. В этом случае на границе контакта частиц материала возникает искровой плазменный разряд, который способствует переносу вещества в искровой плазме и образованию физических межчастичных контактов, дальнейшему увеличению их площади и пластическому течению материала под воздействием внешнего давления [20].

Спеченные в условиях ИПС образцы представляли собой цилиндры диаметром  $15,0 \pm 0,1$  мм и высотой  $2,0 \pm 0,2$  мм.

Плотность спеченных образцов  $\rho$  определяли гидростатическим взвешиванием в 96%-м этиловом спирте ( $\rho_{\text{сп}} = 0,807$  г/см<sup>3</sup> при 20 °C) с погрешностью  $\pm 0,001$  г. Рассчитывали также относительную плотность образцов  $\theta$  в соответствии с выражением:

$$\theta = \frac{\rho}{\rho_t} \cdot 100 \%,$$

где  $\rho_t$  – теоретическая плотность керамики.

Образцы полировали алмазными пастами, полученные микрошлифы исследовали с помощью микроскопического комплекса «Лабомет-М». Микротвердость определяли по ГОСТ 9450–76 с помощью прибора ПМТ-3, нагрузка составляла 1000 мН (100 г), твердость HRA – по ГОСТ 9013–59 с помощью стационарного твердомера Роквелла.

### Результаты и их обсуждение

Исследование технологических характеристик порошков по указанным выше методикам показало практически полное отсутствие текучести и очень низкую насыпную плотность оксидных НП. Крупнодисперсные порошки  $Al_2O_3$  обладали удовлетворительным уровнем технологических характеристик. Данные представлены в табл. 4.

**Таблица 4.** Технологические характеристики исходных порошков

**Table 4.** Operational characteristics of initial powders

| Состав порошков<br>Powder composition              | Насыпная плотность, г/см <sup>3</sup><br>Bulk density, g/cm <sup>3</sup> | Плотность после утряски, г/см <sup>3</sup><br>Density after tumbling, g/cm <sup>3</sup> | Текущность, г/с<br>Fluidity, g/s |
|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|
| НП (NP) $Al_2O_3$                                  | 0,07                                                                     | 0,06                                                                                    | –                                |
| НП (NP) 80 % $Al_2O_3$ –19 % $ZrO_2$ –1 % $Y_2O_3$ | 0,14                                                                     | 0,14                                                                                    | –                                |
| $Al_2O_3$ (чда, chda)                              | 1,47                                                                     | 1,65                                                                                    | 0,4                              |
| $Al_2O_3$ (ГК-5, GK-5)                             | 1,50                                                                     | 1,66                                                                                    | 0,4                              |

Насыпная плотность электровзрывного НП Al равна 0,2 г/см<sup>3</sup>, текучесть отсутствовала.

Таким образом, исследование свойств плазмохимических НП Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> позволило сделать вывод о невозможности практического их использования в исходном состоянии в качестве готового технологического сырья.

В табл. 5 представлены результаты ситового анализа исходных крупнодисперсных оксидных порошков. Видно, что порошки имели сходное фракционное распределение частиц.

**Таблица 5.** Гранулометрический состав крупнодисперсных порошков Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

**Table 5.** Granulometric composition of the large dispersed Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

| Фракция частиц<br>Fraction of particles | Содержание фракции X, мас. %<br>Content of fraction X, wt. %                  |                                                                                |
|-----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
|                                         | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (чда)<br>Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (chda) | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (ГК-5)<br>Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (GK-5) |
| +025                                    | 0                                                                             | 0                                                                              |
| –025+020                                | 1,0                                                                           | 3,3                                                                            |
| –020+016                                | 6,1                                                                           | 4,2                                                                            |
| –016+0125                               | 9,6                                                                           | 10,1                                                                           |
| –0125+008                               | 15,3                                                                          | 13,8                                                                           |
| –008+0063                               | 24,0                                                                          | 23,8                                                                           |
| –0063+0045                              | 23,9                                                                          | 24,6                                                                           |
| –0045                                   | 20,1                                                                          | 19,8                                                                           |

Рентгенофазовый анализ показал, что Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в исходных НП (табл. 1) находится в аморфизированном состоянии, диоксид циркония представлен высокотемпературной тетрагональной фазой, моноклинная модификация практически отсутствовала. Основной фазой Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в порошках марок чда и ГК-5 и белом электрокорунде являлась высокотемпературная α-модификация – корунд. Ее содержание в данных порошках составляло не менее 85 %.

Для улучшения технологических характеристик плазмохимических и крупнодисперсные порошки на основе Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> обрабатывали в планетарной мельнице в течение 20 минут при частоте вращения размольных сосудов 30 Гц. Такой режим обработки оксидных порошков является оптимальным [21]. Данные приведены в табл. 6.

**Таблица 6.** Технологические характеристики обработанных порошков

**Table 6.** Operational characteristics of processed powders

| Состав порошков<br>Powder composition                                                                 | Насыпная плотность, г/см <sup>3</sup><br>Bulk density, g/cm <sup>3</sup> | Плотность после утряски, г/см <sup>3</sup><br>Density after tumbling, g/cm <sup>3</sup> | Текучесть, г/с<br>Fluidity, g/s |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|
| НП (НР) Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                                                | 0,82                                                                     | 1,23                                                                                    | 0,2                             |
| НП (НР) 80 % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> –19 % ZrO <sub>2</sub> –1 % Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,95                                                                     | 1,26                                                                                    | 0,2                             |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (чда, chda)                                                            | 1,22                                                                     | 1,47                                                                                    | 0,4                             |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (ГК-5, GK-5)                                                           | 1,36                                                                     | 1,49                                                                                    | 0,4                             |

В процессе обработки полые сферические частицы плазмохимических порошков разрушались и объединялись в жесткие агломераты. Обработка крупнодисперсных порошков Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> значительно увеличивала содержание мелкодисперсных фракций (–0063) – до 60 %.

Установлен наиболее эффективный режим обработки порошка белого электрокорунда в планетарной шаровой мельнице «Активатор 2SL»: частота вращения размольных барабанов  $f$  – 30 Гц, время обработки  $\tau$  – 40 мин. В процессе обработки по данному режиму практически полностью разрушаются крупнодисперсные частицы (+010), снижается содержание среднedisперсной (–010+008) и существенно возрастал выход мелкодисперсных фракций (–0063) – свыше 75 % (табл. 7). Насыпная плотность обработанного порошка электрокорунда составила 1,23 г/см<sup>3</sup>.

**Таблица 7.** Гранулометрический состав порошка белого электрокорунда (частота вращения размольных барабанов  $f$  составила 30 Гц)

**Table 7.** Granulometric composition of white electrocorundum powder (rotation frequency of grinding balls was 30 Hz)

| Фракция частиц<br>Fraction of particles                      | Время обработки, мин/Processing time, min |      |      |      |
|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|------|------|------|
|                                                              | 10                                        | 20   | 30   | 40   |
| Содержание фракции X, мас. %<br>Content of fraction X, wt. % |                                           |      |      |      |
| +020                                                         | 0,5                                       | 0,1  | 0    | 0    |
| –020+014                                                     | 4,4                                       | 2,5  | 2,1  | 0    |
| –014+010                                                     | 2,2                                       | 2,1  | 2,0  | 1,4  |
| –010+008                                                     | 18,5                                      | 14,4 | 9,7  | 10,1 |
| –008+0063                                                    | 8,8                                       | 13,3 | 12,6 | 13,3 |
| –0063+0045                                                   | 53,7                                      | 51,4 | 48,8 | 47,7 |
| –0045                                                        | 11,8                                      | 16,2 | 24,8 | 27,5 |

В табл. 5 не указаны данные по гранулометрическому составу белого электрокорунда, не подвергнувшегося обработке в планетарной шаровой мельнице, поскольку электрокорунд в состоянии поставки представлял собой сыпучий материал с крупностью зерен до 5 мм (грубодисперсный песок).

На рис. 1 показаны диаграммы прессования обработанных в планетарной мельнице и пластифицированных порошков, не содержащих активирующих добавок. Данные исследования проводились с целью определения оптимального давления прессования. Видно, что прессование при давлениях свыше 400 МПа не приводит приросту плотности прессовок. Прессование порошков марок ГК-5, чда и порошка электрокорунда при давлении 800 МПа приводило к появлению поперечных расщелинных трещин в прессовках, несмотря на то, что в данных порошках также содержался пластификатор (КМЦ). Таким образом, интервал оптимальных давлений прессования исследуемых порошков составляет 300...400 МПа.

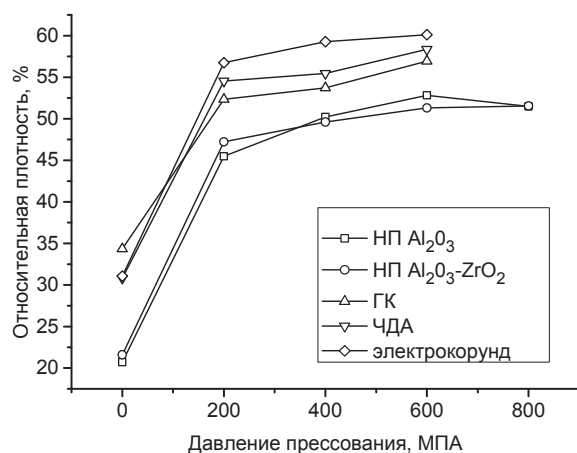


Рис. 1. Диаграммы прессования обработанных оксидных порошков (частота вращения размольных барабанов  $f = 30$  Гц, время обработки  $t = 40$  мин)

Fig. 1. Diagrams of pressing the processed oxide powders (rotation frequency of grinding balls was 30 Hz, treatment time was 40 min)

В последующих экспериментах порошок  $Al_2O_3$  марки ЧДА был исключен, поскольку свойства корундовой керамики, спеченной из данного порошка, подробно исследованы ранее авторами в работе [22].

Обработанные порошки составов 1, 2 и 4 (табл. 6) и порошок белого электрокорунда рассевали с целью получения фракции  $-0063$ , смешивали с активирующими добавками в планетарной мельнице при частоте вращения размольных барабанов  $f = 30$  Гц в течение 40 мин. Смеси пластифицировали в соответствии с описанной выше методикой. Составы полученных порошковых смесей представлены в табл. 8.

Таблица 8. Составы порошковых смесей

Table 8. Contents of a powder mixes

| Состав, мас. % / Composition, wt. % |                                                    |           |      |            |         |
|-------------------------------------|----------------------------------------------------|-----------|------|------------|---------|
| НП (NP) $Al_2O_3$                   | НП (NP) 80 % $Al_2O_3$ –19 % $ZrO_2$ –1 % $Y_2O_3$ | ГК-5 GK-5 | 25A  | НП (NP) Al | $TiO_2$ |
| 100                                 | 0                                                  | 0         | 0    | 0          | 0       |
| 95                                  | 0                                                  | 0         | 0    | 5          | 0       |
| 98,5                                | 0                                                  | 0         | 0    | 0          | 1,5     |
| 0                                   | 100                                                | 0         | 0    | 0          | 0       |
| 0                                   | 95                                                 | 0         | 0    | 5          | 0       |
| 0                                   | 0                                                  | 100       | 0    | 0          | 0       |
| 5                                   | 0                                                  | 95        | 0    | 0          | 0       |
| 10                                  | 0                                                  | 90        | 0    | 0          | 0       |
| 20                                  | 0                                                  | 80        | 0    | 0          | 0       |
| 0                                   | 0                                                  | 95        | 0    | 5          | 0       |
| 0                                   | 0                                                  | 98,5      | 0    | 0          | 1,5     |
| 0                                   | 0                                                  | 0         | 100  | 0          | 0       |
| 10                                  | 0                                                  | 0         | 90   | 0          | 0       |
| 0                                   | 0                                                  | 0         | 95   | 5          | 0       |
| 0                                   | 0                                                  | 0         | 98,5 | 0          | 1,5     |

Из подготовленных смесей получали прессовки, которые спекали по описанным выше режимам.

На рис. 2 приведены зависимости плотности и микротвердости керамики, спеченной из порошка  $Al_2O_3$  марки ГК-5, от содержания вводимых добавок НП  $Al_2O_3$ .

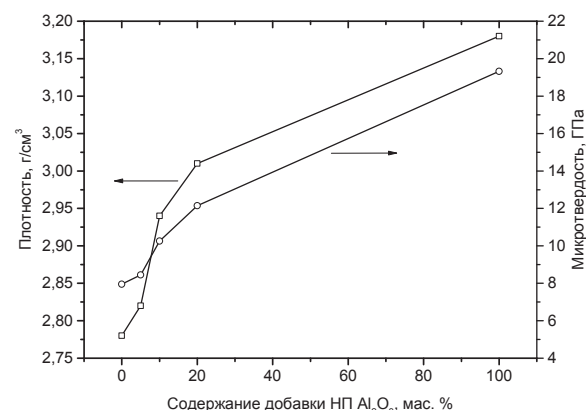


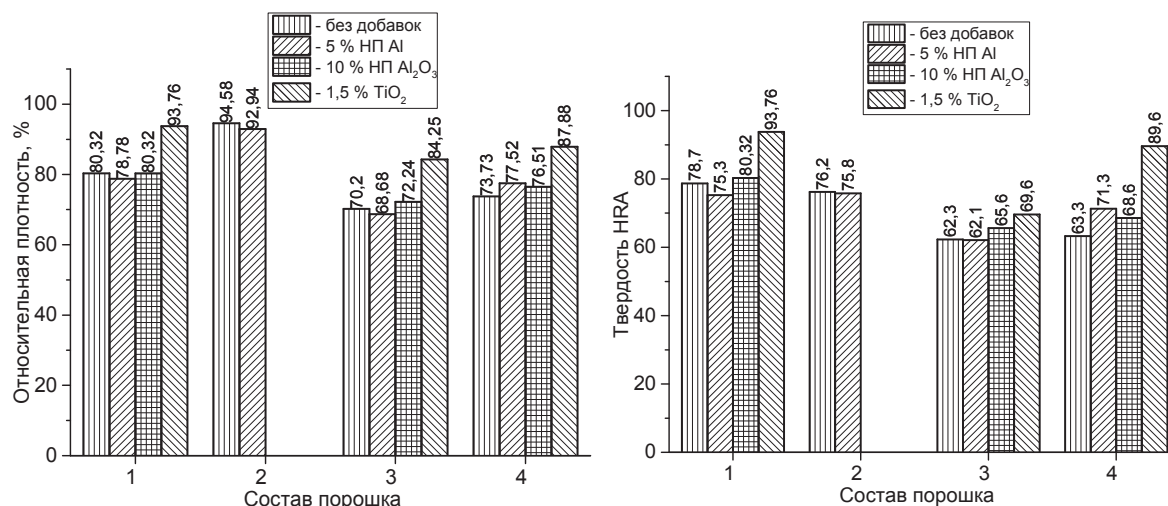
Рис. 2. Зависимости плотности и микротвердости корундовой керамики, спеченной из крупнодисперсного порошка  $Al_2O_3$  марки ГК-5, от содержания добавки НП  $Al_2O_3$

Fig. 2. Dependences a density and microhardness of corundum ceramic sintered from coarse-grained GK-5  $Al_2O_3$  powder on the structure of  $Al_2O_3$  nanopowder additive

Добавка НП  $Al_2O_3$  в порошок  $Al_2O_3$  марки ГК-5 приводила к повышению плотности и микротвердости спеченной керамики. Такое активирующее влияние объясняется увеличением площади межчастичных контактов, которое вызвано добавлением НП  $Al_2O_3$ . Механизм активирования спекания обусловлен повышенной структурной и поверхностной активностью НП  $Al_2O_3$ , которая определяется дефектностью кристаллического строения, размером и формой частиц. Наиболее существенный прирост плотности наблюдался для керамики, содержащей добавку НП  $Al_2O_3$  в количестве 5...20 мас. %.

В работе были проведены эксперименты по исследованию влияния добавки НП Al на структуру и физико-механические свойства керамики, спеченной из НП  $Al_2O_3$ . В работе [23] показано активирующее действие добавок металлических НП при спекании оксидных керамик. Практический интерес представляет вопрос о дополнительном вкладе в активирование спекания НП  $Al_2O_3$ , обусловленном добавлением НП Al. При добавлении в НП  $Al_2O_3$  нанодисперсного алюминия наблюдалось снижение плотности спеченной керамики. Это, в свою очередь, приводило к снижению твердости образцов (рис. 3). Такие зависимости объяснены повышением пористости спекаемой керамики вследствие окисления добавки НП Al до  $\alpha-Al_2O_3$  в процессе спекания. Окисление сопровождалось значительным уменьшением удельного объема введенной добавки, вызванным существенным различием плотности Al ( $2,7$  г/см<sup>3</sup>) и  $\alpha-Al_2O_3$  ( $3,96$  г/см<sup>3</sup>), что наблюдалось в ряде экспериментов.

Плотность корундовой керамики, полученной консолидированием обработанного неластифици-



**Рис. 3.** Зависимость относительной плотности и твердости керамики от содержания и химического состава добавок: 1–4 – керамика, спеченная из НП Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, НП 80 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 19 % ZrO<sub>2</sub> – 1 % Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ГК-5 и 25А, соответственно (для состава 1 – первый и третий столбцы эквивалентны, в состав 2 НП Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и порошок TiO<sub>2</sub> не добавляли)

**Fig. 3.** Dependence of relative density and hardness of ceramic on content and chemical composition of additives: 1–4 is the ceramic sintered of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> NP, 80 %, ZrO<sub>2</sub> – 19 %, Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 1 % NP; GK-5 and 25A, accordingly (for content 1 the first and the third columns are equivalent, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> NP and TiO<sub>2</sub> powder were not added into content 2)

рованного плазмохимического НП Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в условиях ИПС, составила 3,63 г/см<sup>3</sup> (92 % от теоретической плотности  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), твердость – 93 HRA.

Наибольшим активирующим эффектом оказалось введение в порошок Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> добавок нанодисперсного порошка TiO<sub>2</sub>. Плотность спеченной керамики, содержащей 1,5 % TiO<sub>2</sub>, достигала 3,48 г/см<sup>3</sup>. При спекании корунда с добавкой двуокиси титана образуется твердый раствор TiO<sub>2</sub> в  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Замещение части ионов Al<sup>3+</sup> на Ti<sup>4+</sup> вызывает появление избыточной положительной валентности. В соответствии с требованиями электростатического равновесия для компенсации избыточного положительного заряда должны возникнуть вакансии в катионной составляющей кристаллической решетки, т. е. образуется твердый раствор вычитания. Следует так же отметить, что число атомов в элементарной ячейке кристаллической решетки твердого раствора TiO<sub>2</sub> в  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> уменьшается. Это также подтверждает, что TiO<sub>2</sub> в корунде образует твердый раствор вычитания. Кристаллическая решетка твердого раствора вычитания имеет повышенную диффузионную способность и, следовательно, при нагревании активирует спекание корунда.

#### Заключение

Показано, что добавка нанопорошка Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> до 20 мас. % в крупнодисперсные порошки  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> марок ГК-5 и 25А активировала спекание корундовой керамики: повышались ее плотность и микротвердость.

Активирующее влияние добавки нанопорошка Al в крупнодисперсный порошок  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> на процесс спекания корундовой керамики не установлено. При добавлении в НП Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> нанодисперсного алюминия наблюдалось снижение плотности и твердости спеченной керамики вследствие окисления добавки НП Al до  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в процессе спекания. Это приводило к уменьшению удельного объема введенной добавки, обусловленному существенным различием плотности Al и  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. При этом оказывалось не реализованным основное преимущество добавки нанопорошка как активатора спекания – возможность образовывать большое количество межчастичных контактов при очень небольшом его содержании в спекаемой прессовке.

Установлена эффективность применения метода ИПС для получения плотной корундовой керамики из исследованных порошков.

Наибольшим активирующим эффектом оказалось введение в порошки корунда добавок нанодисперсного порошка TiO<sub>2</sub> (1,5 мас. %). При спекании образуется твердый раствор вычитания TiO<sub>2</sub> в  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, решетка которого имеет повышенную диффузионную способность и активирует процесс спекания.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства Образования и Науки Российской Федерации: проект № 11.1928.2017/4.6 (проектная часть выполнена в Томском политехническом университете в рамках Программы развития ТПУ).*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горная энциклопедия в 5 т. Т. 5 / под ред. А.Е. Козловского. – М.: Изд-во «Советская энциклопедия», 1994. – 541 с.
2. Increase in strength of porous alumina ceramic by additives of aluminum oxide nanopowder / V.I. Vereshchagin, O.A. Proskurdina, T.A. Khabas et al. // *Inorganic Materials: Applied Research*. – 2016. – V. 7. – № 1. – P. 29–33.
3. Hunold K. Hot isostatic pressing of high temperature ceramics // *Interceram*. – 1985. – V. 39. – № 2. – P. 40–43.
4. Прочная и особопрочная керамика на основе оксида алюминия и частично стабилизированного диоксида циркония / Е.С. Лукин, Н.А. Макаров и др. // *Стекло и керамика*. – 2003. – № 9. – С. 32–34.
5. On the effects of powder morphology on the post-comminution ballistic strength of ceramics / G.J. Appleby, D.C. Wood, A. Hameed et al. // *Int. J. of imp. Engineering*. – 2017. – V. 100. – P. 46–55.
6. Смирнов А.И. Конструкционная керамика // *Итоги науки и техники ВИНТИ. Сер. Порошковая металлургия*. – 1990. – № 4. – С. 64–106.
7. Ускокович Д.П., Самсонов Г.В., Ристич М.М. Активированное спекание. – Белград: Факультет электроники. НИИ и Международный институт науки о спекании, 1974. – 395 с.
8. Матренин С.В. Активированное спекание оксидной керамики из ультрадисперсных порошков: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 1995. – 24 с.
9. Свойства нанокompозитных материалов на основе оксидной керамики, полученных искро-плазменным методом / Э. Алварез, К. Гутьеррес, Р. Торресильяс и др. // *Перспективные материалы*. – 2014. – № 4 – С. 43–50.
10. Керамика из высокоогнеупорных оксидов / под ред. Д.Н. Полубояринова, Р.Я. Попильского. – М.: Металлургия, 1977. – 304 с.
11. Nazarenko O.A., Ilyin A.P., Tkikhonov D.V. Electric explosion of conductors: obtaining of metal nanopowder and non-metallic refractory compounds. – Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. – 274 p.
12. Аввакумов Е.Г. Механические методы активации химических процессов. – Новосибирск: Наука, 1988. – 306 с.
13. Механический синтез в неорганической химии / под ред. Е.Г. Аввакумова. – Новосибирск: Наука, 1991. – 55 с.
14. Mechanical Alloying / ed. by P.H. Shingu. – Switzerland: Trans. Tech. Publications, 1992. – 362 p.
15. Consolidation/synthesis of materials by electric current activated/assisted sintering / R. Orru, R. Licheri, A.M. Locci, A. Cincotti, G. Cao // *Materials Science and Engineering*. – 2009. – V. 63. – P. 127–287.
16. Spark Plasma Sintering of simulated radioisotope materials with tungsten cermets / R.C. O'Brien, R.M. Ambrosi, N.P. Bannister, S.D. Howe, H.V. Atkinson // *Journal of Nuclear Materials*. – 2009. – V. 393. – P. 108–113.
17. Densification of plasma sprayed YSZ electrolytes by spark plasma sintering (SPS) / K.A. Khor, L.G. Yu, S.H. Chan, X.J. Chen // *Journal of the European Ceramic Society*. – 2003. – V. 23. – P. 1855–1863.
18. Effect of porosity on thermal and electrical properties of polycrystalline bulk ZrN prepared by spark plasma sintering / Jun Adachi, Ken Kurosaki, Masayoshi Uno, Shinsuke Yamanaka // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2007. – V. 423. – P. 7–10.
19. Khabas T.A., Cherepanova A.I., Promakhov V.V. Study of the SHS addition effect on phase composition of cordierite ceramics // *Key Engineering Materials*. – 2016. – V. 712. – P. 200–204.
20. Матренин С.В., Белокрылова А.О., Овечкин Б.Б. Исследование влияния механической активации оксидных порошков на свойства и структуру спеченной керамики // *Известия вузов. Физика*. – 2012. – Т. 55. – № 5/2. – С. 205–208.
21. Кайгородов А.С., Паранин С.Н., Хрустов В.Р. Исследование механических свойств корундовой керамики, полученной из композиционного порошка  $Al_2O_3/Al$  // *Перспективные материалы*. – 2014. – № 2. – С. 41–47.
22. Особенности формирования нано-и микроструктур монолитных образцов  $Al_2O_3$  при обжиге без приложения и с наложением электромагнитного поля / А.П. Клишин, С.В. Руднев, В.И. Верещагин, О.С. Андриенко // *Известия вузов. Физика*. – 2015. – Т. 58. – № 6/2. – С. 106–110.
23. Mostovshchikov A.V., Ilyin A.P., Zakharova M.A. Structural and Energy State of Electroexplosive Aluminum Nanopowder // *Key Engineering Materials*. – 2016. – V. 712. – P. 261–266.

