

**ИЗВЕСТИЯ  
ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА  
ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ**

Том 331, № 6, 2020

# ИЗВЕСТИЯ ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА. ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ

## Редакционная коллегия

Семилетов И.П., гл. редактор, д-р геогр. наук (Россия)  
Рихванов Л.П., д-р геол.-минерал. наук (Россия)  
Оствальд Р.В., канд. хим. наук (Россия)  
Савичев О.Г., д-р геогр. наук (Россия)  
Покровский О.С., канд. геол.-минерал. наук (Франция)  
Старостенко В.И., д-р физ.-мат. наук (Украина)  
Конторович А.Э., д-р геол.-минерал. наук (Россия)  
Белозеров В.Б., 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)  
Зиатдинов Р.А., канд. физ.-мат. наук (Южная Корея)  
Спицын В.Г., д-р техн. наук (Россия)  
Муравьев С.В., д-р техн. наук (Россия)  
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)  
Зюзев А.М., д-р техн. наук (Россия)  
Кирьянова Л.Г., 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, 2020

## 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 объектов.

Журнал представляет интерес для геологов, химиков, технологов, физиков, экологов, энергетиков, специалистов по хранению и транспортировке энергоресурсов, ИТ-специалистов, а также ученых других смежных областей.

Тематические направления журнала «Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов»:

- Прогнозирование и разведка георесурсов
- Добыча георесурсов
- Транспортировка георесурсов
- Глубокая переработка георесурсов
- Энергоэффективное производство и преобразование энергии на основе георесурсов
- Безопасная утилизация георесурсов и вопросы геоэкологии
- 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 331, № 6, 2020

**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)  
Belozеров V.B., 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)  
Aleksenko 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)  
Bouznik 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., Cand. Sc. (Russia)  
Glazyrin A.S., managing editor, Dr. Sc. (Russia)

**AIMS AND SCOPES**

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

The journal was founded in 1903.

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

ISSN (print) – 2500-1019

ISSN (on-line) – 2413-1830

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

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

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

- Geo Assets exploration and refining;
- Geo Assets mining and transportation;
- Geo Assets deep processing;
- Energy-efficient production and conversion of energy based on Geo Assets;
- Safe disposal of Geo Assets and Geoecology issues;
- Geo-engineering of Eurasia and marginal sea;
- Economic and social aspects of using Geo Assets.

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 two 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

- Теплофизическое обоснование пиролитической переработки возобновляемой биомассы за счет теплоты разложения  
Астафьев А.В., Табакаев Р.Б., Языков Н.А., Заворин А.С. 7  
**Thermophysical substantiation of renewable biomass pyrolytic processing due to heat decomposition**  
Astafev A.V., Tabakaev R.B., Yazykov N.A., Zavorin A.S.
- Мониторинг состояния растительного покрова территории Центрального Ирака с использованием спутниковых данных Landsat-8  
Токарева О.С., Пасько О.А., Маджид С.М., Кабраль П. 19  
**Monitoring vegetation state in the Central Iraq using Landsat-8 satellite data**  
Tokareva O.S., Pasko O.A., Majid S.M., Cabral P.
- Ископаемые норы *Thalassinoides* в опоках Серовской свиты (среднее Зауралье, верхний палеоцен)  
Трубин Я.С., Ян П.А. 32  
**Fossil traces of *Thalassinoides* from Serov suite gaizes (middle trans-Urals, upper Paleocene)**  
Trubin Ya.S., Yan P.A.
- О законе распределения месторождений углеводородов по массе  
Лившиц В.Р. 41  
**Law of size distribution of oil and gas fields**  
Livshits V.R.
- Вольтамперметрическое определение пероксида водорода с помощью сенсоров на основе наночастиц серебра в объектах техногенного и геологического происхождения  
Перевезенцева Д.О., Горчаков Э.В. 48  
**Voltammetric determination of hydrogen peroxide using sensors based on silver nanoparticles in objects of technogenic and geological origin**  
Perevezentseva D.O., Gorchakov E.V.
- Петрологические аспекты современного островодужного вулканизма на примере лав вулкана Батур (О. Бали, Индонезия)  
Якич Т.Ю., Савинова О.В., Рудмин М.А. 57  
**Petrological features of modern arc volcanism on the example of Batur volcano lavas (Bali island, Indonesia)**  
Yakich T.Yu., Savinova O.V., Rudmin M.A.
- Фазочастотное обнаружение сейсмических сигналов  
Кочегуров А.И., Герингер В. 69  
**Phase-frequency detection of seismic signals**  
Kochegurov A.I., Geringer V.
- Обоснование ресурсоэффективности технологий сжигания водоугольных топлив с добавками биомассы  
Малышев Д.Ю., Сыродой С.В. 77  
**Justification of resource efficiency of the technologies for burning water-coal fuels with biomass additives**  
Malyshev D.Yu., Syrodoiy S.V.
- Минералогические особенности и P-T условия метаморфизма неопротерозойских метаботритов в бассейнах рек Тырада и Малая Кадра, Енисейский Кряж  
Никитин Р.Н. 86  
**Mineralogical features and P-T conditions of metamorphism of neoproterozoic metabasites from the Tyrada and Malaya Kadra river basins, Yenisei Ridge**  
Nikitin R.N.
- Применение технологий глубокого обучения для изучения шлифов на примере Усинского месторождения нефти  
Попов Н.А., Путилов И.С., Гуляева А.А., Винокурова Е.Е. 100  
**Application of deep learning technologies for studying thin sections on the example of Usinsk oil field**  
Popov N.A., Putilov I.S., Gulyaeva A.A., Vinokurova E.V.
- Моделирование динамики теплового режима тупиковых горных выработок с источником выделения теплоты  
Казиков Б.П., Шалимов А.В. 113  
**Simulation of thermal regime dynamics of dead-end mine workings with heat release source**  
Kazakov B.P., Shalimov A.V.
- Расчет PVT-свойств добываемой продукции по длине подъемника  
Яхин А.Р., Назифуллина Л.Х., Газизова Э.Р. 121  
**Calculation of borehole products PVT-properties along the lift length**  
Yakhin A.R., Nazifullina L.Kh., Gazizova E.R.
- Повышение точности краткосрочного прогнозирования электропотребления групп точек поставки электроэнергии гарантирующих поставщиков второго уровня  
Хомутов С.О., Сташко В.И., Серебряков Н.А. 128  
**Improving the accuracy of short-term load forecasting of delivery point cluster of the second level default provider**  
Khomutov S.O., Stashko V.I., Serebryakov N.A.
- Влияние высших гармоник на работу преобразователя частоты в условиях подземного рудника  
Егоров А.Н., Харитонов Я.С., Шевчук В.А., Семёнов А.С. 141  
**Influence of high harmonics on a frequency converter operation in underground mining**  
Egorov A.N., Kharitonov Ya.S., Shevchuk V.A., Semenov A.S.
- Минералого-геохимические особенности халькопирита руд юбилейного Медноколчеданного месторождения (Южный Урал) по данным ЛА-ИСП-МС  
Целуйко А.С., Масленников В.В., Аюпова Н.Р., Масленникова С.П., Артемьев Д.А., Блинов И.А. 152  
**Mineralogical and geochemical features of chalcopyrite from the Yubileynoe massive sulfide deposit (South Urals): LA-ICP-MS data**  
Tseluyko A.S., Maslennikov V.V., Ayupova N.R., Maslennikova S.P., Artemyev D.A., Blinov I.A.
- Особенности оптимизационной задачи на подбор материалов для минимизации потери тепла через плоскую стенку  
Сабденев К.О., Ерзада М. 169  
**Features of optimization problem for selecting materials to minimize heat loss through the wall**  
Sabdenov K.O., Erzada M.
- Механохимическая технология добычи металлов из хвостов обогащения  
Голик В.И., Разоренов Ю.И., Бригида В.С., Бурдзиева О.Г. 175  
**Mechanochemical technology of metal mining from enriching tails**  
Golik V.I., Razorenov Yu.I., Brigida V.S., Burdzieva O.G.