Поступила 22.10.2017 г.

## Информация об авторах

**Матренин С.В.**, кандидат технических наук, доцент отделения материаловедения в машиностроении Инженерной школы новых производственных технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Ильин А.П.**, доктор физико-математических наук, профессор отделения естественных наук Школы базовой инженерной подготовки Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Кулявцева С.В.**, аспирант ФНПЦ «Алтай».

UDK 666.762.11.539.4

## LOW TEMPERATURE SINTERING OF CORUNDUM POWDERS

Sergey V. Matrenin<sup>1</sup>,  
vm-s@mail.ru

Alexander P. Ilyin<sup>1</sup>,  
ilyin@tpu.ru

Svetlana V. Kulyavtseva<sup>2</sup>,  
kazanzeva-latyan@mail.ru

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

<sup>2</sup> FNPC «Altay»,  
1, Sotsialisticheskaya street, Biysk, 658322, Russia.

Relevance of the research is caused by the necessity of profound processing of raw mineral and perfection of technology of obtaining alumoxide ceramic.

**The main aim** of the research is to develop the activation methods of ceramic sintering based on corundum  $Al_2O_3$  by mechanic treatment of powders in a planetary mill, additions of Al,  $Al_2O_3$  nanopowder and  $TiO_2$  submicron powder in a mixture, application of spark plasma sintering method.

**The methods:** sieve analysis of a large-scale powder dispersion using the analyzer A20, x-ray phase analysis of the studied samples, hydrostatic weighting for determining a conditional density of the sintered samples, measuring microhardness of the sintered samples using microhardness tester PMT-3, measuring HRA hardness by the Rockwell hardness tester.

**The results.** Addition of  $Al_2O_3$  nanopowder in GK-5 corundum contributed to increase of sintering ceramic density and microhardness. Such activation effect is explained by the increase of interparticle contact area, which is related to  $Al_2O_3$  nanopowder addition. Sintering activation is caused by high structural activity and surface energy of  $Al_2O_3$  nanopowder, which are determined by crystal structure deficiency and particle small size. The most significant rise in density was observed for ceramic, containing 5...20 wt. % of  $Al_2O_3$  nanopowder. Additional activation of  $Al_2O_3$  nanopowder sintering when adding aluminum nanopowder: its porosity decreased, was proved by the experiment. Sintering activation by adding Al nanopowder is explained by aluminum oxidation and phase transformation (Hedvall effect).  $TiO_2$  nanopowder additive in  $Al_2O_3$  powder had the maximum activation effect: the density of sintering ceramic, containing 1,5 wt. %  $TiO_2$ , achieved 3,48 g/cm<sup>3</sup>.

#### Key words:

Activation, nanopowder, sintering, spark plasma sintering, mechanical activation, solid ceramic, low temperature sintering.

The research was financially supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation: project no. 11.1928.2017/4.6 (project part was carried out at Tomsk Polytechnic University within the TPU development program).

#### REFERENCES

1. *Gornaya entsiklopediya* [Mountain encyclopedia]. Moscow, Sovetskaya entsiklopediya Publ., 1994. V. 5, 541 p.
2. Vereshchagin V.I., Proskudina O.A., Khabas T.A. Increase in strength of porous alumina ceramic by additives of aluminum oxide nanopowder. *Inorganic Materials: Applied Research*, 2014, vol. 1, no. 1, pp. 29–33.
3. Hunold K. Hot isostatic pressing of high temperature ceramics. *Interceram*, 1985, vol. 39, no. 2, pp. 40–43.
4. Lukin E.S., Makarov N.A. Strong and extra strong aluminum oxide and partially stabilized zirconia ceramics. *Glass and Ceramics*, 2003, no. 9, pp. 32–34. In Rus.
5. Appleby G.J., Wood D.C., Hameed A. On the effects of powder morphology on the post-comminution ballistic strength of ceramics. *Int. J. of Imp. Engineering*, 2017, vol. 100, pp. 46–55.
6. Smirnov A.I. Konstruktsionnaya keramika [Structural ceramics]. *Itogi nauki i tekhniki VINITI. Poroshkovaya metallurgiya*, 1990, no. 4, pp. 64–106.
7. Uskokovich D.P., Samsonov G.V., Ristich M.M. *Aktivirovannoe spekanie* [Activated sintering]. Belgrad, IIE Publ., 1974. 395 p.
8. Matrenin S.V. *Aktivirovannoe spekanie oksidnoy keramiki iz ultradispersnykh poroshkov*. Avtoreferat Kand. nauk [Activated sintering of oxide ceramics from ultrafine powders. Cand. Diss. Abstract]. Tomsk, 1995. 24 p.
9. Alvarez E., Gutierrez K., Torresiljas P. Nanocomposite materials on oxide ceramics base sintered by spark-plasma method. *Perspektivnye materialy*, 2014, no. 4, pp. 43–50. In Rus.
10. Poluboyarinov D.N., Popil'skiy R.Ya. *Keramika iz vysokoogneyupornykh oksidov* [Refractory oxide ceramics]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1977. 304 p.
11. Nazarenko O.A., Ilyin A.P., Tikhonov D.V. *Electric explosion of conductors: obtaining of metal nanopowder and non-metallic refractory compounds*. Germany, LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. 274 p.
12. Avvakumov E.G. *Mekhanicheskie metody aktivatsii khimicheskikh protsessov* [Mechanical methods of activation of chemical processes]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1988. 306 p.
13. Avvakumov E.G. *Mekhanokhimicheskiy sintez v neorganicheskoy khimii* [Mechanochemical synthesis in inorganic chemistry]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1991. 55 p.
14. Shingu P.H. *Mechanical Alloying*. Switzerland, Trans. Tech. Publications, 1992. 362 p.
15. Orru R., Licheri R., Locci A.M., Cincotti A., Cao G. Consolidation/synthesis of materials by electric current activated/assisted sintering. *Materials Science and Engineering*, 2009, vol. 63, pp. 127–287.
16. O'Brien R.C., Ambrosi R.M., Bannister N.P., Howe S.D., Atkinson H.V. Spark Plasma Sintering of simulated radioisotope mate-

- rials within tungsten cermets. *Journal of Nuclear Materials*, 2009, vol. 393, pp. 108–113.
17. Khor K.A., Yu L.G., Chan S.H., Chen X.J. Densification of plasma sprayed YSZ electrolytes by spark plasma sintering (SPS). *Journal of the European Ceramic Society*, 2003, no. 23, pp. 1855–1863.
  18. Jun Adachi, Ken Kurosaki, Masayoshi Uno, Shinsuke Yamanaka. Effect of porosity on thermal and electrical properties of polycrystalline bulk ZrN prepared by spark plasma sintering. *Journal of Alloys and Compounds*, 2007, no. 423, pp. 7–10.
  19. Khabas T.A., Cherepanova A.I., Promakhov V.V. Study of the SHS addition effect on phase composition of cordierite ceramics. *Key Engineering Materials*, 2016, vol. 712, pp. 200–204.
  20. Matrenin S.V., Belokrylova A.O., Ovechkin B.B. Investigation of the effect of mechanical activation of oxide powders on the properties and structure of sintered ceramics. *Russian Physics Journal*, 2012, vol. 55, no. 5/2, pp. 205–208. In Rus.
  21. Kaygorodov A.C., Paragin C.N., Khrustov V.R. Investigation of mechanical properties of corundum ceramics obtained from composite  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$  powder. *Perspektivnye materialy*, 2014, no. 2, pp. 41–47.
  22. Klishin A.P., Rudnev S.V., Vereshchagin V.I., Andrienko O.S. Features of the formation of nano- and microstructures of monolithic  $\text{Al}_2\text{O}_3$  samples during firing without application and with the imposition of an electromagnetic field. *Russian Physics Journal*, 2015, vol. 58, no. 6/2, pp. 106–110.
  23. Mostovshchikov A.V., Ilyin A.P., Zakharova M.A. Structural and Energy State of Electroexplosive Aluminum Nanopowder. *Key Engineering Materials*, 2016, vol. 712, pp. 261–266.

Received: 22 October 2017.

#### Information about the authors

**Sergey V. Matrenin**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Alexander P. Ilyin**, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Svetlana V. Kulyavtseva**, postgraduate student, FNPC «Altay».

УДК 681.5

## ЗАДАЧА УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ РЕКТИФИКАЦИИ НЕФТИ И МЕТОД ЕЕ РЕШЕНИЯ

Дмитриевский Борис Сергеевич<sup>1</sup>,  
dmiboris@yandex.ru

Затонский Андрей Владимирович<sup>2</sup>,  
z xenon@narod.ru

Тугашова Лариса Геннадьевна<sup>3</sup>,  
tugashova@yandex.ru

<sup>1</sup> Тамбовский государственный технический университет,  
Россия, 392000, г. Тамбов, ул. Советская, 106.

<sup>2</sup> Березниковский филиал Пермского национального исследовательского политехнического университета,  
Россия, 618404, г. Березники, ул. Тельмана, 7.

<sup>3</sup> Альметьевский государственный нефтяной институт,  
Россия, 423450, г. Альметьевск, ул. Ленина, 2.

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью поддержания требуемого качества и увеличения выхода светлых нефтепродуктов на маломощных нефтеперерабатывающих установках в условиях переменного состава и расхода сырья. Проблемы повышения качества управления обостряются в условиях малых нефтеперерабатывающих заводов. Не имея собственной добывающей базы, малые нефтеперерабатывающие заводы вынуждены закупать нефть партиями у разных добывающих организаций, в связи с чем на переработку часто поступает сырье с разным составом. Одним из препятствий на пути создания систем управления процессами ректификации нефти является необходимость использования лабораторных данных показателей качества нефтепродуктов. Это вынуждает использовать упрощенные алгоритмы управления, способные работать на основании данных, поступающих с большой задержкой.

**Цель:** достижение максимального отбора нефтепродуктов заданного фракционного состава на атмосферной установке ректификации нефти в условиях переменного расхода и состава сырья путем совершенствования системы управления.

**Объекты:** атмосферная установка ректификации нефти малой мощности (менее 500 тыс. тонн в год).

**Методы** исследования основаны на использовании теории автоматического управления, теории тепло-массообмена, методов математического и имитационного моделирования.

**Результаты.** Поставлена задача управления процессом ректификации нефти на атмосферной установке ректификации нефти малой мощности. Определены особенности объекта управления. Выполнен выбор входных и выходных параметров объекта исследования и критерия оптимизации. Предложен метод управления с применением математических моделей процесса. Приведена структура системы управления с применением Matlab. Реализация предлагаемого метода обеспечивает увеличение отбора светлых нефтепродуктов, снижение изменчивости температур кипения светлых нефтепродуктов.

### Ключевые слова:

Ректификация нефти, управление, модель процесса, показатели качества, светлые нефтепродукты, стабилизация режимных параметров.

### Введение

Качество управления является частным показателем эффективности управления технологическим процессом. Основными показателями эффективности процесса ректификации являются: технико-экономические (прибыль, себестоимость) [1], технологические показатели (показатели качества продуктов – вязкость, плотность, температура вспышки и т. д.) [2], показатели качества регулирования динамических процессов, показатели надежности систем управления (безопасность, отказоустойчивость), энергозатраты [3], термодинамическая эффективность разделения и другие.

Важным начальным этапом исследования является определение особенностей объекта и выбор основных входных и выходных параметров. Вектор управляющих воздействий характеризует технологические, информационные и интеллектуальные потоки. Вектор состояний определяет функци-

онирование системы, которое зависит от технологических, технико-экономических или инновационных параметров [4, 5].

Степень эффективности организации процесса определяется критерием – целевой функцией или критерием оптимизации. В работах [6, 7] применен один из подходов к управлению процессом ректификации – декомпозиция глобального критерия эффективности производства на критерии оптимизации на локальном уровне. Оптимизация статических режимов процесса ректификации в отечественной литературе наиболее подробно рассмотрена в работах И.В. Анисимова, В.И. Бодрова [8]. Динамические критерии параметрически или интегрально зависят от времени. Для этих целей часто применяются программные пакеты динамического моделирования (PRO/II, Chemcad [9], Aspen HYSYS и Aspen ONE [10], UNISIM Design и другие).

Одной из актуальных проблем современной нефтеперерабатывающей промышленности является повышение качества основных видов нефтепродуктов, увеличение выхода светлых нефтепродуктов и, следовательно, экономической эффективности их производства. Решение перечисленных проблем возможно не только за счет модернизации самих нефтеперерабатывающих установок, но и путем создания высокоэффективных систем управления процессами нефтепереработки.

В настоящее время применяются различные подходы к управлению процессом ректификации: на основе типового проектного решения [11], с применением методов искусственного интеллекта [12–14], робастные системы [15], системы с компенсаторами перекрестных связей и возмущений [16–19], с *LQR*-регулятором [20] и другие.

#### Постановка задачи управления

Основным аппаратом атмосферной установки ректификации нефти малой мощности является

атмосферная колонна К-1, к вспомогательным аппаратам относятся аппарат воздушного охлаждения АВО, флегмовая емкость ФЕ, отпарная колонна К-2 (рис. 1).

Объект управления характеризуется входными и выходными параметрами (рис. 2). Все параметры можно разделить на 4 группы и представить в векторной форме:

1. Вектор управляющих воздействий  $U$ :
  - расход острого орошения  $LT$ , расход дизельного топлива  $DT$ , расход перегретого пара  $Z1$ , расход мазута  $W$ , расход бензиновой фракции  $B$ .
2. Вектор возмущающих воздействий  $V$ :
  - $F_n$  – расход сырья (нефти);
  - $PS$  – состав сырья (нефти).
3. Векторы промежуточных (режимных) параметров:
  - вектор температур на выходе атмосферной колонны  $T$  (температура верха  $TB$ , температура дизельного топлива  $TD$ , температура

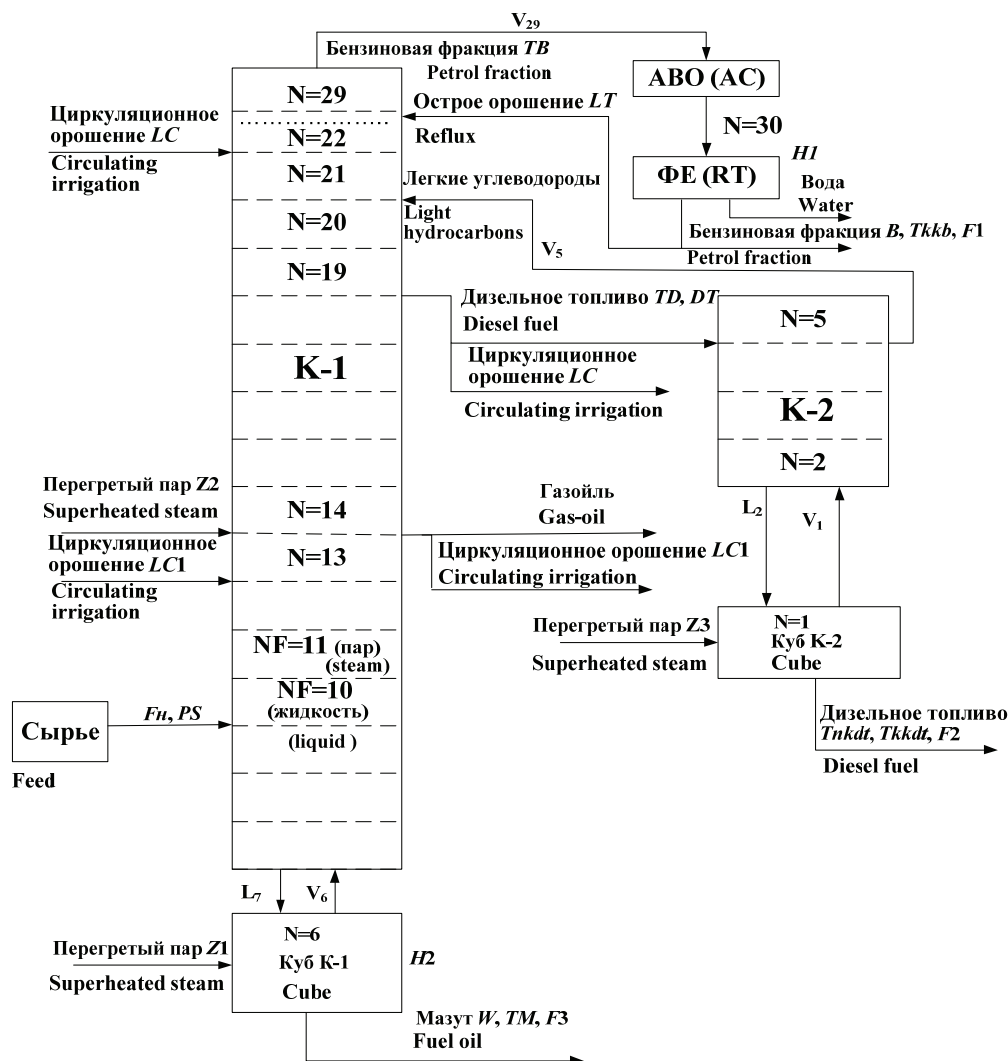


Рис. 1. Схема потоков атмосферной установки ректификации нефти

Fig. 1. Flow chart of atmospheric installation for crude oil distillation

- мазута  $TM$ ), определяющий температурный профиль;
  - вектор уровней  $H$  (уровень во флегмовой емкости  $H1$ , уровень в кубе атмосферной колонны  $H2$ );
  - расход циркуляционного орошения  $LC1$ ,  $LC2$ .
4. Векторы выходных (управляемых) параметров:
- вектор показателей качества нефтепродуктов  $Q$  (фракционный состав бензиновой фракции; фракционный состав дизельного топлива);
  - вектор отборов фракций  $F$  (отбор бензиновой фракции  $F1$ , отбор дизельного топлива  $F2$ , отбор мазута  $F3$ ).

Возмущающие воздействия – расход сырья (измеряется непрерывно), фракционный состав сырья не измеряется, фракционный состав выходных величин определяется лабораторным способом с частотой 1 раз в сутки, режимные параметры измеряются непрерывно.

Можно выделить следующие особенности объекта.

- Переменный состав и расход сырья (нефти). Нефть поступает на переработку маломощной установки из разных месторождений различными способами: железнодорожным, автомобильным транспортом, и может меняться на 10–15 % и более в течение месяца, в отличие от крупнотоннажных установок, которые подключены к магистральному трубопроводу.
- Конструктивные особенности атмосферной колонны установки ректификации нефти малой

мощности: наличие накопительной («глухой») тарелки (не имеющей перелива на нижележащую тарелку). Отбираемая с нее боковая фракция поступает на орошение нижней части атмосферной колонны. Стандартные схемы отвода тепла с промежуточным циркуляционным орошением (как в крупнотоннажной установке) не применяются. Это приводит к другим процессам тепло-массообмена и другим взаимосвязям между параметрами объекта (рис. 3). Взаимосвязи расходов промежуточных циркуляционных орошений и температур отбираемых фракций отсутствуют. Но присутствуют взаимосвязи между расходами отбираемых фракций и температурами по профилю колонны. Конструктивные особенности приводят к запаздыванию по каналам управления температурой на отборных тарелках.

Цель управления – достижение максимального отбора нефтепродуктов заданного фракционного состава в условиях переменного расхода и состава сырья.

Критерий оптимизации – отбор на нефть (или относительный отбор, %) светлых нефтепродуктов (бензиновой фракции и дизельного топлива):

$$\Phi = F1 + F2. \quad (1)$$

Выбор критерия (1) обусловлен необходимостью более полного извлечения из нефти потенциала светлых нефтяных фракций.

Задача управления атмосферной установкой ректификации нефти малой мощности (2) формулируется следующим образом: найти оптимальные решения по управлению атмосферной установкой ректификации нефти малой мощности, при кото-

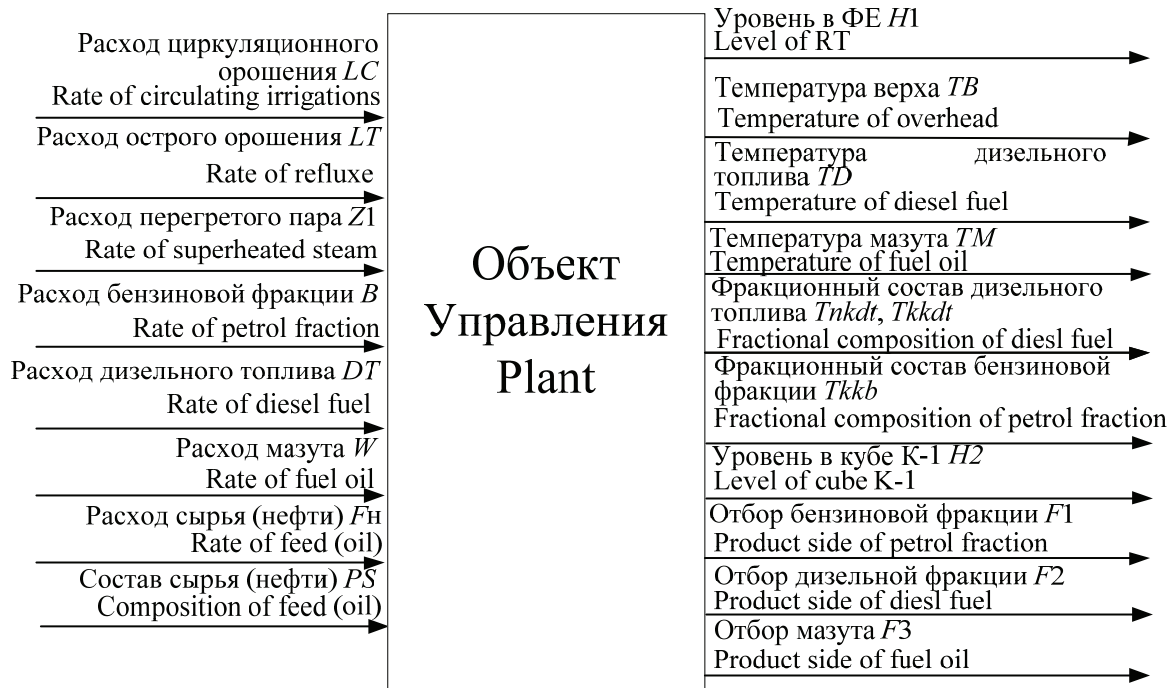


Рис. 2. Входные и выходные параметры объекта управления

Fig. 2. Input and output parameters of the control object

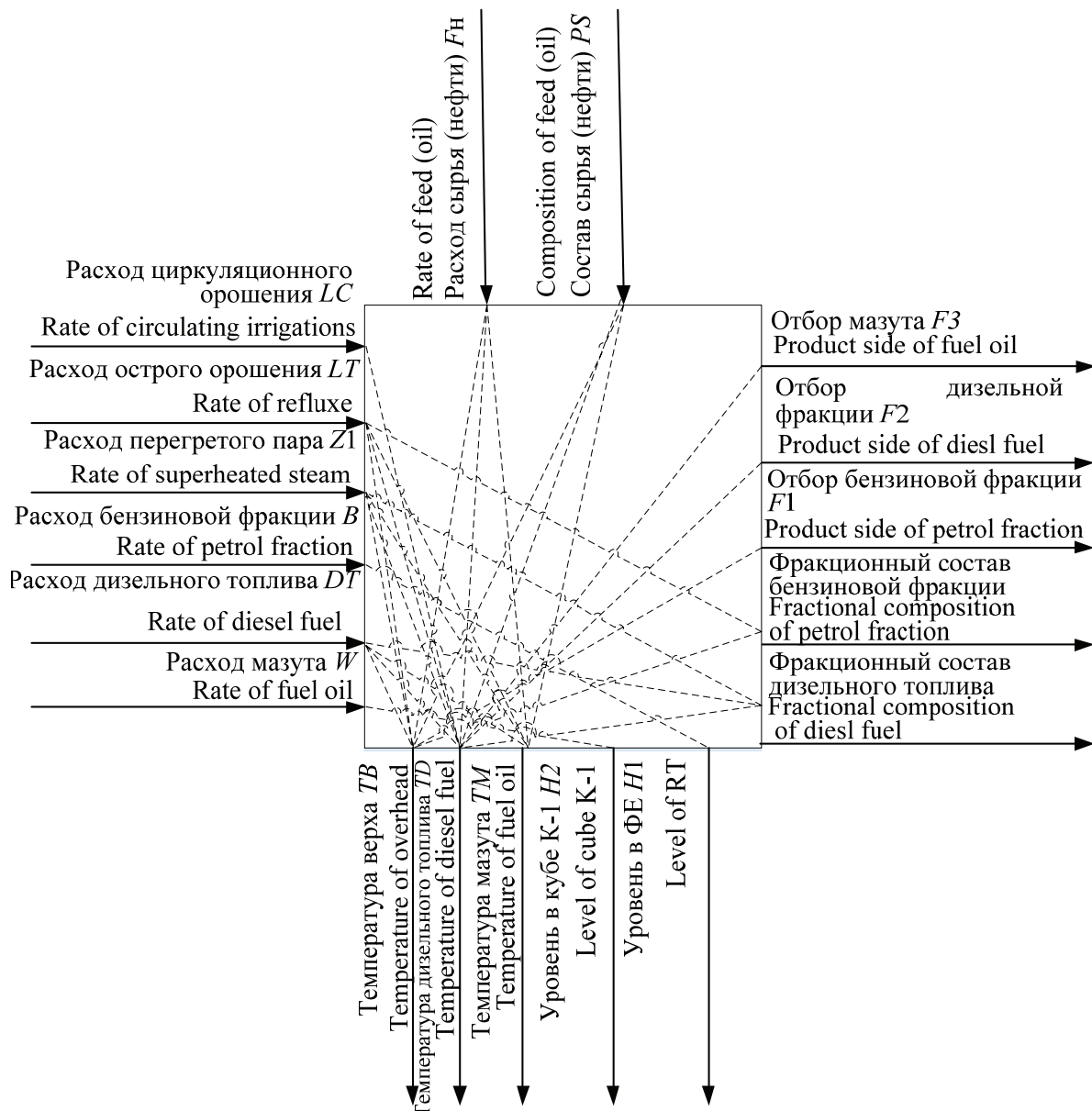


Рис. 3. Взаимосвязи параметров объекта управления

Fig. 3. Relationships of the control object parameters

рых достигается максимум отбора нефтепродуктов  $\Phi$  с учетом воздействия возмущений  $V$  и заданных ограничений на фракционный состав  $Q$ :

$$F(TB, TD, TM, F_n, PS, Tk kdt, Tn kdt, Tk kb, LT^*, DT^*, Z1^*) = \max_{\{LT, DT, Z1\} \in U} \Phi, \quad (2)$$

$$\{LT, DT, Z1\} \in U;$$

$$\{TB, TD, TM\} \in T;$$

$$\{F_i, PS\} \in V;$$

$$\{Tk kdt, Tn kdt, Tk kb\} \in Q;$$

при ограничениях:

$$162 \leq Tk kb \leq 180;$$

$$170 \leq Tn kdt \leq 200;$$

$$302 \leq Tk kdt \leq 357; \text{ (летнее)}$$

$$288 \leq Tk kdt \leq 325; \text{ (зимнее)}$$

$$(Tk kb - Tn kdt) \leq 15;$$

$$\underline{PS} \leq PS \leq \overline{PS};$$

$$\underline{F_i} \leq F_i \leq \overline{F_i};$$

$$\underline{U_i} \leq U_i \leq \overline{U_i}, \quad i = \overline{1, n};$$

$$\underline{T_l} \leq T_l \leq \overline{T_l}, \quad l = \overline{1, p};$$

$$\underline{Q_j} \leq Q_j \leq \overline{Q_j}, \quad j = \overline{1, m},$$

где  $\{LT, DT, Z1\}$  – решения по управлению;  $U$  – вектор управляющих воздействий;  $T$  – вектор температур на выходе атмосферной колонны;  $V$  – вектор возмущающих воздействий;  $Q$  – вектор фракционного состава.

Анализ существующих подходов к управлению атмосферной установкой ректификации нефти показал, что применяемые в них методы управления не обеспечивают стабилизацию показателей качества нефтепродуктов и не являются достаточно эффективными в условиях воздействия возмущений (расхода сырья, состава сырья) и взаимосвязанности параметров.

На основании выявленных недостатков сделан вывод о том, что главная причина сложившейся ситуации заключается в отсутствии оперативного контроля показателей качества светлых нефтепродуктов и системы управления, обеспечивающей компенсацию возмущений и перекрестных связей. При применении схем с компенсаторами возмущений и компенсаторами перекрестных связей для объектов с большим числом параметров затруднительна практическая реализация. Для нелинейных многомерных объектов (каким является атмосферная установка ректификации нефти) такие системы обеспечивают необходимое качество регулирования при малых возмущениях [21].

Результаты анализа показали, что усовершенствование управления процессом ректификации нефти должно заключаться в использовании системы управления:

- расчетных значений показателей качества нефтепродуктов;
- промежуточных параметров в контуре управления;
- управляющих воздействий, определенных по модели процесса, учитывающей взаимосвязанность параметров.

Сущность предлагаемого решения заключается в следующем.

Для достижения цели управления предлагается концепция управления атмосферной установкой ректификации нефти, сочетающая:

- 1) стабилизацию промежуточных параметров,
- 2) сведение задачи управления отбором нефтепродуктов заданного фракционного состава к управлению температурным режимом установки.

1. Уровень во флегмовой емкости стабилизируется изменением расхода бензиновой фракции из емкости регулятором уровня. Уровень в кубе атмосферной колонны стабилизируется изменением расхода мазута регулятором уровня. Расходы циркуляционных орошений поддерживаются постоянными.

Задача стабилизации температур на отборных тарелках заключается в поддержании температуры бензиновой фракции  $TB$ , температуры дизельного топлива  $TD$ , температуры мазута  $TM$  на выходе из атмосферной колонны на заданных значениях в случае нарушения режима из-за изменения расхода сырья. Стабилизация осуществ-

ляется путем изменения расходов верхнего орошения  $LT$ , расхода дизельного топлива  $DT$ , расхода перегретого пара  $Z1$ . Для решения задачи стабилизации температурного профиля атмосферной колонны применение компенсаторов возмущений и перекрестных связей и типовых регуляторов не обеспечивает необходимое качество регулирования. Поэтому предлагается способ управления с использованием математической модели. Для решения этой задачи необходимо разработать динамическую модель процесса ректификации и модели показателей качества нефтепродуктов.

При заданных диапазонах возмущающих воздействий (расход нефти, поступающей на атмосферную установку ректификации нефти  $F_n$ ) необходимо найти такой вектор управляющих воздействий  $U=(LT,DT,Z1)$ , при котором достигается

минимум невязки  $S = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^N (T_{ij} - T_{zij})^2$  (3) при вы-

полнении связей в форме уравнений динамической модели процесса ректификации и ограничений на температуру конца кипения бензиновой фракции, на температуру начала кипения дизельного топлива, на температуру конца кипения дизельного топлива, на наложения (пересечения) соседних фракций:

$$F \left( \begin{matrix} TB, TD, TM, F_n, PS, Tk_{kdt}, \\ Tn_{kdt}, Tk_{kb}, LT^*, DT^*, Z1^* \end{matrix} \right) = \min_{\{LT, DT, Z1\} \in U} S, \quad (3)$$

где  $m$  – число точек температурного профиля (температура сверху колонны, дизельного топлива, мазута);  $N$  – число точек процесса;  $T_{ij}$ ,  $T_{zij}$  – текущие и заданные температуры на отборных тарелках.

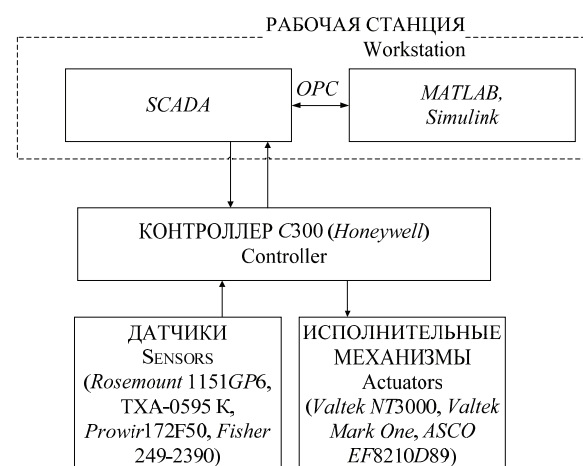


Рис. 4. Структура системы управления с участием Matlab [23]

Fig. 4. Structure of the control system involving Matlab

2. Управление температурным режимом установки производится путем воздействия на задания по температуре на отборных тарелках. В этом слу-

чае задания по температуре рассматриваются как управляющие воздействия.

В зависимости от состава нефти температуры на отборных тарелках атмосферной колонны разные. Следовательно, для решения второй задачи необходимо построить модель, позволяющую перейти от содержания фракций в нефти к температурам, которые можно контролировать непосредственно.

Необходимо определить вектор температур отбираемых нефтяных фракций в зависимости от состава нефти (потенциального содержания фракций в нефти  $PS$ ), при котором целевая функция  $\Phi$  достигает максимального значения:

$$F(TB^*, TD^*, TM^*, F_n, PS, Tk kdt, Tn kdt, Tk kb, LT, DT, Z1) = \max_{\{TB, TD, TM\} \in T} \Phi, \quad (4)$$

выполняются связи в форме уравнений модели вида  $\Phi=f(T(PS))$  и уравнения кривой истинных температур кипения (ИТК) нефти.

По ИТК нефти определяют потенциальное содержание фракций в нефти и физико-химические свойства нефтяных фракций.

Для решения второй задачи (4) необходимо построить статическую модель вида  $\Phi=f(T(PS))$ , а также модель ИТК нефти.

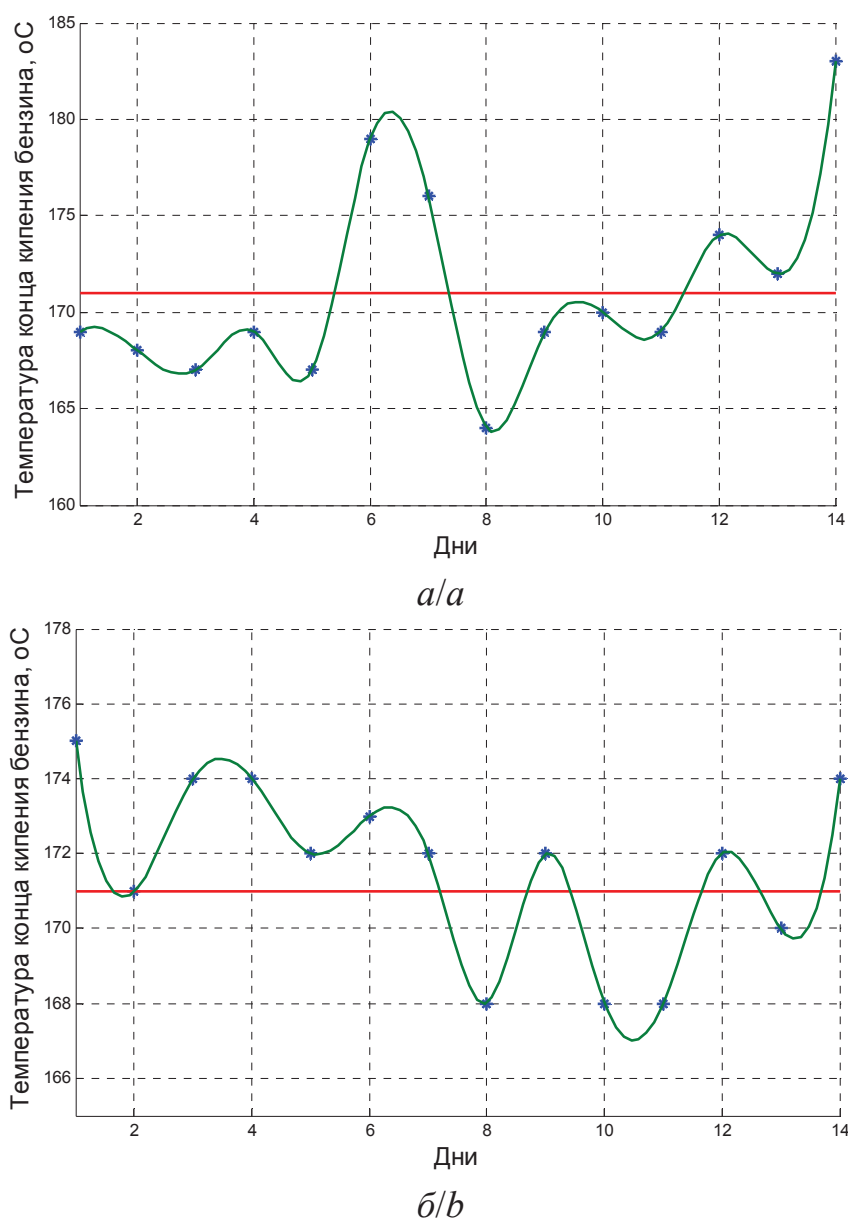


Рис. 5. Диапазоны изменения температур кипения бензиновой фракции до (а) и после (б) управления по модели

Fig. 5. Ranges of change in boiling points of gasoline fraction before (a) and after (b) control by the model

### Реализация и полученные результаты

Для решения поставленной задачи с применением пакета *Matlab* разработано программное обеспечение [22]. На рис. 4 [23] показана структура системы управления нефтеперерабатывающей установкой малой мощности с участием *Matlab*.

Модели показателей качества нефтепродуктов корректируются с поступлением новых результатов анализа из химико-аналитической лаборатории (ХАЛ) и данных контрольно-измерительных приборов, к которым есть доступ в *Excel*. Модель ИТК нефти получена с применением справочной литературы и данных ХАЛ. Кроме того, в случае воздействия возмущения в виде расхода сырья температуры на отборных тарелках поддерживаются на заданном значении. Способ управления по модели обеспечивает увеличение отбора светлых нефтепродуктов на 2,6 %, а также снижение среднего квадратического отклонения (СКО) температур конца кипения светлых нефтепродуктов.

На рис. 5 приведен пример снижения изменчивости температур конца кипения бензиновой фракции.

На рис. 5, а показаны значения изменения температуры конца кипения бензиновой фракции при управлении установкой по проектному решению, примененному в предыдущий переходный период, а на рис. 5, б – за аналогичный период времени, но при управлении по модели. При сравнении результатов видно снижение изменчивости температур конца кипения и отсутствие выхода параметра за заданные пределы. СКО по параметру уменьшилось с 5,18 до 3,37.

### Заключение

Таким образом, проведен анализ существующих подходов к управлению атмосферной установкой ректификации нефти; предложена концепция управления атмосферной установкой ректификации нефти, сочетающая стабилизацию промежуточных параметров и сведение задачи управления отбором нефтепродуктов заданного фракционного состава к управлению температурным режимом установки; поставлена и решена задача управления процессом ректификации нефти по критерию максимизации отбора на нефть светлых фракций при ограничениях на показатели качества.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Овчаров С.Н. Комплексная переработка нефтегазоконденсатных смесей на малогабаритных установках: автореф. дис. ... д-р техн. наук. – Астрахань, 2010. – 47 с.
2. Исследование моделей виртуальных анализаторов массообменного технологического процесса ректификации / Г.Б. Дигго, Н.Б. Дигго, И.С. Мохаровский, А.Ю. Торгашов // Информатика и системы управления. – 2011. – № 4. – С. 17–27.
3. Halvorsen I.J., Halvorsen I.J., Skogestad S. Minimum energy consumption in multicomponent distillation // *Industrial and Engineering Chemistry Research*. – 2003. – № 42. – P. 616–629.
4. Программно-алгоритмический комплекс защиты и управления предприятием / Б.С. Дмитриевский, В.Г. Матвейкин, В.И. Медников, С.Г. Семержинский // Программные продукты и системы. – 2017. – № 2. – С. 307–313.
5. Управление инновационным развитием наукоемкой производственной системы / В.Г. Матвейкин, Б.С. Дмитриевский, О.В. Дмитриева, В.Р. Разиева, М.В. Сивова // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2016. – № 3 (61). – С. 146–152.
6. Кузнецов В.Г., Тыщенко В.А. Контроль температур раздела и наложений смежных фракций нефти как способ сопряжения глобального и локального критериев оптимизации // Нефтепереработка и нефтехимия. – 2005. – № 1. – С. 33–37.
7. Szabó L., Németh S., Szeifert F. Three-Level Control of a Distillation Column // *Engineering*. – 2012. – № 4. – P. 675–681.
8. Анисимов И.В., Бодров В.И., Покровский В.Б. Математическое моделирование и оптимизация ректификационных установок. – М.: Химия, 1975. – 216 с.
9. Абрамов К.В. Методика определения коэффициентов ПИД-контроллера при моделировании автоматизированных систем управления ректификационной колонной с применением пакета ChemCAD // Инженерный Вестник Дона. – 2011. – № 2. – С. 259–262.
10. Dynamic modeling and simulation of crude fractionation column with three side strippers using Aspen HYSYS Dynamics: A best practice for crude distillation column dynamic modeling / N. Parthiban, N. Nagarajan, V.K. Mahendra, K.D. Senthil // *Journal of Petroleum and Gas exploration Research*. – 2013. – № 3. – P. 31–39.
11. Гайле А.А., Пекаревский Б.В. Расчет ректификационных колонн. – СПб.: СПбГИ (ТУ), 2007. – 86 с.
12. Bashah N.A.A., Othman M.R., Aziz N. Modelling of Industrial Scale Semibatch Reactive Distillation using Neural Network // *Proc. of the 6th International Conference on Process Systems Engineering (PSE ASIA)*. – Kuala Lumpur, 25–27 June 2013. – P. 974–979.
13. Using hybrid genetic and Nelder–Mead algorithm for decoupling of MIMO systems with application on two coupled distillation columns process / A.A. Lasheen, A.M. El-Garhy, E.M. Saad, S.M. Eid // *International journal of mathematics and computers in simulation*. – 2009. – Iss. 3. – V. 3. – P. 146–157.
14. Borhan M.S., Karim S. Online Multivariable Identification of a MIMO Distillation Column Using Evolving Takagi-Sugeno Fuzzy Model // *Proc. of the 26th Chinese Control Conference*. – Zhangjiajie, Hunan, China, July 26–31, 2007. – P. 328–332.
15. Стопакевич А.А. Разработка робастной системы управления колонной атмосферной перегонки нефти // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2015. – Т. 5. – № 2 (77). – С. 49–57.
16. Алгоритм управления ректификационной колонной с компенсацией возмущений, запаздывания и учетом ограничений на фазовые переменные / И.Б. Фуртат, М.Е. Бардин, Г.С. Скорикова, Р.Е. Твердый, Я.А. Чудаков // Башкирский химический журнал. – 2012. – Т. 19. – № 4. – С. 89–94.
17. Bashah N.A.A., Othman M.R., Aziz N. Modelling of Industrial Scale Semibatch Reactive Distillation using Neural Network // *Proceedings of the 6th International Conference on Process Systems Engineering (PSE ASIA)*. – Kuala Lumpur, 25–27 June, 2013. – P. 974–979.
18. Дяконича С.А., Сугачевский И.Р. Применение компенсирующего регулирования для многосвязного управления многопараметрической системой // Системы. Методы. Технологии. – 2014. – № 1 (21). – С. 86–90.
19. Giwa A., Karacan S. Decoupling control of a reactive distillation process using Tyreus-Luyben technique // *International Journal*

- of Engineering and Applied Sciences. – 2012. – V. 7. – № 10. – P. 1263–1272.
20. Maldonado J.L.B., Valarezo J.M., Peralta D.T. Multivariable Control of a Binary Distillation Column // International Journal of Engineering and Applied Sciences (IJEAS). – December 2015. – V. 2. – Iss. 12. – P. 18–23.
21. Тугашова Л.Г. Исследование возможности управления процессом ректификации нефти с применением типовых регуляторов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2016. – Т. 16. – № 3. – С. 120–131.
22. Тугашова Л.Г. Моделирование статических и динамических режимов процесса ректификации нефти / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, рег. № 2017616335 от 06.06.2017. – М.: Роспатент, 2017.
23. Затонский А.В., Тугашова Л.Г. Управление атмосферной колонной малого нефтеперерабатывающего завода с применением динамической модели // Интернет-журнал «Наукovedenie». – 2017. – Т. 9. – № 1. URL: <https://www.naukovedenie.ru/PDF/71TVN117.pdf> (дата обращения 12.11.2017).

Поступила 05.12.2017 г.

#### Информация об авторах

**Дмитриевский Б.С.**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры информационных процессов и управления Тамбовского государственного технического университета.

**Затонский А.В.**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизации технологических процессов Пермского национального исследовательского политехнического университета Березниковского филиала.

**Тугашова Л.Г.**, старший преподаватель кафедры автоматизации и информационных технологий Альметьевского государственного нефтяного института.

UDC 681.5

## TASK OF CONTROLLING OIL RECTIFICATION AND THE METHOD OF ITS SOLUTION

**Boris S. Dmitrievsky<sup>1</sup>,**  
dmiboris@yandex.ru

**Andrei V. Zatonskiy<sup>2</sup>,**  
z xenon@narod.ru

**Larisa G. Tugashova<sup>3</sup>,**  
tugashova@yandex.ru

<sup>1</sup> Tambov State Technical University,  
106, Sovetskaya street, Tambov, 392000, Russia.

<sup>2</sup> Perm National Polytechnic Research University Berezniki Branch,  
7, Telman street, Berezniki, 618404, Russia.

<sup>3</sup> Almeteyevsk State Oil Institute,  
2, Lenin street, Almeteyevsk, 423450, Russia.

**The relevance** of the research is caused by the need to maintain the required quality and increase light oil products output at low-power oil refineries under conditions of variable composition and consumption of raw materials. The problems of improving management quality become more serious in the conditions of small oil refineries. They have not their own production base and they have to purchase a lot of oil from various oil production organizations. Therefore, raw materials with different composition often come for processing. One of the difficulties in developing oil distillation control system is the necessity to use laboratory data of petroleum products quality indicators. This force to use the simplified control algorithms that can operate on the basis of the data received with the big delay.

**The aim** of the research is to achieve maximum output of light petroleum products in the atmospheric distillation cube in conditions of variable flow rate and composition of raw materials improving the control system.

**Research objects:** atmospheric distillation unit for low-capacity oil (less than 500 thousand tons per year).

**Methods** of the research are based on automatic control theory, heat and mass transfer theory, mathematical modeling and simulation.

**Research.** The authors have stated the task of managing the low productivity atmospheric rectification unit and determined some features of the control object. Input and output parameters as well as the optimization criterion were choose. The paper introduces the method of managing using the mathematical model. The structure of management system using Matlab is given. The method provides a growth in extraction of light oil products by decreasing a variability of oil fractions boiling temperatures.

**Key words:**

Oil rectification, control, process model, quality indicators, light oils, stabilization of mode parameters.

**REFERENCES**

1. Ovcharov S.N. *Kompleksnaya pererabotka neftegazokondensatnykh smesey na malogabaritnykh ustanovkakh*. Avtoreferat Kand. nauk [Complex processing of oil and gas condensate mixtures at small-sized plants. Cand. Diss. Abstract]. Astrakhan, 2010. 47 p.
2. Digo G.B., Digo N.B., Mozharovsky I.S., Torgashov A.Yu. Research of virtual analyzer models for mass exchange technology processes of rectification. *Computer science and control systems*, 2011, no. 4, pp. 17–27. In Rus.
3. Halvorsen I.J., Halvorsen I.J., Skogestad S. Minimum energy consumption in multicomponent distillation. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2003, no. 42, pp. 616–629.
4. Dmitrievsky B.S., Matveykin V.G., Mednikov V.I., Semerzhinsky S.G. Software and analytical complex for protection and management of enterprise. *Software products and systems*, 2017, no. 2, pp. 307–313. In Rus.
5. Matveykin V.G., Dmitrievsky B.S., Dmitrieva O.V., Raziya V.R., Sivova M.V. Management of innovations and development of scientific enterprise system. *Questions of modern science and practice. University them. V. I. Vernadsky*, 2016, no. 3 (61), pp. 146–152. In Rus.
6. Kuznetsov V.G., Tyshchenko V.A. Method of global and local criteria combination by oil fractions separation temperature and overlapping control. *Refining and petrochemicals*, 2005, no. 1, pp. 33–37. In Rus.
7. Szabó L., Németh S., Szeifert F. Three-Level Control of a Distillation Column. *Engineering*, 2012, no. 4, pp. 675–681.
8. Anisimov I.V., Bodrov V.I., Pokrovsky V.B. *Matematicheskoe modelirovanie i optimizatsiya rektifikatsionnykh ustanovok* [Mathematical modeling and optimization of oil refinery devices]. Moscow, Khimiya Publ., 1975. 216 p.
9. Abramov K.V. Using ChemiCAD software for PID-controller tuning in oil refinery control system's modeling. *Engineering Bulletin of Don*, 2011, no. 2, pp. 259–262. In Rus.
10. Parthiban N., Nagarajan N., Mahendra V.K., Senthil K.D. Dynamic modeling and simulation of crude fractionation column with three side strippers using Aspen HYSYS Dynamics: A best practice for crude distillation column dynamic modeling. *Journal of Petroleum and Gas exploration Research*, 2013, no. 3, pp. 31–39.
11. Gayle A.A., Pekarevsky B.V. *Raschet rektifikatsionnykh kolonn* [Refinery column calculation]. St-Petersburg, SPbGTI (TU) Publ., 2007. 86 p.
12. Bashah N.A.A., Othman M.R., Aziz N. Modelling of Industrial Scale Semibatch Reactive Distillation using Neural Network Proceedings of the 6th International Conference on Process Systems Engineering (PSE ASIA). Kuala Lumpur, 2013. pp. 974–979.
13. Lasheen A.A., El-Garhy A.M., Saad E.M., Eid S.M. Using hybrid genetic and Nelder-Mead algorithm for decoupling of MIMO systems with application on two coupled distillation columns process. *International journal of mathematics and computers in simulation*, 2009, vol. 3, pp. 146–157.

14. Borhan M.S., Karim S. Online Multivariable Identification of a MIMO Distillation Column Using Evolving Takagi-Sugeno Fuzzy Model. *Proceedings of the 26<sup>th</sup> Chinese Control Conference*, 2007. pp. 328–332.
15. Stopakevich A.A. Design of robustness control system for atmosphere oil refinery column. *Eastern European journal of advanced technologies*, 2015, vol. 5, no. 2 (77), pp. 49–57. In Rus.
16. Furtat I.B., Bardin M.E., Skorikova G.S., Tverdy R.E., Chudakov Ya.A. Algorithm of oil refinery column control with disturbances and delays compensation and with limitations of phase variables. *Bashkir chemical journal*, 2012, vol. 19, no. 4, pp. 89–94. In Rus.
17. Bashah N.A.A., Othman M.R., Aziz N. Modelling of Industrial Scale Semibatch Reactive Distillation using Neural Network *Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Conference on Process Systems Engineering (PSE ASIA)*. Kuala Lumpur, 2013. pp. 974–979.
18. Dyakonitsa S.A., Sugachevsky I.R. Using computer based control for multilinked and multiparameters systems. *Systems. Methods. Technologies*, 2014, no. 1 (21), pp. 86–90. In Rus.
19. Giwa A., Karacan S. Decoupling control of a reactive distillation process using Tyreus-Luyben technique. *International Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2012, vol. 7, no. 10, pp. 1263–1272.
20. Maldonado J.L.B., Valarezo J.M., Peralta D.T. Multivariable Control of a Binary Distillation Column. *International Journal of Engineering and Applied Sciences (IJEAS)*, December 2015, vol. 2, Iss. 12, pp. 18–23.
21. Tugashova L.G. Investigation of possibilities of oil refinery control by typical controllers. *Bulletin of SUSU. Series «Computer technologies, automatic control, radio electronics»*, 2016, vol. 16, no. 3, pp. 120–131. In Rus.
22. Tugashova L.G. *Modelirovanie staticheskikh i dinamicheskikh rezhimov protsessa rektifikatsii nefti* [Modeling static and dynamic modes of oil rectification]. The certificate on the state registration of the computer program, no. 2017616335, 2017.
23. Zatonsky A.V., Tugashova L.G. Management of atmospheric column of small oil refinery with application of dynamic model. *Internet journal «Science studies»*, 2017, vol. 9, no. 1. In Rus. Available at: <https://www.naukovedenie.ru/PDF/71TVN117.pdf> (accessed 12 November 2017).

Received: 5 December 2017.

#### Information about the authors

**Boris S. Dmitrievsky**, Dr. Sc., professor, Tambov State Technical University.

**Andrei V. Zatonskiy**, Dr. Sc., head of department, Perm National Polytechnic Research University Berezniki Branch.

**Larisa G. Tugashova**, senior lecturer, Almeteyevsk State Oil Institute.

УДК 621.311

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЕМ ГЕНЕРИРУЮЩЕЙ КОМПАНИИ В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ

**Секретарев Юрий Анатольевич<sup>1</sup>,**

sekretarevua@mail.ru

**Мятаж Татьяна Владимировна<sup>1</sup>,**

tatianachekalina@ngs.ru

**Мошкин Борис Николаевич<sup>1</sup>,**

moshkin@eco.power.nstu.ru

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

Актуальность работы обусловлена реформированием электроэнергетической отрасли, которое подразумевает поэтапный переход к конкурентной модели рынка, когда каждый производитель будет заинтересован в максимизации собственной прибыли и будет самостоятельно определять объемы производства электрической и тепловой энергии.

**Цель работы:** создание математической модели оптимальной загрузки генерирующей компании по электрической мощности.

**Методы исследования.** Основу методологии работы составляет системный подход с его структурными и функциональными моделями объектов. Широко используются методы и математические модели теории оптимизации, экономические принципы управления, теория выбора и принятия решений, а также теория информатики. Предложена методика оценки оптимальных режимов тепловых электрических станций, входящих в ее состав, основанная на принципе максимизации прибыли, т. е. равенстве предельных доходов и предельных издержек. На основе разработанного критерия рассматриваются следующие задачи: построение характеристик относительного прироста расхода топлива на ТЭЦ для производства электрической и тепловой энергии, оптимальное распределение электрической энергии тепловых электростанций; распределение тепловой энергии между агрегатами станции с учетом вынужденного теплофикационного режима работы станций; нахождение оптимальных режимов работы станций для комбинированного способа производства электрической и тепловой энергии; назначение оптимальных режимов работы генерирующей компании. На примере Новосибирских ТЭЦ выделены основные факторы, влияющие на оптимальный режим работы станции, а именно: состав работающего оборудования, себестоимость вырабатываемой электрической энергии и энергетические характеристики оборудования.

**Результаты.** Разработана методика оптимизации ТЭЦ по электрической и тепловой энергии, а также предложен новый критерий максимизации прибыли для управления функционированием генерирующей компанией.

### **Ключевые слова:**

Математическая модель, оптимизация режимов работы ТЭЦ, характеристика относительных приростов расхода топлива, генерирующая компания, критерий максимизации прибыли.

### **Введение**

Актуальность проблемы энергосбережения, экологичности, экономичности и обеспечения рациональной работы теплоэнергетических систем городов, а также их надежность на протяжении всего срока эксплуатации диктуется приоритетными направлениями развития России и мирового сообщества в целом. В разработанных в последнее время документах в энергетической сфере – «Целевом видении стратегии развития электроэнергетики России на период до 2030 года», скорректированной Генеральной схеме размещения объектов электроэнергетики до 2030 г., Энергетической стратегии на период до 2030 г. – в качестве одного из основных направлений развития энергетики страны рассматривалось более широкое использование угольных ТЭС, доля электрогенерации которых должна была возрасти с 17,5 (2010 г.) до 23 % в наиболее вероятном варианте и до 25 % в максимальном. Этот рост предопределяет новые технологии угольных ТЭС, используемые во многих странах мира. Как отмечается Институтом мировых ресурсов, в 59 странах предложено к строи-

тельству 1199 угольных электростанций суммарной мощностью более 1400 ГВт, среди которых 77 % мощности приходится на Китай и Индию.

Поскольку города и основная масса промышленных предприятий получают электрическую и тепловую энергию от ТЭЦ, то решение поставленной в данном проекте задачи энергосбережения состоит в разработке и внедрении критериев и методик, позволяющих существенно сократить энергетические затраты и оптимизировать режимы работы генерирующих компаний (ГК) и тепловых электрических станций (ТЭЦ, как ранее существовавших, так и нового поколения). Перспектива научных направлений в энергетическом секторе экономики РК на сегодняшний день зависит от реального применения результатов научных исследований и апробации на практике. В этой связи следует заметить, что одним из актуальных направлений в энергетике является применение высокотехнологичных, низкоэнергоемких, энергосберегающих методик оптимизации режимов работы ГК и ТЭЦ с высоким экономическим эффектом. В условиях, когда энергетика была государственной отраслью

управления, функционирование заключалось в выполнении следующих требований: при заданном объеме и графике поставки электрической и тепловой энергии потребителям, соблюдении условий надежности энергетической системы и соблюдении системных ограничений определить оптимальный режим, удовлетворяющий заданному экономическому критерию, под которым понималась минимизация эксплуатационных затрат [1].

В настоящее время разработана и реализуется стратегия реформирования электроэнергетической отрасли, которая подразумевает поэтапный переход к конкурентному рынку, где каждый хозяйствующий субъект самостоятельно будет определять объемы производства электрической и тепловой энергии и режимы функционирования энергетического объекта.

Среди характерных недостатков существующего принципа управления функционированием генерирующей компании можно выделить следующие: несоответствие цели управления применительно к современным условиям, когда каждый хозяйствующий субъект будет заинтересован в увеличении собственной прибыли, неэффективность прежнего критерия управления, ориентированного на задание более высокими управляющими структурами объемов выработки электрической и тепловой энергии [2, 3]. Поэтому прежние критерии и методы управления стали неадекватными целям управления.

Наличие этих недостатков обуславливает необходимость выработки иного принципа и методов управления функционированием энергетического объекта.

Возникает потребность в определении принципов и методов управления функционированием энергетических объектов, приемлемых в новых экономических условиях. Трудом нескольких поколений ученых были созданы и успешно претворены в практику уникальные методики управления энергетическим производством, которые обеспечивали его высокую надежность и экономическую эффективность. Они, безусловно, должны лечь в основу предлагаемых в работе подходов, стать ее интеллектуальной средой и в сочетании с экономическими рычагами создать предпосылки для возникновения конкурентных отношений, повышающих экономическую эффективность энергетического производства.

Решением данной проблемы является разработка принципиально нового критерия управления режимами работы ГК и ТЭЦ, а также создание комплексной методики разнесения топливных затрат между видами производимой энергии (электрической и тепловой), что позволит ГК и ТЭЦ занять конкурентоспособную позицию на рынке электроэнергии и тепла.

#### Математическая модель управления функционированием генерирующей компании

Для решения оптимизационных задач необходимо решить вопрос построения математической

модели. Моделирование можно определить как метод опосредованного познания, при котором изучаемый объект (оригинал) находится в некотором соотношении с другим объектом (моделью), и объект-модель способен в том или ином отношении замещать оригинал на некоторых стадиях познавательного процесса [4].

Изобразим объект управления в виде черного ящика (рис. 1). Параметры режима разделим на несколько категорий. Будем различать входные и выходные параметры. Кроме того, разделим параметры (входные и выходные) на управляемые (индекс «у») и неуправляемые (индекс «ну»). К последним относятся те параметры, которыми мы или не можем управлять (погода, нагрузка энергосистемы), или не хотим управлять, переводя их в неуправляемые, например, малочувствительные параметры, слабо влияющие на целевую функцию. Параметры процессов, кроме того, могут быть измеримыми (индекс «из») или неизмеримыми (индекс «ни»).

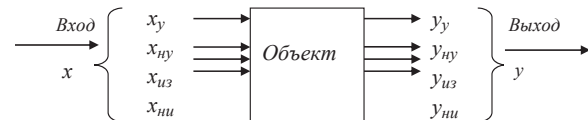


Рис. 1. Параметры системы

Fig. 1. System parameters

Построим математическую модель оптимального распределения электрической мощности между станциями или агрегата. Будем считать, что система имеет  $i=1,2,...,n$  тепловых электростанций, для которых известны расходные характеристики  $B_i(P_{Ti})$  и суммарная нагрузка  $P_n$ . Для этого случая:

1. Уравнение цели

$$B = B_1(P_{T1}) + B_2(P_{T2}) + \dots + B_n(P_{Tn}) \Rightarrow \min. \quad (1)$$

2. Уравнение связи  $B_i(P_{Ti})$ .

3. Ограничения – балансовые уравнения мощности

$$\sum_i P_{Ti} - P_i - \pi = 0, \quad (2)$$

где  $\pi$  – суммарные потери активной мощности.

4. Для вывода уравнения оптимизации воспользуемся методом Лагранжа. Применение метода неопределенных множителей Лагранжа дает возможность свести задачу к решению системы алгебраических уравнений.

В некоторых случаях при аналитическом решении задачи используются приемы линеаризации или иной идеализации нелинейных зависимостей.

$$\Phi = (B_1 + B_2 + \dots + B_n) + \lambda(\sum_i P_{Ti} - P_i - \pi) = 0, \quad (3)$$

где  $\lambda$  – постоянный множитель Лагранжа.

Необходимо отметить, что такая система уравнений составляется для каждого часа суток, т. е. всего получается 24 системы.

Анализ современных методов математического программирования (линейного и нелинейного, ди-

намического, теории оптимальных процессов) и общий вид построенной модели показывает, что единственно приемлемым и возможным путем решения данной задачи является применение методов нелинейного программирования, а именно метода Лагранжа.

Рассмотрим основные положения этого метода применительно к поставленной задаче.

Так как выражение во вторых скобках (2) в выражении (3) равно нулю, то минимумы функции Лагранжа и целевой функции (1) совпадают.

Дифференцируем функцию Лагранжа по переменным  $P_{T1}, \dots, P_{Tn}$  и приравняем производные нулю. При этом необходимо учесть, что когда мы будем брать частные производные от функции Лагранжа по нагрузке  $i$ -й станции, частная производная расхода топлива  $i$ -й станции только по ее на-

грузке  $P_{Ti}$  равна  $b_i = \frac{dB_i}{dP_{Ti}}$ , а по нагрузкам всех

остальных станций равна нулю. Тогда получим:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \Phi}{\partial P_{T1}} &= \frac{\partial B_1}{\partial P_{T1}} + \lambda \left( 1 - \frac{\partial \pi}{\partial P_{T1}} \right) = 0; \\ &\dots\dots\dots \\ \frac{\partial \Phi}{\partial P_{Tn}} &= \frac{\partial B_n}{\partial P_{Tn}} + \lambda \left( 1 - \frac{\partial \pi}{\partial P_{Tn}} \right) = 0. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Число уравнений системы соответствует числу тепловых электрических станций. Из (4) определяем, что

$$\frac{\frac{\partial B_1}{\partial P_{T1}}}{1 - \frac{\partial \pi}{\partial P_{T1}}} = \dots = \frac{\frac{\partial B_n}{\partial P_{Tn}}}{1 - \frac{\partial \pi}{\partial P_{Tn}}}. \quad (5)$$

Введем  $d$  (5) обозначения:  $b_i = \frac{dB_i}{dP_{Ti}}$  – относи-

тельный прирост расхода топлива электростанций, который показывает, как изменится расход топлива  $i$ -й станции, если ее нагрузка изменится на вели-

чину  $\sigma_i = \frac{\partial \pi}{\partial P_{Ti}}$  – относительный прирост потерь ак-

тивной мощности в сетях, т. е. величина, показывающая, насколько изменятся потери в сетях, если мощность только  $i$ -й станции изменится на  $\partial P_{Ti}$ .

Применяя эти обозначения, получаем условия оптимального распределения нагрузки:

$$\frac{b_i}{1 - \sigma_i} = idem. \quad (6)$$

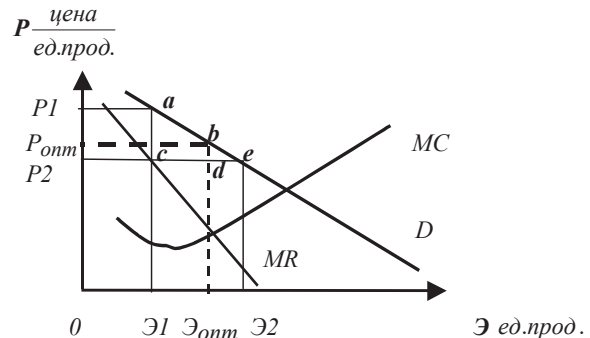
Если предположить, что потери активной мощности в выражении (6) равны нулю (пренебречь ими), то получим следующее выражение:

$$b_1 = b_2 = \dots = b_n. \quad (7)$$

В настоящей работе предложено использовать экономический критерий максимизации прибыли для оптимального управления нагрузкой тепло-

вых станций в современных условиях, а также разработана стратегия управлением генерирующей компаний [5, 6].

Согласно критерию максимизации прибыли, производитель будет максимизировать прибыль, производя продукцию в той точке, где предельный доход равен предельным издержкам. Этот руководящий принцип максимизации прибыли называется правилом равенства предельных издержек предельным доходам. Графическая иллюстрация данного условия представлена на рис. 2.



**Рис. 2.** Определение оптимального объема выпуска продукции: здесь  $D$  – спрос на производимую энергию за определенный временной период;  $\mathcal{E}_{\text{опт}}$  – оптимальная величина выработки за период;  $P_{\text{опт}}$  – цена продажи, соответствующая оптимальному объему производства

**Fig. 2.** Determination of optimal production output:  $D$  is the energy demand for a specified time interval;  $\mathcal{E}_{\text{опт}}$  is the optimal output for a specified time interval;  $P_{\text{опт}}$  is the optimal price at the optimal production output

Предельный доход (MR – marginal revenue) от продажи определяется дифференциальной кривой спроса на энергетическую продукцию, а предельные издержки (MC – marginal cost) – дифференциальной составляющей затрат на производство энергии, которую для тепловых электростанций можно представить как характеристику относительных приростов топливных издержек (7). Все эти величины имеют одинаковую размерность (цена/ед. прод.), следовательно, могут быть сопоставимы при расчетах [6].

Оптимальный объем производства энергии ( $\mathcal{E}_{\text{опт}}$ ) позволяет энергетическому предприятию максимизировать свою прибыль. Предположим, что производится меньшее по сравнению с оптимальным количество продукции  $\mathcal{E}1$ , но по более высокой цене  $P1$ . В этом случае предельный доход производителя превышает предельные издержки, и повышая объем производства до  $\mathcal{E}_{\text{опт}}$ , при котором дополнительная прибыль, получаемая от выпуска еще одной единицы продукции равна нулю, он увеличил бы совокупную прибыль на величину, равную площади абс.

Большой относительно оптимального объем производства  $\mathcal{E}2$  также не максимизирует прибыль, т. к. предельные издержки превышают предельный доход. Увеличение прибыли за счет сокращения объема производства до значения  $\mathcal{E}_{\text{опт}}$

вместо  $\Xi_2$  соответствует величине, равной площади bde.

В современных условиях каждый хозяйствующий субъект заинтересован в увеличении собственной прибыли, поэтому предложенный способ позволяет определять объемы производства продукции на станции согласно современным условиям функционирования отечественной энергетики.

На основании разработанного критерия в статье решаются следующие задачи:

1. Оптимальное распределение электрической энергии тепловых электростанций при заданных значениях тарифа на электроэнергию.
2. Распределение тепловой энергии между агрегатами станции с учетом вынужденного теплофикационного режима работы станций.
3. Нахождение оптимальных режимов работы станций для комбинированного способа производства электрической и тепловой энергии.
4. Назначение оптимальных режимов работы генерирующей компании.
5. Обоснование тарифных ставок на отпускаемую продукцию в зависимости от оптимальных объемов производства на тепловых электростанциях, входящих в состав генерирующей компании.

Сформулированные задачи и этапы их реализации могут быть представлены на рис. 3.

Поскольку основной режим работы тепловых электростанций теплофикационный, то управление их функционированием должно осуществляться с учетом вынужденного графика по отпуску тепловой энергии [7]. Поэтому в работе исследуется вопрос о возможности применения подхода к оптимальному распределению электроэнергии между агрегатами станции для определения оптимальных режимов по производству обоих видов энергии с учетом «жестких ограничений», накладываемых вынужденным режимом работы ТЭЦ.

#### **Оптимальное распределение электрической и тепловой энергии на станциях на основе критерия максимизации прибыли**

Наивыгоднейшее распределение электрической и тепловой энергии на станциях в соответствии с проведенным критическим анализом существующих способов осуществляется на основе разработанного критерия максимизации прибыли, графическая иллюстрация которого приведена на рис. 2. При этом учитываются различные виды ограничений, в частности вынужденный режим работы станции по теплофикационному циклу [8, 9].

Задача по оптимизации режимов работы тепловой электрической станции решается в несколько этапов. На первом определяется оптимальная нагрузка станции по электрической мощности с учетом вынужденного режима ее работы по выработке тепловой энергии. Затем осуществляется назначение оптимальных режимов работы станции по тепловой энергии. На заключительном этапе произ-

водится проверка соответствия этих режимов работы и их взаимная увязка.

Остановимся более подробно на решении этих вопросов.

Для определения оптимальной электрической мощности станции должны быть принципиально решены следующие задачи:

- построение характеристик относительного прироста (ХОП) расхода топлива станции для заданных составов работающего оборудования по сезонам года;
- получение на их основе зависимостей предельных издержек станции для каждого из сезонов;
- определение характеристик предельных доходов станции на основе кривых спроса по сезонам года;
- нахождение оптимальных электрических мощностей и соответствующих им значений заявленной цены.

Для получения зависимостей предельных издержек станции в работе были использованы характеристики относительных приростов расхода топлива с учетом среднесезонных цен на закупаемое топливо.

Характеристики предельных доходов строят на основе кривых спроса на электрическую энергию следующим образом:

$$\frac{\Delta TR}{\Delta \Xi_{\text{ош}}} = MR = p + \Xi_{\text{ош}} \frac{\Delta p}{\Delta \Xi_{\text{ош}}}, \quad (8)$$

где  $\frac{\Delta p}{\Delta \Xi_{\text{ош}}}$  – наклон кривой спроса, т. е. предель-

ный доход представляет производную спроса на электроэнергию;  $\Delta TR$  – прирост общего дохода от производства электроэнергии;  $\Delta p$  – изменение цены на электроэнергию;  $\Delta \Xi_{\text{ош}}$  – изменение выработки электроэнергии.

Для станции, в качестве характеристики спроса, можно принять характеристику себестоимости производства электрической энергии, которая может быть скорректирована на величину нормы прибыли. Реальная кривая спроса является кусочной в силу переменного характера энергопотребления. Однако на практике используют аппроксимацию этих зависимостей, подбирая для этого соответствующие полиномы. Аппроксимированные зависимости себестоимости и спроса на электроэнергию показаны на рис. 4.

Поскольку энергопотребление имеет выраженный сезонный характер, целесообразно рассматривать три кривые спроса: зона I (рис. 4) соответствует летнему потреблению; зона II (рис. 4) – переходному периоду (весна-осень) и, наконец, зона III (рис. 4) – потреблению зимнего периода. Каждая кривая может быть аппроксимирована соответствующими полиномами [10, 11].

Совместно решая систему уравнений, описывающих кривые предельных издержек и предельных доходов (8), можно определить оптимальные значения среднемесячной выработки (Эопт) для каждого сезона и среднесуточные мощности:

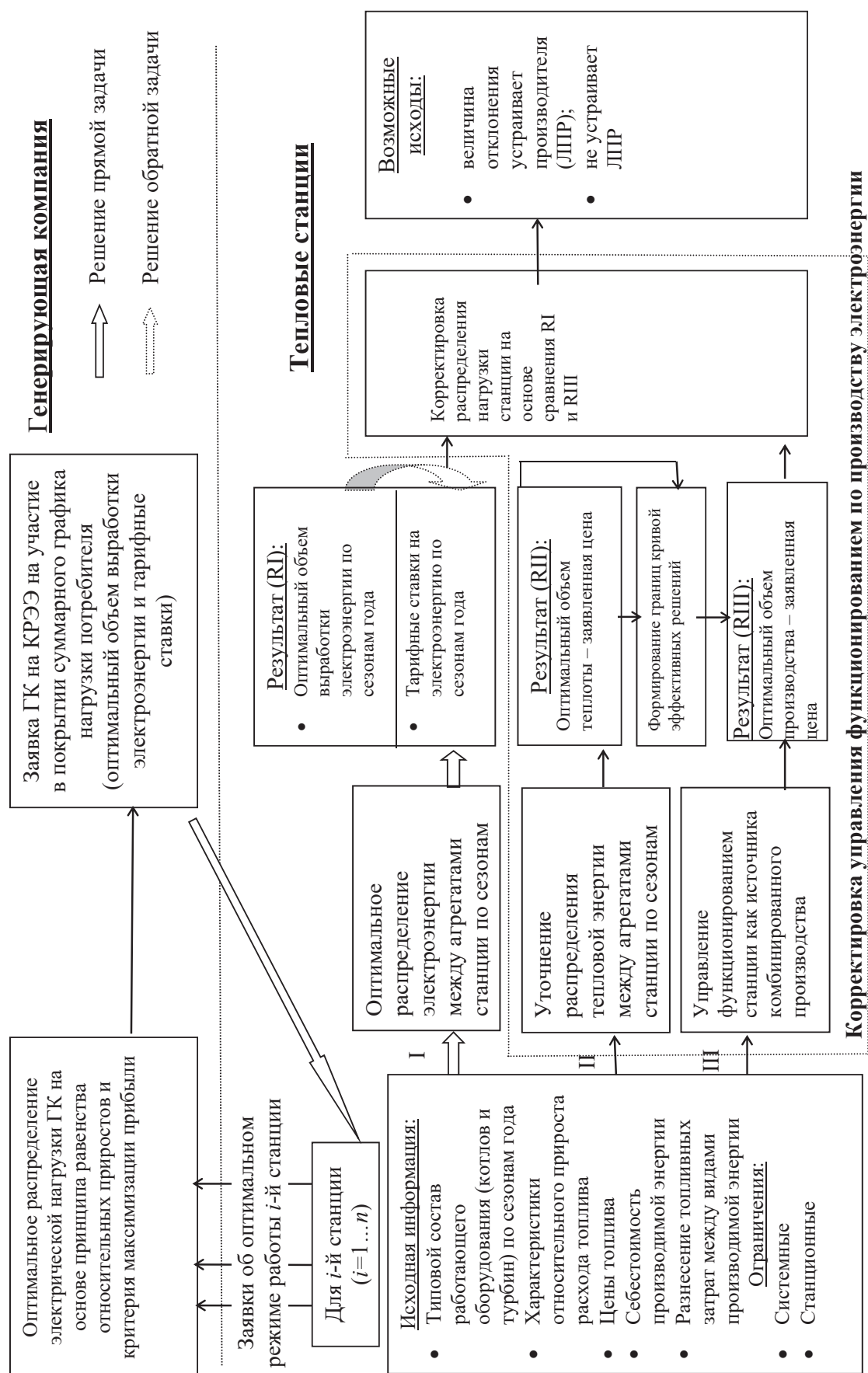
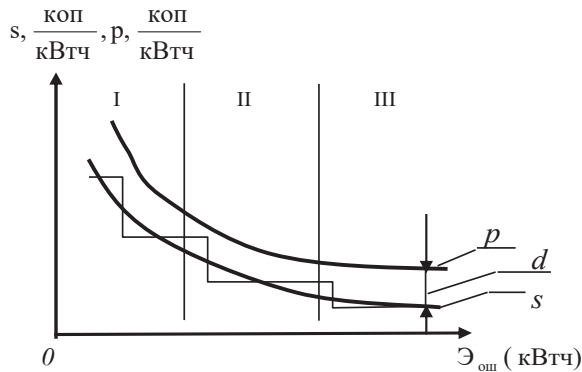


Рис. 3. Блок-схема управления функционированием ГК в рыночных условиях

Fig. 3. Logic diagram of market generation company functioning

$$N_{\text{опт}} = \Xi_{\text{опт}} / t_{\text{мес}}, \quad (9)$$

где  $t_{\text{мес}}$  – среднее число часов в месяц (720 ч).



**Рис. 4.** Кривая себестоимости и спроса: здесь  $s$  и  $p$  – себестоимость производства и цена продажи электроэнергии соответственно;  $\Xi_{\text{опт}}$  – электроэнергия, отпущенная с шин станции;  $s=f(\Xi_{\text{опт}})$  – кривая себестоимости производства электроэнергии;  $D=p=f(\Xi_{\text{опт}})$  – кривая спроса, полученная как себестоимость плюс норма прибыли  $d$ , т. е.  $p=s+d$

**Fig. 4.** Curve of electricity production cost and electricity demand:  $s$  is the electricity production cost;  $p$  is the electricity price;  $\Xi_{\text{опт}}$  is the electric power produced by a thermal power plant;  $s=f(\Xi_{\text{опт}})$  is the electricity production cost curve;  $D=p=f(\Xi_{\text{опт}})$  is the electricity demand function derived as the sum of electricity production cost and profit rate, i. e.  $p=s+d$

На основании предложенного подхода в работе показана возможность решения двух важных взаимосвязанных задач управления режимами работы станции:

- 1) при тарифе на электроэнергию, который складывается в современных условиях функционирования ТЭЦ, определять оптимальный диапазон ее выработки на электростанции;
- 2) на основании оптимальной выработки электроэнергии на станциях появляется возможность обосновывать размер заявленной цены в энергосистеме.

Как уже отмечалось, расчет оптимальной загрузки тепловой электростанции по электрической мощности (9) осуществляется с учетом вынужденного режима работы ТЭЦ по тепловой энергии [12].

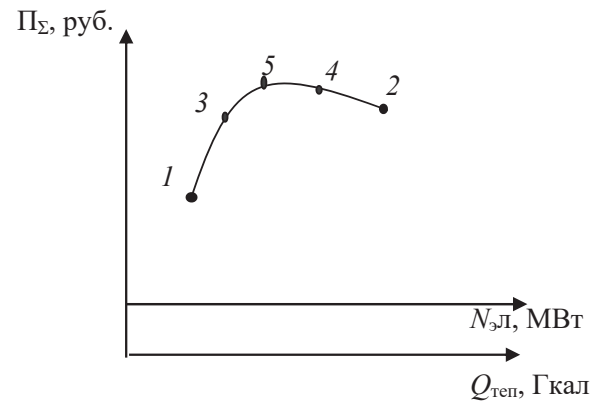
Однако применение данного подхода позволяет проверить загрузку станции по тепловой энергии.

Задача оптимального распределения тепловой энергии на станции решается поэтапно по модели, разработанной для распределения электроэнергии [13].

Рассмотрим возможность использования разработанной модели оптимального распределения электроэнергии между агрегатами станции для определения режимов по производству обоих видов энергии с учетом «жестких ограничений», накладываемых вынужденным режимом работы ТЭЦ [14].

Для решения этой задачи необходимо определить оптимальный диапазон, внутри которого допускается дальнейшая оптимизация режимов станции за счет изменения отборов с турбин и варьирования объемов выработки электрической

мощности. Графическая иллюстрация решения данной задачи показана на рис. 5. Пусть, например, точка 1 соответствует оптимальному режиму по производству электроэнергии, а точка 2 соответствует режиму по производству тепловой энергии. Тогда режимам, характеризующимся изменением отборов с турбин и варьированием электрической мощности, соответствуют промежуточные точки 3, 4 и 5.



**Рис. 5.** Зависимость суммарной прибыли станции от электрической мощности (тепловой энергии)

**Fig. 5.** Dependence of station summary profit on electrical energy generation/thermal power production

Рассмотрим следующие варианты изменения отборов на станции.

Первый граничный вариант характеризуется оптимальной загрузкой станции по электрической мощности при заданных отборах тепловой энергии. При этом критерием оптимизации является максимум прибыли от производства электрической энергии.

Второй граничный вариант характеризуется оптимальной загрузкой станции по тепловой энергии. При этом используют предложенный принцип управления функционированием станции.

Необходимо учесть, что значение электрической мощности при оптимизации по тепловой энергии ( $N_{\text{эл}2}$ ) находится на основе выражения (10):

$$N_{\text{эл}2} = N_{\text{эл}20} + N_{\text{const}}, \quad (10)$$

где  $N_{\text{эл}20}$  – значение мощности, соответствующее оптимальной загрузке станции по тепловой энергии;  $N_{\text{const}}$  – постоянная составляющая электрической мощности, соответствующая (по расходной характеристике) разнице среднего за сезон фактического значения отпуска тепловой энергии и тепловой нагрузки, которая определяется оптимальным объемом выработки электроэнергии.

Промежуточные расчеты режимов работы станции варьируются внутри первого и второго граничных вариантов [15, 16].

Полученные точки образуют кривую эффективных решений, которую предлагается использовать для нахождения оптимальных режимов работы станции при комбинированной выработке электрической и тепловой энергии.

Критерием оптимальности комбинированного способа производства электрической и тепловой энергии будет служить максимум суммарной прибыли  $\Pi_{\Sigma}$ :

$$\Pi_{\Sigma} = \Pi_{\text{э}} + \Pi_{\text{т}} \Rightarrow \max, \quad (11)$$

где  $\Pi_{\text{э}}$  – прибыль от производства электроэнергии;  $\Pi_{\text{т}}$  – прибыль от производства тепловой энергии.

При этом может оказаться, что полученное решение даст серьезные отклонения в производстве электрической и тепловой энергии на станции.

Поэтому в работе предложен способ корректировки производства электроэнергии по оптимальному значению тепловой энергии [17].

Для этого необходимо рассчитать отклонение ( $\Delta$ ) оптимальной выработки электрической энергии (полученной при жестко заданном отборе) с оптимальным режимом, который рассчитывается на основании критерия (11):

$$\Delta = \frac{\Delta_{\text{э}} \Theta_{\text{э}} + \Delta_{\text{л}} \Theta_{\text{л}} + \Delta_{\text{м}} \Theta_{\text{м}}}{\Theta_{\text{э}} + \Theta_{\text{л}} + \Theta_{\text{м}}}, \quad (12)$$

где  $\Delta_{\text{э}}$ ,  $\Delta_{\text{л}}$ ,  $\Delta_{\text{м}}$  – отклонение для зимнего, летнего и переходного периодов соответственно;  $\Theta_{\text{э}}$ ,  $\Theta_{\text{л}}$ ,  $\Theta_{\text{м}}$  – оптимальные значения мощностей для характерного сезона года.

Предложенная модель позволяет разносить топливные затраты между видами производимой энергии по критерию максимизации прибыли с учетом режимных ограничений.

#### Управление режимами работы тепловых электростанций как комбинированных источников производства

Следующей итерацией является практическая реализация предложенных в статье моделей для определения оптимальных режимов работы Новосибирских ТЭЦ-2, ТЭЦ-3, ТЭЦ-4, ТЭЦ-5.

В соответствии с предложенным подходом, необходимо рассчитать граничные и промежуточные варианты производства энергии на станциях (рис. 5). Затем по критерию (4) определить оптимальный режим работы каждой из вышеперечисленных станций по электрической и тепловой энергии.

В качестве общего замечания следует отметить, что все расчеты осуществляются для заданных составов работающего оборудования [18].

В табл. 1 приведен состав работающего оборудования НТЭЦ-4 по сезонам года.

На рис. 6–8 приведены характеристики относительного прироста расхода топлива, предельные издержки и предельный доход для зимнего периода НТЭЦ-4 соответственно.

Результаты расчетов по разработанному принципу управления функционированием станции по производству электроэнергии представлены в табл. 2.

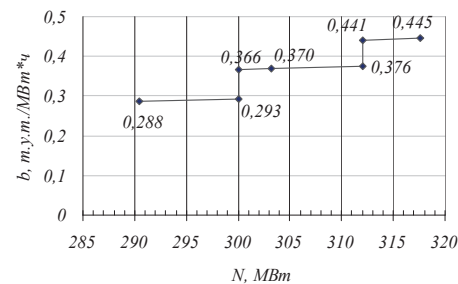
Диапазон изменения выработки электроэнергии НТЭЦ-4 для зимнего периода составляет 158702–168394 МВт·ч. При этом заявленная цена электроэнергии составит от 360 до 394 р/МВт·ч; для переходного периода 109058–119635 МВт·ч при заявленной цене от 351 до 388 р/МВт·ч соот-

ветственно. Для летнего периода эти значения равны 28411–29715 МВт·ч и 896–995 р/МВт·ч.

**Таблица 1.** Типовой состав работающего оборудования Новосибирской ТЭЦ-4

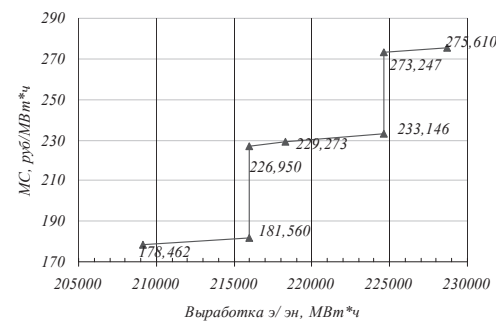
**Table 1.** Typical operating equipment structure at the Novosibirsk thermal electrical power station CHP-4

| Сезон года<br>Season                                  | Котлы/Boilers |       |            | Турбины/Turbines |           |           |
|-------------------------------------------------------|---------------|-------|------------|------------------|-----------|-----------|
|                                                       | ТП-170        | ТП-81 | ЦКТИ-75-39 | ТТ-22-90         | Т-100-130 | Т-24,5-90 |
| Зима<br>Winter (months XI, XII, I, II, III)           | 4             | 3     | –          | 2                | 3         | 1         |
| Лето<br>Summer (VI, VII, VIII)                        | 2             | 1     | 1          | 2                | 2         | –         |
| Переходный период<br>Transition period (IX, X, IV, V) | 2             | 3     | –          | 2                | 3         | –         |



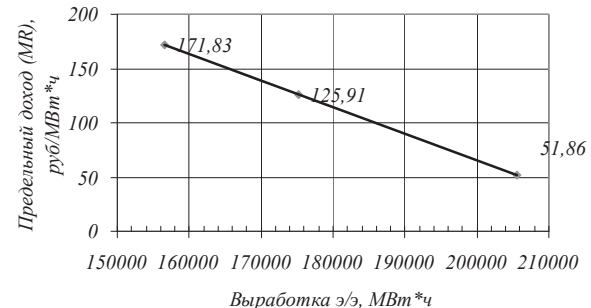
**Рис. 6.** Характеристика относительного прироста расхода топлива НТЭЦ-4 для зимы

**Fig. 6.** Incremental heat rate characteristics for the Novosibirsk CHP-4 in winter season



**Рис. 7.** Характеристики предельных издержек НТЭЦ-4 для зимнего периода

**Fig. 7.** Marginal costs for the Novosibirsk CHP-4 in winter season



**Рис. 8.** Кривая предельного дохода для зимнего периода НТЭЦ-4

**Fig. 8.** Marginal revenue for the Novosibirsk CHP-4 in winter season

В табл. 3 показаны результаты верификации объемов выработки электроэнергии при использовании существующего (принципа минимизации топливных издержек) и разработанного авторами критерия управления функционированием станций.

Под вторым граничным вариантом понимается такой режим работы, который характеризуется оптимальной загрузкой по производству тепловой энергии.

Данная задача решается для заданного состава работающего оборудования на станции [19].

**Таблица 2.** Оптимальные значения мощностей по сезонам года для НТЭЦ-4

**Table 2.** Optimal value of power output at the Novosibirsk CHP-4 for different seasons

| Сезон года<br>Season                             | Зима<br>Winter |           | Переходный период<br>Transition period |           | Лето<br>Summer |          |
|--------------------------------------------------|----------------|-----------|----------------------------------------|-----------|----------------|----------|
| Норма прибыли, %/Profit rate, %                  | 0              | 12        | 0                                      | 12        | 0              | 12       |
| Мощность, МВт/ $N$ , MW                          | 220            | 234       | 151                                    | 166       | 39             | 41       |
| Электроэнергия, МВт·ч/ $E$ , MW·h                | 158702         | 168394    | 109058                                 | 119635    | 28412          | 29716    |
| Заявленная цена, р./МВт·ч/Posted price, rub/MW·h | 560            | 650       | 600                                    | 800       | 1500           | 1700     |
| Доход, р./Revenue, rub.                          | 285807009      | 331995964 | 152955789                              | 185715182 | 76410172       | 88707757 |
| Прибыль, р./Profit, rub.                         | 0              | 46188955  | 0                                      | 32759394  | 0              | 12297585 |

**Таблица 3.** Верификация объемов выработки электроэнергии

**Table 3.** Verification of electrical energy generation volumes

| Сезон года/Season | Зима/Winter                    |                   | Переходный период/Transition period |                   | Лето/Summer                    |                   |
|-------------------|--------------------------------|-------------------|-------------------------------------|-------------------|--------------------------------|-------------------|
| Станция/CHP       | Rate of production $E$ , MWt·h | $E_{opt}$ , MWt·h | Rate of production $E$ , MWt·h      | $E_{opt}$ , MWt·h | Rate of production $E$ , MWt·h | $E_{opt}$ , MWt·h |
| НТЭЦ-2/CHP 2      | 147300–238000                  | 155685            | 85600–150000                        | 88213             | 23900–87400                    | 65500             |
| НТЭЦ-3/CHP 3      | 176000–257040                  | 191890            | 89280–221760                        | 150057            | 23600–76320                    | 62554             |
| НТЭЦ-4/CHP 4      | 156486–234964                  | 168393            | 38518–121769                        | 119635            | 23577–32766                    | 29715             |
| НТЭЦ-5/CHP 5      | 295200–666000                  | 408000            | 207360–547200                       | 280000            | 115200–288000                  | 158000            |

**Таблица 4.** Оптимальные значения мощностей по сезонам года для НТЭЦ-2

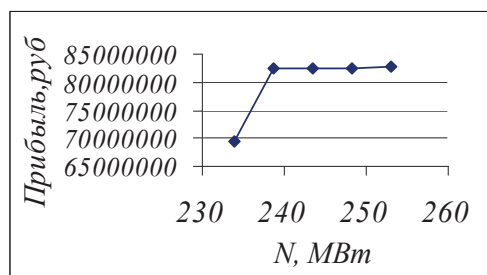
**Table 4.** Optimal values of power output at the Novosibirsk CHP-2 for different seasons

| Сезон года<br>Season                             | Зима<br>Winter |           | Переходный период<br>Transition period |           | Лето<br>Summer |          |
|--------------------------------------------------|----------------|-----------|----------------------------------------|-----------|----------------|----------|
| Норма прибыли, %/Profit rate, %                  | 0              | 12        | 0                                      | 12        | 0              | 12       |
| Тепловая энергия, Гкал/ $Q_{opt}$ , Gcal         | 215450         | 229630    | 165126                                 | 191910    | 52232          | 56255    |
| Заявленная цена, р./Гкал/Posted price, rub./Gcal | 145            | 163       | 156                                    | 175       | 195            | 216      |
| Доход, р./Revenue, rub.                          | 153101233      | 186633440 | 103032019                              | 134347042 | 30607245       | 36408433 |
| Прибыль, р./Profit, rub.                         | 0              | 33532207  | 0                                      | 31315023  | 0              | 5801188  |

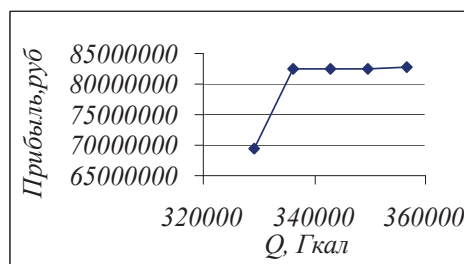
**Таблица 5.** Сравнение объемов отпуска тепловой энергии

**Table 5.** Thermal power production volumes verification

| Сезон года/Season | Зима/Winter                   |                  | Переходный период/Transition period |                  | Лето/Summer                   |                  |
|-------------------|-------------------------------|------------------|-------------------------------------|------------------|-------------------------------|------------------|
| Станция/CHP       | Rate of production $Q$ , Gcal | $Q_{opt}$ , Gcal | Rate of production $Q$ , Gcal       | $Q_{opt}$ , Gcal | Rate of production $Q$ , Gcal | $Q_{opt}$ , Gcal |
| НТЭЦ-2/CHP 2      | 223400–352600                 | 229630           | 62700–196900                        | 191910           | 45000–70000                   | 56255            |
| НТЭЦ-4/CHP 4      | 336081–499962                 | 356589           | 93126–269552                        | 264725           | 533331–109444                 | 106640           |



a/a



б/б

**Рис. 9.** Определение оптимального режима работы НТЭЦ-4 по: а) электрической мощности, б) тепловой энергии для зимы

**Fig. 9.** TEPS-4 optimization operation graphs (winter): a) electrical energy; b) thermal power

В соответствии с разработанным подходом, характеристика относительного прироста расхода топлива станции получается на основе характеристики котельного цеха, путем выделения из нее составляющей, которая соответствует отпуску тепловой энергии на ТЭЦ. Ниже показаны результаты реализации разработанного подхода по расчету тепловой нагрузки станции на примере зимнего периода НТЭЦ-2 (табл. 4).

По результатам реализации разработанного подхода на НТЭЦ-4 была получена экономия удельного расхода топлива на выработку электроэнергии порядка 5, а в отдельных случаях 10 г/кВт·ч.

Для НТЭЦ-2 диапазон изменения отпуска тепла для зимнего периода составляет 215450–229629 Гкал. При этом заявленная цена тепловой энергии составит от 142 до 163 р/Гкал. Аналогично для переходного периода 165126–191910 Гкал при заявленной цене от 156 до 175 р/Гкал соответственно. Для летнего периода эти значения равны 52232–56255 Гкал и 195–216 р/Гкал.

В табл. 5 сведены результаты верификации объемов выработки тепловой энергии при использовании существующего и предложенного авторами критерия оптимизации (12). Из сравнения фактического и оптимального объемов выработки электроэнергии видно, что использование принципа максимизации прибыли позволяет получить решения, принадлежащие диапазону, который имел место при существующем критерии (критерии минимизации топливных издержек) управления функционированием тепловых электростанций.

В результате расчета промежуточных оптимальных вариантов режимов работы станции как комбинированного производства получают кривую эффективных решений, которая позволяет принимать решения о оптимальном распределении электрической и тепловой нагрузки между агрегатами на ТЭЦ. Для примера на рис. 9 приведена кривая эффективных решений для зимнего периода НТЭЦ-4.

Анализ полученных результатов показывает, что для НТЭЦ-2 в зимний период целесообразно производить 216 МВт (348942 Гкал), летом – 91 МВт (79149 Гкал) и для переходного периода – 146 МВт (191910 Гкал); для НТЭЦ-4 в зимний период оптимальная загрузка составляет 253 МВт (356589 Гкал), летом – 59 МВт (81282 Гкал) и для переходного периода – 210 МВт (264725 Гкал). Именно такие режимы работы позволят станциям получить максимальную прибыль для каждого сезона года.

О возможности применения подхода к управлению функционированием ТЭЦ по производству электроэнергии для нахождения оптимальных режимов работы станции как комбинированного производства в современных условиях позволяет судить величина отклонения, найденная по выражению (11). Для НТЭЦ-4 она составляет 13 %, для НТЭЦ-2 – 4 %.

### Управление режимами работы генерирующей компании

Задача управления функционированием ГК решается на основе полученных оптимальных режимов работы тепловых электростанций, входящих в ее состав.

При этом принцип взаимодействия в рамках генерирующей компании выглядит следующим образом:

- каждая станция, входящая в состав ГК, рассчитывает и передает свой оптимальный режим работы (для каждого из сезонов года) с учетом станционных и системных ограничений, указывая объем возможных поставок и заявленную цену по электроэнергии;
- ГК, собрав заявки от ТЭЦ, загружает станции оптимальным образом, руководствуясь в качестве критерия оптимизации правилом максимизации прибыли;
- на основе оптимальных режимов работы ТЭЦ с производителями заключаются договора на поставку энергии с детализацией поставок по месяцам, рабочим, праздничным и выходным дням.

Для описанного принципа взаимодействия в рамках ГК разработан подход, позволяющий рассчитать диапазон оптимальных объемов выработки электроэнергии, в основу которого положен критерий максимизации прибыли.

Реализация подхода осуществляется последовательно по модели, предложенной для управления функционированием ТЭЦ.

Как результат оптимизации режима работы отдел связи ГК предъявляет свою заявку на участие в покрытии суммарного графика нагрузки потребителя.

Необходимо отметить, что данная заявка носит характер «твердых поставок», которые руководство ГК обязуется поставить на конкурентный рынок электрической энергии и мощности (КРЭЭ) [20].

Все расчеты выполнены для генерирующей компании на базе Новосибирских ТЭЦ на основе данных о режимах работы станций, а также информации о среднемесячных значениях цен топлива и себестоимости отпускаемой продукции. Результаты расчета по разработанной методике приведены в табл. 6.

Анализ полученных результатов показывает, что диапазон изменения выработки электроэнергии станции для зимнего периода составляет 489300–554900 МВт·ч. При этом заявленная цена электроэнергии для ГК составит от 52 до 57 коп/кВт·ч. Аналогично для переходного периода 343370–388100 МВт·ч при заявленной цене от 89 до 99 коп/кВт·ч соответственно. Для летнего периода эти значения равны 129250–143690 МВт·ч и 127–142 коп/кВт·ч. Именно с таким предложением ГК может выйти на КРЭЭ. Таким образом, разработанная математическая модель позволяет обеспечить существенные конкурентные преимущества российской энергетики.

**Таблица 6.** Оптимальный объем производства электроэнергии для генерирующей компании

**Table 6.** Optimal electricity output for generation company

| Сезон года<br>Season                                 | Зима<br>Winter |        | Переходный период<br>Transition period |        | Лето<br>Summer |        |
|------------------------------------------------------|----------------|--------|----------------------------------------|--------|----------------|--------|
| Норма прибыли, %<br>Profit rate, %                   | 0              | 12     | 0                                      | 12     | 0              | 12     |
| Электроэнергия, МВт·ч<br>Electricity output, MW·h    | 489300         | 554900 | 129250                                 | 143690 | 343370         | 388100 |
| Заявленная цена, руб/МВт·ч<br>Posted price, rub/MW·h | 1150           | 1275   | 2500                                   | 2750   | 1670           | 1800   |

### Заключение

Сформулированы наиболее существенные полученные результаты, к которым следует отнести следующее:

1. Разработана математическая модель управления функционированием ГК в современных условиях.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хайман Д.Н. Современная микроэкономика: анализ и применение. В 2-х т. / пер. с англ. – М.: Финансы и статистика, 1992. – 384 с.
2. Меламед Л.Б., Суслов Н.И. Экономика энергетики: основы теории. – Новосибирск: Изд-во СО Российской Академии наук, 2000. – 180 с.
3. Синьков В.М., Богословский А.В. Оптимизация режимов энергетических систем. – Киев: Изд-во «Вища школа», 1973. – 274 с.
4. Мошкин Б.Н., Секретарев Ю.А., Чекалина Т.В. Определение оптимальной электрической мощности станции на основе максимизации ее доходов // Сборник научных трудов / под ред. д-ра техн. наук, проф. А.И. Шалина. Ч. II. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. – С. 58–62.
5. Chekalina T.V. Ensuring of the generating company competitiveness at the energy market due to the assignment of the optimum states of thermal stations // Proc. of the 7<sup>th</sup> Russian-Korean International Symposium on Science and Technology (KORUS-2003). – Ulsan, Korea, June 28 – July 6, 2003. – P. 62–64.
6. Sekretarev U.A., Chekalina T.V., Malosemov B.V. Administration Functioning Power Generation Companies by Criterion of Maximization Profit // Symposium of papers the 6<sup>th</sup> International Forum on Strategic Technology (IFOST-2011). – Harbin, China, August 22–24, 2011. – V. 1. – P. 491–494.
7. Мошкин Б.Н., Мятаж Т.В., Секретарев Ю.А. Оптимизация режимов работы генерирующей компании на базе ТЭЦ по выработке электроэнергии на основе критерия максимизации прибыли // Известия высших учебных заведений. Электроэнергетика. – 2016. – № 4 (546). – С. 82–88.
8. Веников В.А., Журавлев В.Г., Филиппова Т.А. Оптимизация режимов электростанций и энергосистем. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 347 с.
9. Горнштейн В.М. Наивыгоднейшие режимы работы гидроэлектростанций в энергетических системах. – М.: Госэнергоиздат, 1959. – 247 с.

2. Проведен критический анализ существующих критериев управления ЭЭС, которые не пригодны в условиях рынка.
3. Предложен критерий управления режимами работы энергетического объекта, который объединяет технологические особенности функционирования энергетической отрасли с новыми экономическими рычагами управления.
4. Разработаны принципы и методы управления функционированием тепловой электростанции по производству тепловой и электрической энергии на основе принципа максимизации прибыли.
5. Создана комплексная методика распределения топливных издержек между видами производимой энергии на ТЭЦ по критерию максимизации прибыли.
6. Разработана методика получения оптимальных режимов работы тепловых электрических станций, образующих генерирующую компанию, на основе принципа максимизации прибыли.
7. Осуществлена расчетная и экспериментальная проверка разработанных подходов и методов, а также проведена реализация основных положений исследования на конкретных объектах.

10. Гамм А.З., Голуб И.И. Наблюдаемость электроэнергетических систем / отв. ред. Ю.Н. Руденко. – М.: Наука, 1990. – 200 с.
11. Вентцель Е.С. Исследование операций: Задачи, принципы, методология. – М.: Изд-во «Высшая школа», 2001. – 206 с.
12. Гамм А.З. Вероятностные модели режимов электроэнергетических систем. – Новосибирск: Наука, 1993. – 132 с.
13. Макконнелл К.Р., Брю С.Л. Экономикс: принципы, проблемы и политика. В 2 т. / пер. с англ. – М.: ИНФРА-М, 1997. – 939 с.
14. A multiple objective decision making model for energy generation portfolio under fuzzy uncertainty: Case study of large scale investor-owned utilities in Florida / Ziqiang Zeng, Ehsan Nasric, Abdol Chinib, Robert Riesb, Jiuping Xu // Renewable Energy. – March 2015. – V. 75. – P. 224–242.
15. Fallahia A., Ebrahimib R., Ghaderic S.F. Measuring efficiency and productivity change in power electric generation management companies by using data envelopment analysis: a case study // Energy. – November 2011. – V. 36. – Iss. 11. – P. 6398–6405.
16. Behavioral simulation and optimization of generation companies in electricity markets by fuzzy cognitive map / S.F. Ghaderi, A. Azadeh, B. Nokhandan, E. Fathi // Expert Systems with Applications. – April 2012. – V. 39. – Iss. 5. – P. 4635–4646.
17. Гальперин В.М., Игнатьев С.М., Моргунов В.И. Микроэкономика. Т. 1. – СПб.: Экономическая школа, 1997. – 378 с.
18. Azghandi S., Hopkinson K.M., Laviers K.R. Benchmarking approach for empirical comparison of pricing models in DRMS // The Journal of Engineering. – 2016. – V. 8. – P. 8–16.
19. Баканов М.И., Шеремет А.И. Теория экономического анализа. 3-е изд., перераб. – М.: Финансы и статистика, 1995. – 288 с.
20. Karimzadeh F., Esmaili S., Hosseini S.H. A Novel Method for Noninvasive Estimation of Utility Harmonic Impedance Based on Complex Independent Component Analysis // IEEE Transactions on Power Delivery, 2015. – V. 30. – № 4. – P. 1843–1853.

Поступила 24.10.2017 г.

#### **Информация об авторах**

**Секретарев Ю.А.**, доктор технических наук, профессор кафедры систем электроснабжения предприятий Новосибирского государственного технического университета.

**Мятёж Т.В.**, кандидат технических наук, доцент кафедры систем электроснабжения предприятий Новосибирского государственного технического университета.

**Мошкин Б.Н.**, кандидат технических наук, доцент кафедры производственного менеджмента и экономики энергетики Новосибирского государственного технического университета.

UDC 621.311

## MATHEMATICAL MODEL FOR CONTROLLING GENERATION COMPANY FUNCTIONING UNDER MODERN CONDITIONS

Yury A. Sekretarev<sup>1</sup>,  
sekreterevua@mail.ru

Tatyana V. Myatezh<sup>1</sup>,  
tatianachekalina@ngs.ru

Boris N. Moshkin<sup>1</sup>,  
moshkin@eco.power.nstu.ru

<sup>1</sup> Novosibirsk State Technical University,  
20, Karl Marks avenue, Novosibirsk, 630073, Russia.

The relevance of the research is caused by electrical power industry reform being realized by step-by-step transition to a competitive market model which will allow each electricity producer to maximize its profit and to determine the electrical and thermal energy production output individually.

**The main aim** of the study is to develop a mathematical model of optimal electric power loading for a generation company.

**Methods.** The system concept with its structural and functional object models is the basis of the paper methodology. The theory optimization techniques and mathematical models, economical principles of management, the decision-making theory and computer science are widely used in the paper. The authors have proposed the methodology for evaluating optimal regimes for thermal power plants in generation company. It is based on the principle of equality between marginal revenue and marginal costs. Based on the developed criterion, the following problems are considered in the paper: calculation of incremental fuel rate characteristics for optimizing thermal electrical power stations functioning to produce electrical and thermal energy, optimization of thermal electrical power stations functioning to generate electrical energy, optimization of thermal electrical power stations functioning to produce thermal energy, development of the techniques to define the fuel consumption ratio for electrical and thermal energy generation separately, optimization of any electric power generating company functioning. The developed techniques are applied at Novosibirsk Thermal Electrical Power stations and SIB-EKO Generation Company. Using the example of Novosibirsk combined heat and power plants, the following main factors influencing the optimal operating regime are identified: operating equipment structure, power generation cost and energy characteristics of power equipment.

**Results.** The authors developed the methodology of thermal power plants optimization for electric power and thermal energy and proposed a new criterion of profit maximization for generation company management.

### Key words:

Mathematical model, thermal electrical power station operation modes, incremental heat rate characteristics, generation company, maximization profit criterion.

### REFERENCES

- Khayman D.N. *Sovremennaya mikroekonomika: analiz i primeneniye* [Modern microeconomics: analysis and application]. Translated from English. Moscow, Finansy i statistika Publ., 1992. 384 p.
- Melamed L.B., Suslov N.I. *Economica energetiki: osnovy teorii* [Power engineering economics: bases of theory]. Novosibirsk, SO Russian Academy of Sciences Publ., 2000. 180 p.
- Sinkov V.M., Bogoslovskiy A.V. *Optimizatsiya regimov raboty energeticheskikh sistem* [Optimisation of power system operation modes]. Kiev, Vishcha shkola Publ., 1973. 274 p.
- Moshkin B.N., Sekretarev Yu.A., Chekalina T.V. *Opreделение optimal'noy elektricheskoy moshchnosti stantsii na osnove maksimizatsii ee dokhodov* [Determination of optimal electric power of the plant based on its benefit maximum]. *Sbornik nauchnykh trudov* [Collected papers]. Ed. by A.I. Shalin. Novosibirsk, NGTU Publ., 2002. P. II, pp. 58–62.
- Chekalina T.V. Ensuring of the generating company competitiveness at the energy market due to the assignment of the optimum states of thermal stations. *Proceedings of the 7th Russian-Korean International Symposium on Science and Technology (KORUS-2003)*, June 28 – July 6, 2003, Ulsan, Korea. pp. 62–64.
- Sekretarev U.A., Chekalina T.V., Malosemov B.V. Administration Functioning Power Generation Companies by Criterion of Maximization Profit. *Symposium of papers the 6<sup>th</sup> International Forum on Strategic Technology (IFOST-2011)*. Harbin, China, August 22–24, 2011. Vol. 1, pp. 491–494.
- Sekretarev Yu.A., Myatezh T.V. (Chekalina T.V.), Moshkin B.N. Administration functioning power generation companies based on thermal electrical power station on maximization profit criterion. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Electromekhanika*, 2016, no. 4 (546), pp. 82–88. In Rus.
- Venikov V.A., Zhuravlev V.G., Filippova T.A. *Optimizatsiya regimov elektrostantsiy i energosistem* [Optimisation of modes of power stations and power systems]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1990. 347 p.
- Gornshcheyn V.M. *Naivnygodneyshie regimy raboty gidrostantsiy v energeticheskikh sistemakh* [Optimal operation modes of hydro-power stations in power systems]. Moscow, Gosenergoizdat Publ., 1959. 247 p.
- Gamm A.Z., Golub I.I. *Nablyudaemost elektroenergeticheskikh sistem* [Observability of power electric systems]. Ed. by Yu.N. Rudenko. Moscow, Nauka Publ., 1990. 200 p.
- Ventsel E.S. *Issledovanie operatsiy: Zadachi, printsipy, metodologiya* [Investigation of operations: tasks, principles, methodology]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2001. 206 p.
- Gamm A.Z. *Veroyatnostnye modeli rezhimov elektroenergeticheskikh sistem* [Stochastic models of power system modes]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1993. 132 p.

13. Makkonnell K.R., Bryu S.L. *Ekonomika: printsipy, problemy i politika* [Economics: principles, problems and policy]. Translated from English. Moscow, INFRA-M Publ., 1997. 939 p.
14. Ziqiang Zenga, Ehsan Nasric, Abdol Chinib, Robert Riesb, Jiuping Xu. A multiple objective decision making model for energy generation portfolio under fuzzy uncertainty: Case study of large scale investor-owned utilities in Florida. *Renewable Energy*, March 2015, vol. 75, pp. 224–242.
15. Fallahia A., Ebrahimib R., Ghaderic S.F. Measuring efficiency and productivity change in power electric generation management companies by using data envelopment analysis: a case study. *Energy*, November 2011, vol. 36, Iss. 11, pp. 6398–6405.
16. Ghaderi S.F., Azadeh A., Nokhandan B., Fathi E. Behavioral simulation and optimization of generation companies in electricity markets by fuzzy cognitive map. *Expert Systems with Applications*, April 2012, vol. 39, Iss. 5, pp. 4635–4646.
17. Galperin V.M., Ignatev S.M., Morgunov V.I. *Mikroekonomika* [Microeconomics]. St-Petersburg, Ekonomicheskaya shkola Publ., 1997. Vol. 1, 378 p.
18. Azghandi S., Hopkinson K.M., Lavers K.R. Benchmarking approach for empirical comparison of pricing models in DRMS. *The Journal of Engineering*, 2016, vol. 8, pp. 8–16.
19. Bakanov M.I., Sheremet A.I. *Teoriya ekonomicheskogo analiza* [Theory of economic analysis]. Moscow, Finansy i statistika Publ., 1995. 288 p.
20. Karimzadeh F., Esmaeili S., Hosseinian S.H. A Novel Method for Noninvasive Estimation of Utility Harmonic Impedance Based on Complex Independent Component Analysis. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2015, vol. 30, no. 4, pp. 1843–1853.

Received: 24 October 2017.

#### Information about the authors

**Yury A. Sekretarev**, Dr. Sc., professor, Novosibirsk State Technical University.

**Tatyana V. Myatezh**, Cand. Sc., associate professor, Novosibirsk State Technical University.

**Boris N. Moshkin**, Cand. Sc., associate professor, Novosibirsk State Technical University.

УДК 622.276.054.23

## ПРИМЕНЕНИЕ ЭВРИСТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ В АНАЛИЗЕ ДАННЫХ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСНЫХ УСТАНОВОК

**Валиахметов Рустам Илдарович<sup>1</sup>,**  
valiakhmetovri@gmail.com

**Ямалиев Виль Узбекович<sup>1</sup>,**  
rusoil@mail.ru

**Шубин Станислав Сергеевич<sup>1</sup>,**  
shubinss@outlook.com

**Алфёров Алексей Викторович<sup>2</sup>,**  
aleksey.alferov@gmail.com

<sup>1</sup> Уфимский государственный нефтяной технический университета,  
Россия, 450062, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

<sup>2</sup> Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН,  
Россия, 450054, г. Уфа, пр. Октября, 71.

Обеспечение эффективного контроля и предотвращение отказов электроцентробежных насосных установок ввиду их широкого распространения является актуальной и востребованной задачей. Применение систем автоматизированного контроля электроцентробежных насосных установок позволяет повысить качество и скорость принимаемых решений о их техническом состоянии. Все методы диагностирования установок электроцентробежных насосов направлены на контроль состояния составных узлов и сводятся к анализу временных рядов, являющихся временными развёртками параметров эксплуатации. Традиционно применяемые линейные методы исследования временных рядов в последние десятилетия были существенно расширены нелинейными методами, среди которых значительное развитие получили эвристические алгоритмы.

**Цель работы:** повышение эффективности определения технического состояния установок электроцентробежных насосов в процессе эксплуатации.

**Методы исследования.** Предложенный в работе подход основывается на решении задачи диагностирования путём декомпозиции на следующие подзадачи: автоматическая сегментация, формализация и интерпретация полученных данных. Сегментация рассмотрена как задача кластеризации, цель которой – установление автокорреляционных связей между значениями временного ряда с формированием темпоральных кластеров и адаптивной аппроксимации в рамках установленных участков при сохранении локальных особенностей сигналов. Для каждого выделяемого класса отклонений работы электроцентробежных насосных установок сформированы решающие правила на основании экспертных знаний. Основными отличиями от классического подхода к задаче диагностирования являются: отсутствие необходимости участия эксперта при решении задачи кластеризации; обеспечение адаптивной аппроксимации в рамках выделенных временных участков; возможность реализации интерпретируемых подходов распознавания неисправностей.

**Результаты.** Предложен подход, основанный на решении задачи диагностирования путём её декомпозиции на следующие подзадачи: автоматическая сегментация, формализация и интерпретация полученных данных. Определён необходимый перечень контролируемых параметров эксплуатации электроцентробежных насосных установок, позволяющий реализовать процесс технического диагностирования.

### Ключевые слова:

Насос, центробежный, диагностика, анализ, состояние, статистика, классификация.

### Введение

В настоящее время решение задачи обеспечения интеллектуального контроля процесса эксплуатации скважин представляет большой интерес для специалистов производственных служб. Различные подходы к диагностике неисправностей нефтедобывающего оборудования, от аналитических методов до искусственных нейронных сетей, рассмотрены во множестве литературных источников [1–8].

Основным преимуществом установок электроцентробежных насосов (УЭЦН) по отношению к другим способам механизированной добычи является более высокая эффективность и широкий диапазон подач, но в связи с ограничениями и усло-

виями, накладываемыми конструкцией скважины к компоновке узлов УЭЦН [9, 10], им присущ ряд неисправностей, зачастую сопровождающих эксплуатацию, в качестве примера рассмотрим следующие:

- «клин» рабочих органов, что вызывает превышение номинальных значений токовых характеристик в погружном электродвигателе (ПЭД), т. е. «перегруз» ПЭД, следствием чего является повреждение шлицевой муфты (скручивание и слом вала);
- высвобождение растворенного в нефти газа в свободную газовую фазу в проточной части секции насосного агрегата (ЭЦН) и входного модуля (газосепаратора). Следствием является сни-

жение подачи насосного агрегата либо критический режим нарушения целостности потока флюида с образованием газовой пробки («срыв подачи»).

В связи с отсутствием эффективных подходов для диагностирования УЭЦН возникла необходимость разработки обобщённого алгоритма по определению её технического состояния. Предложенный в работе подход основывается на решении задачи диагностирования путём её декомпозиции на следующие подзадачи: автоматическая сегментация, формализация и интерпретация полученных данных, ниже приведена структурная схема предложенного подхода (рис. 1).

#### Описание предложенного решения

Основными отличиями от классического подхода к задаче диагностирования являются: отсутствие необходимости участия эксперта при решении задачи кластеризации; обеспечение адаптивной аппроксимации в рамках выделенных временных участков; возможность реализации интерпретируемых подходов распознавания неисправностей. В рамках предложенного подхода, с точки зрения теории машинного обучения, можно выделить два основных функциональных блока:

- формирование признаков (адаптивная сегментация и аппроксимация, укладка в алфавит и т. п.);
- решающий алгоритм (интерпретация на основании словаря и правил).

Далее более подробно рассмотрим основные элементы предложенного подхода.

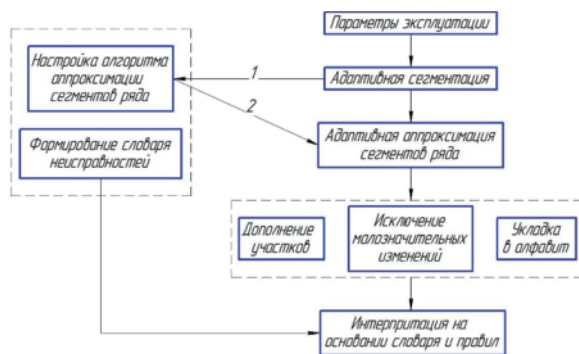


Рис. 1. Структурная схема алгоритма идентификации технического состояния УЭЦН

Fig. 1. Block diagram of the algorithm identifying the technical condition of Electrical Submersible Pump (ESP)

**Параметры эксплуатации.** В основу выбора параметров диагностирования положен принцип унификации набора параметров эксплуатации УЭЦН, что связано с различными комплектациями установок. Унифицированный набор данных включает в себя восемь технологических параметров: ток по трём фазам  $I_{A,B,C}$ ; напряжение по трём фазам  $U_{A,B,C}$ ; сопротивление изоляции  $R$ ; частота питающего тока  $F$ . Запись и сбор данных значений тока и частоты осуществляется на станции управления УЭЦН. К чи-

слу дополнительных параметров относятся такие, как замерной дебит жидкости —  $Q_{liq}$ ; давление на приёме —  $P_{int}$ ; температура жидкости на приёме —  $T_{int}$ ; температура масла электродвигателя —  $T_{motor}$ . Снятие изменений показаний температуры погружного электродвигателя, температуры и давления на приёме осуществляется при помощи погружного блока телеметрической системы, снятие замеров дебита осуществляется автоматической групповой замерной установкой.

**Адаптивная сегментация.** Представление сигнала посредством сегментации является хорошим инструментом для ранжирования изменений в контролируемой системе, однако в то же время разделение временного ряда на внутренние однородные сегменты является сложной задачей. Изменения во временном ряду обычно не локализованы на каком-либо конкретном моменте времени, т. е. невозможно определить строгие границы сегментов. Таким образом, задачу сегментации можно определить как задачу ограниченной кластеризации, т. е. значения должны быть сгруппированы на основе сходства, но с ограничением, что все точки в кластере должны происходить в последовательные моменты времени.

В рамках разработанного подхода был применён модифицированный алгоритм кластеризации *Gath–Geva*, предложенный и описанный в работах [11–17]. Особенностью данного алгоритма является то, что в нем реализована одновременная идентификация (локализация) на основании вероятностного метода главных компонент для установления однородных сегментов и элементы нечёткой логики для представления этих сегментов во временной области. Суть алгоритма сводится к идее, что данные могут быть смоделированы как линейная комбинация гауссовых функций, путём минимизации суммы взвешенных квадратов расстояний между исходными точками ( $z_k = [t_k, x_k^T]^T$ ) и прототипом кластера ( $\eta_i$ ). Алгоритм начинается с создания приближенного представления временного ряда, итерационно поглощая малозначительные сегменты до достижения критерия останова.

Задан временной ряд  $T$ , принята конечная погрешность  $\varepsilon > 0$  и инициализированные значения кластеров  $W_i, v_i^x, \sigma_{i,x}^2, \mu_{i,k}$ .

Шаг 1: расчёт  $\eta_i = \{v_i^t, A_i, v_i^t, \sigma_{i,x}^2, \alpha_i\}$  — первоначальные параметры  $i$ -го кластера

- первоначальной вероятности кластера

$$\alpha_i = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \mu_{i,k},$$

где  $\mu_{i,k}$  — степень принадлежности наблюдения  $z_k = [t_k, x_k^T]^T$  к  $i$ -у кластеру.

- центров кластеров

$$v_i^x = \frac{\sum_{k=1}^N (\mu_{i,k})^m (x_k - W_i(Y_{i,k}))}{\sum_{k=1}^N (\mu_{i,k})^m}.$$

- матрицы весов  $W_i$

$$\tilde{W}_i = F_i W_i (\sigma_{i,x}^2 I + M_i^{-1} W_i^T F_i W_i),$$

$$F = \frac{\sum_{k=1}^N (\mu_{i,k})^m (x_k - v_i^x)(x_k - v_i^x)^T}{\sum_{k=1}^N (\mu_{i,k})^m} - \text{ковариационная матрица.}$$

- отклонение функции принадлежности  $\sigma_{i,x}^2$

$$\sigma_{i,x}^2 = \frac{1}{q} \text{tr}(F_i - F_i W_i M_i^{-1} \tilde{W}_i^T).$$

- норма расстояния ( $n \times n$  матрица) – гауссова функция

$$A_i = \sigma_{i,x}^2 I + \tilde{W}_i \tilde{W}_i^T.$$

- параметры модели: центр кластера и стандартное отклонение

$$v_i^t = \frac{\sum_{k=1}^N (\mu_{i,k})^m t_k}{\sum_{k=1}^N (\mu_{i,k})^m}, \quad \sigma_{i,x}^2 = \frac{\sum_{k=1}^N (\mu_{i,k})^m (t_k - v_i^t)^2}{\sum_{k=1}^N (\mu_{i,k})^m}.$$

Шаг 2: Вычисление  $D^2(z_k, \eta_i)$  – мера обратно пропорциональная вероятности того, что (точка данных) принадлежит к  $i$ -му кластеру  $p((z_k | \eta_i))$ :

$$p(z_k | \eta_i) = \frac{1}{D_2(z_k, \eta_i)} = \alpha_i \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{i,t}^2}} \exp\left(-\frac{(t_k - v_i^t)^2}{2\sigma_{i,t}^2}\right) \times \frac{1}{(2\pi)^{\frac{r}{2}} \sqrt{\det(A_i)}} \exp\left(-\frac{1}{2}(x_k - v_i^x) A_i^{-1} (x_k - v_i^x)^T\right).$$

Шаг 3: Обновление матрицы степеней принадлежности данных  $z_k$  к  $i$ -му кластеру

$$\mu_{i,k}^{(l)} = \frac{1}{\sum_{j=1}^c \left( \frac{D(z_k, \eta_i)}{D(z_k, \eta_j)} \right)^{\frac{2}{m-1}}}$$

пока  $\|U^{(l)} - U^{(l-1)}\| < \varepsilon$ .

На рис. 2 представлен пример работы данного алгоритма – разделение кластеров проведено по

критерию равновероятной принадлежности точки к двум смежным кластерам.

**Адаптивная аппроксимация сегментов ряда.** Проведение анализа данных временных рядов характеризуется как сложная задача, особенно в контексте автоматизации процесса анализа. Основной проблемой является представление данных, оно же и ключевым моментом для эффективных решений. Наличие шума в сигнале усложняет задачу распознавания поведения УЭЦН; решением может служить анализ трендов контролируемых параметров. В данной работе применён метод представления информации о динамике процесса на основании анализа трендов.

Использование представления в виде трендов является естественным способом отображения для систем с потоковым поступлением данных. Среди основных преимуществ подобного представления можно выделить следующие:

- качественное описание – неопределённость, неполнота и неоднородность измерений делают качественное описание сигналов хорошим инструментом для решения задач контроля и управления;
- соотнесение изменений во времени;
- компактное представление знаний – учитывая большой объем информации, поступающей со станций управления, для анализа необходимо использовать только самую важную информацию.

В совокупности вышеописанные преимущества позволяют интерпретировать состояние системы с помощью экспертных правил, которые сформированы на основании опыта инженерно-технических работников. Одним из самых широко используемых способов представления временных рядов является кусочно-линейная аппроксимация. Большинство алгоритмов сегментации временных рядов могут быть сгруппированы в три категории:

- *Sliding Window Algorithm (SW)*, или алгоритм скользящего окна: сегмент увеличивается до тех пор, пока не превышает некоторую ошибку. Процесс повторяется со следующими точками временного ряда, не включёнными во вновь аппроксимированный сегмент.

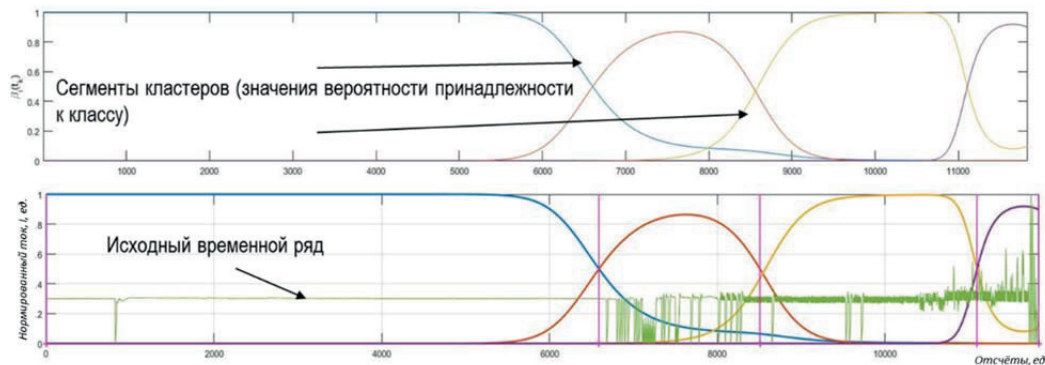


Рис. 2. Пример работы алгоритма кластеризации: зелёным – контролируемый параметр, вертикальные линии – границы кластеров, остальные кривые – вероятность принадлежности точки к конкретному кластеру

Fig. 2. Example of clustering algorithm: controlled parameter are in green, vertical lines are the clusters borders, other curves are the probability of belonging to a particular cluster point

- *The Top-Down Algorithm (TD)*, или алгоритм спуска сверху вниз: временные ряды рекурсивно «нарезаются» до тех пор, пока не удовлетворён некоторый критерий остановки.
- *The Bottom-Up Algorithm (BU)*, или алгоритм снизу–вверх: начиная от лучшего возможного приближения сегменты объединяются до тех пор, пока не будет достигнут некоторый критерий остановки.

Вышеописанные алгоритмы имеют ряд характерных недостатков, в полной мере описанных в ряде публикаций. В реализованном подходе был применён алгоритм *SWAB (Sliding Window And Bottom-up)*, фактически совмещающий в себе два алгоритма: *SW* и *BU*, совместное применение которых позволило снять их ограничения, алгоритм описан в работе [18–21].

При применении рассмотренного выше алгоритма к аппроксимации временных реализаций параметров эксплуатации УЭЦН было соблюдено условие сохранения информативности сигнала, т. е. сохранение локальных особенностей сигнала, вызванных влиянием осложняющих факторов. Для обеспечения такой возможности было проведено статистическое исследование различных по характеру поведения временных выборок, на основании которых был получен статистический критерий, позволяющий проводить настройку алгоритма *SWAB*. Наиболее информативным и обеспечивающим сепарабельность по «характеру» поведения сигнала является среднеквадратичное отклонение (СКО), прочие статистические моменты не проявили стабильность в уровнях показаний для характерных сигналов. В результате полученное значение СКО позволило задать уровень ошибки алгоритма *SWAB* для всего набора данных, использованных в исследовании.

На рис. 3 приведён пример аппроксимации различных по «поведению» сигналов с использованием алгоритма *SWAB* (нормированные значения потребляемого тока). Как видно из рис. 3, а, в сигнале присутствует «дребезг» контролируемого параметра, в свою очередь уровень ошибки принят та-

ким, что при аппроксимации не допускается избыточное разбиение на дополнительные участки, но при этом все основные особенности сигнала сохранены. На рис. 3, б присутствуют значительные отклонения в сигнале, т. е. хорошо локализованные «всплески», имеющие информационную ценность, для этого случая настройка алгоритма была принята такой, чтобы сохранить эти локальные особенности. Приведённые примеры хорошо иллюстрируют сильные стороны применённого алгоритма адаптивной аппроксимации.

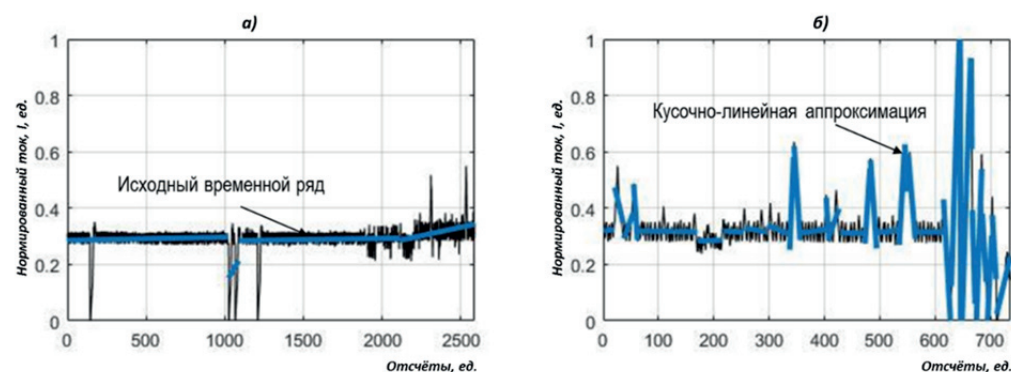
**Интерпретация на основании словаря и правил.** В качестве конечного представления исходных данных сформирован алфавит (таблица), пример реализации приведён на рис. 4. Дополнительно к алфавиту при формировании слов используются числовые значения, характеризующие изменение амплитуды контролируемого параметра за рассматриваемый период.

**Таблица.** Описание примитивов для аппроксимирующих отрезков

**Table.** Description of primitives for approximating segments

| Символ<br>Symbol | Описание<br>Description                                             | Диапазон первой производной<br>Range of the first derivative |
|------------------|---------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| $n$              | горизонтальная прямая<br>horizontal straight line                   | $[-0,05...0,05]$                                             |
| $l$              | восходящая прямая<br>ascending straight line                        | $[0,05...0,15]$                                              |
| $d$              | нисходящая прямая<br>descending straight line                       | $[-0,15...-0,05]$                                            |
| $U$              | быстрая восходящая прямая<br>fast ascending straight line           | $>0,15$                                                      |
| $D$              | быстрая нисходящая прямая<br>fast descending straight line          | $<-0,15$                                                     |
| $z$              | быстрая нисходящая прямая в 0<br>fast descending straight line to 0 | $<-0,15$                                                     |

На основании аппроксимации временной последовательности с учётом приведённых правил в



**Рис. 3.** Примеры различного поведения временных реализаций потребляемого тока: а) сигнал с «дребезгом» контролируемого параметра; б) сигнал с локализованными «всплесками»

**Fig. 3.** Examples of different behavior of temporal realizations of current consumption: а) signal with «bounce» of the controlled parameter; б) signal with localized «spikes»

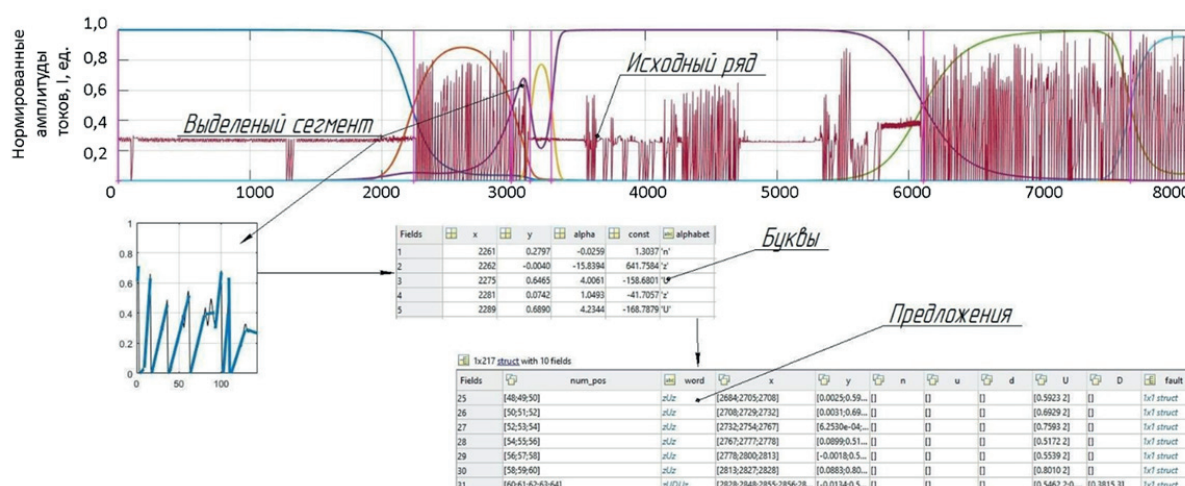


Рис. 4. Пример интерпретации трендов на основании предложенного подхода

Fig. 4 Example of interpretation of trends on the basis of the proposed approach

таблице формируется символьная (буквенно-числовая) интерпретация временной последовательности [22–24]. В качестве разделителей в полученных последовательностях используется буква «z», обозначающая отклонение установки и являющаяся признаком окончания предложений. Далее в рамках полученных предложений проводится объединение повторяющихся букв и удаление малозначительных изменений с целью сокращения размерности полученных выражений и как следствие сокращения словаря характерных шаблонов поведения сигналов (рис. 4).

На основании формирования запроса из словаря проводится поиск характерных комбинаций букв в полученных предложениях. Словарь является набором характерных типов шаблонов, свидетельствующих о потенциальном наличии неисправности, например, шаблон «zUz» характерен для запусков с последующей быстрой остановкой. Для установленных совпадений проводится запись максимального и минимального значений амплитуды, что в дальнейшем используется для интерпретации и поиска неисправностей, согласно разработанным правилам.

#### Обсуждение результатов

В качестве примера интерпретации рассмотрим следующее. На рис. 5 приведены результаты интерпретации показаний токов, полученных при работе УЭЦН в условиях выноса мехпримесей, отказ данной установки произошёл по причине слома вала в одной из секции насоса [21–22]. Как видно из графика, работа установки характеризуется наличием хорошо локализованных «всплесков» значений потребляемого тока.

Для формирования конечного заключения о техническом состоянии установки были использованы «правила» поиска неисправности. В рамках данного примера рассмотрим «правило», указы-

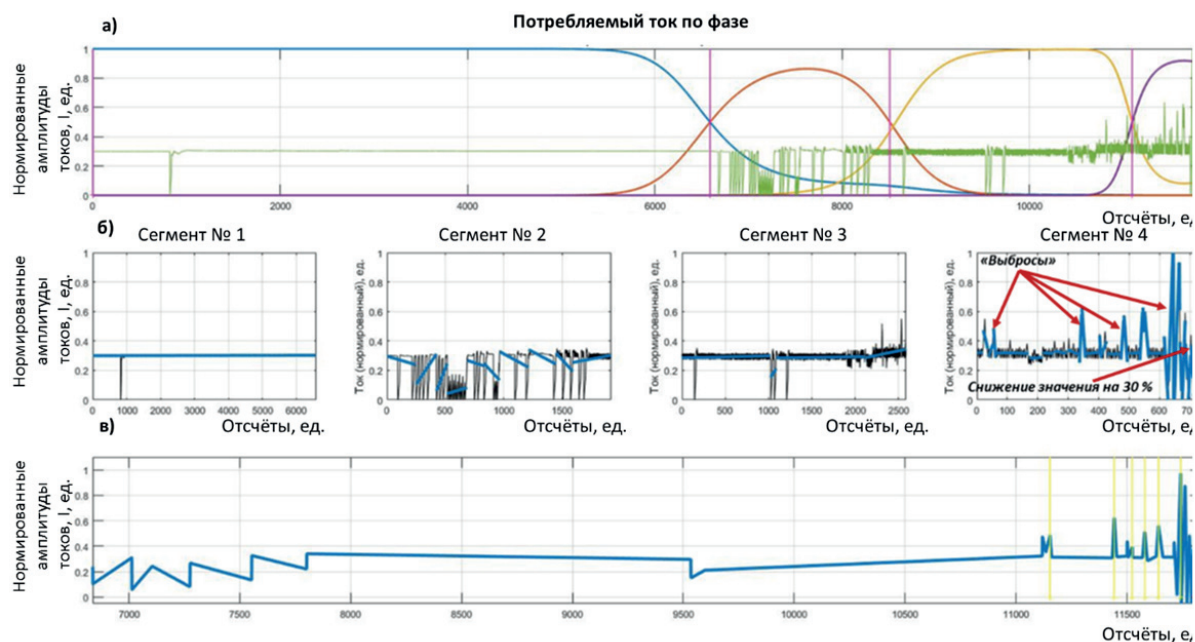
вающее на наличие механических примесей, ниже приведено его эвристическое описание:

- наличие механических примесей в рабочей среде сказывается на поведении значений потребляемого тока погружного электродвигателя, а именно в его временных реализациях зачастую встречаются «выбросы», что связано с «подклиниваем» насоса (рис. 5);
- в районе 11800 отсчёта (красная линия на графике) пусковое значение тока снизились более чем на 30 % от максимального значения, что характерно для случаев, сопряжённых с разрушением элементов трансмиссии (вала, шлицов).

Результатом применения вышеприведённого «правила» стала возможность локализации искомых характерных особенностей сигнала во временной реализации значений потребляемого тока УЭЦН. Для диагностирования иных неисправностей УЭЦН необходимо формирование «правил», отличных от приведённых, что является сложной и нетривиальной задачей. В продолжении работы предполагается модернизация процесса интерпретации путём замещения «строгих» правил на их «нечёткие» аналоги (нечёткая логика) либо анализ на основании математического аппарата искусственной нейронной сети.

#### Выводы

1. Обозначены основные способы реализации процесса контроля технического состояния установок электроцентробежных насосов, установлена необходимость декомпозиции задачи диагностирования на ряд подзадач, а именно автоматическая сегментация, формализация и интерпретация полученных данных об эксплуатации насосной установки.
2. Рассмотрена задача ранжирования изменений в контролируемой системе как задача ограни-



**Рис. 5.** Результаты анализа показаний потребляемого тока при влиянии механических примесей: желтые вертикальные линии – «подклинки», красная вертикальная линия – «слом вала» (частота проведения замеров составляет 0,3 Гц): а) исходные значения нормированного тока по фазе; б) аппроксимация значений тока в рамках выделенных сегментов; в) восстановленный сигнал после аппроксимации с локализацией искомых особенностей сигнала

**Fig. 5.** Results of analysis of current consumption readings under the influence of mechanical impurities: yellow vertical lines are the «wedging»; red vertical line is the «scrapped shaft» (the sampling frequency is 0,3 Hz): а) initial values of the normalized current phase; б) approximation of the current value within the selected segments; в) reconstructed signal after approximating the desired features with localization signal

- ченной кластеризации, позволившая применить подход на основании модифицированного метода Gath–Geva, в которой реализована одновременная идентификация установления гомогенных сегментов и элементов нечёткой логики для их представления в online-режиме.
3. Применённый и настроенный для работы с временными реализациями параметров эксплуатации УЭЦН метод аппроксимации (SWAB) позволил сохранить локальные особенности сигнала, вызванные влиянием осложняющих факторов.
  4. Определён необходимый перечень контролируемых параметров эксплуатации УЭЦН, позволяющий реализовать процесс технического диагностирования.
  5. Предложена символьная (буквенно-числовая) интерпретация временной реализации сигнала, позволившая формировать наборы паттернов

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ямалиев В.У., Салахов Т.Р., Шубин С.С. Применение элементов детерминированного хаоса к решению задач технического диагностирования УЭЦН. // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. – 2014. – № 4. – С. 174–191. URL: <http://ogbus.ru/article/primeneniye-elementov-teorii-determinirovannogo-chaosa-k-resheniyu-zadach-texnicheskogo-diagnosticsirovaniya-uecna-applying-the-elements-of-theory-of-deterministic-chaos-for-the-problem-of-technical-diagnosis/> (дата обращения: 12.12.2017).

их поведения конкретным состояниям контролируемого объекта.

6. Предложенный в работе подход позволил реализовать следующие качественные улучшения по отношению к классическим способам обеспечения контроля за работой УЭЦН:
  - отсутствие необходимости участия эксперта при решении задачи кластеризации;
  - обеспечение адаптивной аппроксимации в рамках выделенных временных участков;
  - возможность реализации интерпретируемых подходов распознавания неисправностей.
7. Установлено, что имеется возможность улучшения процесса идентификации состояний УЭЦН путём замещения «строгих» правил на их «нечёткие» аналоги (нечёткая логика) либо путём использования математического аппарата искусственной нейронной сети.

2. Ямалиев В.У., Салахов Т.Р., Шубин С.С. Оценка технического состояния установок электроцентробежных насосов в процессе эксплуатации методом нейросетевой классификации // Нефтегазовое дело. – 2013. – № 114. – С. 102–109.
3. Устройство для оценки технического состояния установок электроцентробежных насосов в процессе эксплуатации: пат. 2525094 Рос. Федерация: МПК E21B 47/008 № 2013115609/03; заявл. 05.04.2013; опубл. 10.08.2014, Бюл. № 22. – 8 с.
4. Формирование расчетной модели рабочего процесса в ступени электроцентробежного насоса при стендовых испытаниях /

- В.У. Ямалиев, К.В. Литвиненко, Р.И. Валиахметов, С.С. Шубин, А.С. Лякин, И.И. Морозов // Вестник ЦКР Роснедра. – 2015. – № 2. – С. 28–35.
5. Боловин Е.В., Глазырин А.С. Метод идентификации параметров погружных асинхронных электродвигателей установок электроприводных центробежных насосов для добычи нефти // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 1. – С. 123–131.
6. Tkachuk R.Y., Glazyrin A.S., Polishchuk V.I. Induction Motor Drives Parameters Identification Using Genetic Algorithms // 7 International Forum on Strategic Technology (IFOST-2012). – Tomsk, September 18–21, 2012. – Tomsk: TPU Publ. house, 2012. – V. 2. – P. 586–589.
7. Оценка остаточного ресурса изоляции погружного электродвигателя установок электрических центробежных насосов добычи нефти при воздействиях импульсных перенапряжений / В.В. Сушков, В.В. Тимошкин, И.С. Сухачев, С.В. Сидоров // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 10. – С. 74–80.
8. Оптимальное управление многомашинным комплексом системы поддержания пластового давления на нефтяных месторождениях / В.В. Сушков, М.К. Велиев, В.В. Тимошкин, Т.Д. Гладких // Нефтяное хозяйство. – 2017. – № 2. – С. 82–84.
9. Богданов А.А. Погружные центробежные электронасосы. – М.: Готоптехиздат, 1957. – 375 с.
10. Богданов Е.А. Основы технической диагностики нефтегазового оборудования. – М.: Высшая школа, 2006. – 277 с.
11. Modified Gath–Geva clustering for fuzzy segmentation of multivariate time-series / J. Abonyi, B. Feil, N. Sandor, A. Peter // Fuzzy Sets and Systems. – 2005. – № 149. – P. 39–56.
12. Geva A.B. Hierarchical-fuzzy clustering of temporal-patterns and its application for time-series prediction // Pattern Recognition Letters. – 1999. – V. 20 (14). – P. 1519–1532.
13. Kun Yu, Tian Ran Lin, Ji Wen Tan. A bearing fault diagnosis technique based on singular values of EEMD spatial condition matrix and Gath–Geva clustering // Applied Acoustics. – 2017. – V. 121. – P. 33–45.
14. Jianchuan Yin, Nini Wang. An online sequential extreme learning machine for tidal prediction based on improved Gath–Geva fuzzy segmentation // Neurocomputing. – 2016. – V. 174. – P. A. – P. 85–98.
15. Abonyi J. Fuzzy Model Identification for Control. – Cambridge: Birkhauser, 2003. – 239 p.
16. Dobos L., Bankó Z., Abonyi J. Segmentation-based optimal experiment design // 10 International Symposium of Hungarian Researchers on Computational Intelligence and Informatics, CINTI 2009. – Hungary, 2009. – P. 279–288.
17. Integrated Process and Control System Model for Product Quality Control-Application to a Polypropylene Plant / B. Balasko, S. Nemeth, G. Nagy, J. Abonyi // Chemical Product and Process Modeling. – 2008. – V. 3. – P. 1934–2659.
18. Keogh E., Pazzani M.J. An enhanced representation of time series which allows fast and accurate classification clustering and relevance feedback // 4 Int. Conf. on KDD. – USA, 1998. – P. 239–243.
19. An online algorithm for segmenting time series / E. Keogh, S. Chu, D. Hart, M. Pazzani // IEEE Internat. Conf. on Data Mining. – 2001. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/14e8/6f39831e30b4037ab99b5de5e5d86608ea16.pdf> (дата обращения: 12.12.2017).
20. Hu B., Chen Y., Keogh E. Classification of streaming time series under more realistic assumptions // Data Mining and Knowledge Discovery. – 2016. – V. 30 (2). – P. 403–437.
21. Dau H.A., Begum N., Keogh E. Semi-Supervision Dramatically Improves Time Series Clustering under Dynamic Time Warping // Proc. of the 25 ACM International Conference on Information and Knowledge Management. – USA, 2016. – P. 999–1008.
22. Beyond one billion time series: indexing and mining very large time series collections with iSAX2+ / A. Camerra, J. Shieh, T. Palpanas, T. Rakthanmanon, E. Keogh // Knowledge and information systems. – 2014. – V. 39 (1). – P. 123–151.
23. iSAX 2.0: Indexing and mining one billion time series / A. Camerra, T. Palpanas, J. Shieh, E. Keogh // Data Mining (ICDM), 2010 IEEE 10 International Conference. – Australia, 2010. – P. 58–67.
24. Experiencing SAX: a novel symbolic representation of time series / J. Lin, E. Keogh, L. Wei, S. Lonardi // Data Mining and knowledge discovery. – 2007. – V. 15 (2). – P. 107–144.

Поступила 21.12.2017 г.

#### Информация об авторах

**Валиахметов Р.И.**, соискатель кафедры машин и оборудования нефтегазовых промыслов Уфимского государственного нефтяного технического университета.

**Ямалиев В.У.**, доктор технических наук, профессор кафедры машин и оборудования нефтегазовых промыслов Уфимского государственного нефтяного технического университета.

**Шубин С.С.**, кандидат технических наук, соискатель кафедры машин и оборудования нефтегазовых промыслов Уфимского государственного нефтяного технического университета.

**Алфёров А.В.**, соискатель Института механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН,

УДК 622.276.054.23

## APPLICATION OF HEURISTIC ALGORITHMS IN ANALYZING DATA TO SOLVE THE PROBLEM OF DETECTION OF ELECTRIC CENTRIFUGAL PUMPING UNITS

**Rustam I. Valiakhmetov<sup>1</sup>,**  
valiakhmetovri@gmail.com

**Vil U. Yamaliev<sup>1</sup>,**  
rusoil@mail.ru

**Stanislav S. Shubin<sup>1</sup>,**  
shubinss@outlook.com

**Aleksey V. Alferov<sup>2</sup>,**  
aleksey.alferov@gmail.com

<sup>1</sup> Ufa State Petroleum Technological University,  
1, Kosmonavtov Street, Ufa, 450062, Russia.

<sup>2</sup> Mavlyutov Institute of Mechanics,  
71, Oktyabrya avenue, Ufa, 450054, Russia.

*Ensuring effective control and preventing failures of electrical submersible pumps, because of their wide distribution is the relevant and demanded task. The use of automated control systems of electric centrifugal pumping units allows improving the quality and speed of decisions made about their technical condition. All methods of diagnosing the installation of electrical submersible pumps are aimed at monitoring the state of the composite nodes, and are reduced to the analysis of time series, which are the time scans of the operation parameters. Traditionally applied linear methods of time series research in the last decades have been substantially expanded by nonlinear methods, among which heuristic algorithms were developed significantly.*

**The main aim** is to increase the efficiency of determining the technical state of installations of electric centrifugal pumps during operation.

**Methods.** The approach proposed in this paper is based on solving the diagnostic problem by decomposition into the following subtasks: automatic segmentation, formalization and interpretation of the data obtained. Segmentation is considered as a clustering problem, the purpose of which is the establishment of autocorrelation links between the values of the time series with the formation of temporal clusters and adaptive approximation within the established areas while preserving the local features of the signals. For each allocated class of deviations in operation of electric centrifugal pumping units, the decisive rules are formed based on expert knowledge. The main differences from the classical approach to the problem of diagnosis are: the lack of the need for expert participation in solving the clustering problem; providing adaptive approximation within the allocated time intervals; the possibility of implementing interpretable approaches to fault recognition.

**Results.** The authors have proposed the approach based on solving the diagnostic problem by its decomposition into the following subtasks: automatic segmentation, formalization and interpretation of the data obtained. The necessary list of controlled parameters of operation of the electric centrifugal pumping units is determined. The list allows technical diagnosis.

### Key words:

*Pump, centrifugal, diagnostics, analysis, status, statistics, classification.*

### REFERENCES

1. Yamaliev V.U., Salakhov T.R., Shubin S.S. Primenenie elementov teorii determinirovannogo khaosa k resheniyu zadach tekhnicheskogo diagnostirovaniya UECN [Application of the theory of determined chaos for solving the task of ESP technical diagnosis]. *Elektronnyy nauchnyy zhurnal Neftegazovoe delo*, 2014, no. 4, pp. 174–191. Available at: <http://ogbus.ru/article/primenenie-elementov-teorii-determinirovannogo-khaosa-k-resheniyu-zadach-tekhnicheskogo-diagnostirovaniya-uecn> applying-the-elements-of-theory-of-deterministic-chaos-for-the-problem-of-technical-diagnosi/ (accessed 12 December 2017).
2. Yamaliev V.U., Salakhov T.R., Shubin S.S. Otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya ustanovok elektrosentrobezhnykh nasosov v protsesse ekspluatatsii metodom neyrosetevoy klassifikatsii [Estimation of technical state of ESP units in operation by neural network classification]. *Neftegazovoe delo*, 2013, no. 114, pp. 102–109.
3. Yamaliev V.U., Salakhov T.R., Shubin S.S. *Ustroystvo dllya otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya ustanovok jelektrotsentrobezhnykh nasosov v protsesse jekspluatatsii* [Device for estimating technical state of ESP units in operation]. Patent RF, no. 2013115609/03, 2013.
4. Yamaliev V.U., Litvinenko K.V., Valiakhmetov R.I., Shubin S.S., Lyaskin A.S., Morozov I.I. Formirovanie raschetnoy modeli rabocheho protsessa v stupeni elektrosentrobezhnogo nasosa pri stendovykh ispytaniyakh [Formation of design model of operational process in electrical submersible pump step at bench tests]. *Vestnik CKR Rosnedra*, 2015, no. 2, pp. 28–35.
5. Bolovin E.V., Glazyrin A.S. Method for identifying parameters of submersible induction motors of electrical submersible pump units for oil production. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 1, pp. 123–131.
6. Tkachuk R.Y., Glazyrin A.S., Polishchuk V.I. Induction Motor Drives Parameters Identification Using Genetic Algorithms. 7<sup>th</sup> International Forum on Strategic Technology (IFOST-2012). Tomsk, September 18–21, 2012. Tomsk, TPU Publ. house, 2012. Vol. 2, pp. 586–589.

7. Sushkov, V.V., Timoshkin, V.V., Sukhachev, I.S., Sidorov, S.V. Evaluation of submersible electric motor insulation residual resource in oil production electric centrifugal pumps under the influence of impulse overvoltages. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 10, pp. 74–80. In Rus.
8. Sushkov V.V., Veliev M.K., Timoshkin V.V., Gladkih T.D. Optimum control for multiple computer complex of oil field formation pressure maintenance system. *Oil Industry*, 2017, no. 2, pp. 82–84. In Rus.
9. Bogdanov A.A. *Pogruzhnye ctsentrobezhnye jelektronasosy* [Electrical submersible pumps]. Moscow, Gotopetizdat Publ., 1957. 375 p.
10. Bogdanov E.A. *Osnovy tekhnicheskoy diagnostiki neftegazovogo oborudovaniya* [Bases of technical diagnostics of oil-and-gas equipment]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2006. 277 p.
11. Abonyi J., Feil B., Sandor N., Peter A. Modified Gath–Geva clustering for fuzzy segmentation of multivariate time-series. *Fuzzy Sets and Systems*, 2005, no. 149, pp. 39–56.
12. Geva A.B. Hierarchical-fuzzy clustering of temporal-patterns and its application for time-series prediction. *Pattern Recognition Letters*, 1999, vol. 20 (14), pp. 1519–1532.
13. Kun Yu, Tian Ran Lin, Ji Wen Tan. A bearing fault diagnosis technique based on singular values of EEMD spatial condition matrix and Gath–Geva clustering. *Applied Acoustics*, 2017, vol. 121, pp. 33–45.
14. Jianchuan Yin, Nini Wang. An online sequential extreme learning machine for tidal prediction based on improved Gath–Geva fuzzy segmentation. *Neurocomputing*, 2016, vol. 174, P. A, pp. 85–98.
15. Abonyi J. *Fuzzy Model Identification for Control*. Cambridge, Birkhauser, 2003. 239 p.
16. Dobos L., Bankó Z., Abonyi J. Segmentation-based optimal experiment design. *10<sup>th</sup> International Symposium of Hungarian Researchers on Computational Intelligence and Informatics, CINTI 2009*. Hungary, 2009. pp. 279–288.
17. Balasko B., Nemeth S., Nagy G., Abonyi J. Integrated Process and Control System Model for Product Quality Control-Application to a Polypropylene Plant. *Chemical Product and Process Modeling*, 2008, vol. 3, pp. 19342–659
18. Keogh E., Pazzani M.J. An enhanced representation of time series which allows fast and accurate classification clustering and relevance feedback. *4<sup>th</sup> Int. Conf. on KDD*. USA, 1998. pp. 239–243.
19. Keogh E., Chu S., Hart D., Pazzani M. An online algorithm for segmenting time series. *IEEE Internat. Conf. on Data Mining*, 2001. Available at: <https://pdfs.semanticscholar.org/14e8/6f39831e30b4037ab99b5de5e5d86608ea16.pdf> (accessed 12 December 2017).
20. Hu B., Chen Y., Keogh E. Classification of streaming time series under more realistic assumptions. *Data Mining and Knowledge Discovery*, 2016, vol. 30 (2), pp. 403–437.
21. Dau H.A., Begum N., Keogh E. Semi-Supervision Dramatically Improves Time Series Clustering under Dynamic Time Warping. *Proc. of the 25<sup>th</sup> ACM International on Conference on Information and Knowledge Management*. USA, 2016. pp. 999–1008.
22. Camerra A., Shieh J., Palpanas T., Rakthanmanon T., Keogh E. Beyond one billion time series: indexing and mining very large time series collections with iSAX2+. *Knowledge and information systems*, 2014, vol. 39 (1), pp. 123–151.
23. Camerra A., Palpanas T., Shieh J., Keogh E. iSAX 2.0: Indexing and mining one billion time series. *Data Mining (ICDM)*, 2010 IEEE 10<sup>th</sup> International Conference. Australia, 2010. pp. 58–67.
24. Lin J., Keogh E., Wei L., Lonardi S. Experiencing SAX: a novel symbolic representation of time series. *Data Mining and knowledge discovery*, 2007, vol. 15 (2), pp. 107–144.

Received: 21 December 2017.

#### Information about the authors

**Rustam I. Valiakhmetov**, graduate student, Ufa State Petroleum Technological University.

**Vil U. Yamaliev**, Dr. Sc., professor, Ufa State Petroleum Technological University.

**Stanislav S. Shubin**, Cand. Sc., postdoc, Ufa State Petroleum Technological University.

**Aleksey V. Alferov**, graduate student, Mavlyutov Institute of Mechanics.

**Компьютерная верстка** *О.Ю. Аршинова*  
**Корректura и перевод на английский язык** *С.В. Жаркова*  
**Дизайн обложки** *Т.В. Буланова*

Фотографии на обложке взяты из личного архива  
*Валерия Касаткина*

Руководство для авторов и образец оформления статьи: [izvestiya.tpu.ru](http://izvestiya.tpu.ru)

Подписано к печати 20.02.2018. Формат 60х84/8. Бумага «Снегурочка».  
Печать XEROX. Усл. печ. л. 19,54. Уч.-изд. л. 17,67.  
Заказ 32-18. Тираж 500 экз.



**Издательство**

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