- |   |            |   |
|---|------------|---|
| <b>Перспективы децентрализованных систем электроснабжения постоянного тока с распределённой солнечной генерацией</b><br>Лукутин Б.В., Муравьев Д.И.                                     | <b>184</b> | <b>Prospects for decentralized DC systems with distributed solar generation</b><br>Lukutin B.V., Muravyev D.I.  |
| <b>Технические решения по оценке уровня жидкости в нефтедобывающих и водозаборных скважинах</b><br>Денисламов И.З., Гималтдинов И.К.,<br>Якубов Р.Н., Денисламова А.И.                  | <b>197</b> | <b>Technical solutions for estimating liquid level in oil and water wells</b><br>Denislamov I.Z., Gimaltdinov I.K.,<br>Yakubov R.N., Denislamova A.I.                         |
| <b>Влияние давления на структуру каолинита в огнеупорных глинах Нижне-Увельского месторождения по данным ИК-спектроскопии</b><br>Ситева О.С., Медведева Н.А., Середин В.В., Иванов Д.В. | <b>208</b> | <b>Influence of pressure on kaolinite structure in fire-clays of the Nizhne-Uvelskoe deposit by IR spectroscopy</b><br>Siteva O.S., Medvedeva N.A., Seredin V.V., Ivanov D.V. |

УДК 662.638

## ТЕПЛОФИЗИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПИРОЛИТИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ БИОМАССЫ ЗА СЧЕТ ТЕПЛОТЫ РАЗЛОЖЕНИЯ

**Астафьев Александр Владимирович<sup>1</sup>,**  
ava31@tpu.ru

**Табакаев Роман Борисович<sup>1</sup>,**  
TabakaevRB@tpu.ru

**Языков Николай Алексеевич<sup>2</sup>,**  
yazykov@catalysis.ru

**Заворин Александр Сергеевич<sup>2</sup>,**  
Zavorin@tpu.ru

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

<sup>2</sup> Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН,  
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 5.

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью увеличения доли использования возобновляемых источников энергии в топливно-энергетическом балансе для снижения вредного воздействия на окружающую среду.

**Цель:** оценка возможности пиролиза древесной биомассы и торфа за счет тепловыделения от разложения органической части сырья.

**Объекты:** образцы торфа с двух месторождений Томской области, являющихся перспективными для разработки в энергетических целях, – Суховского и Аркадьевского, а также древесные отходы двух видов – щепы и опилки.

**Методы:** физический эксперимент и дифференциально-термический анализ. Теплофизические характеристики древесной биомассы определены с помощью методик ГОСТ Р 56881-2016, ГОСТ 33503-2015 и ГОСТ Р 55660-2013; теплофизические характеристики торфа – с помощью ГОСТ 11306-2013, ГОСТ 11305-2013 и ГОСТ Р 55660-2013. Теплота сгорания сырья определена на бомбовом калориметре АБК-1 (РЭТ, Россия), элементный состав определен на анализаторе Vario Micro Cube (Elementar, Германия) с учетом содержания диоксида углерода карбонатов, устанавливаемого объемным методом согласно ГОСТ 13455-91.

**Результаты.** Установлены оптимальные параметры пиролизической переработки различных видов биомассы – температура пиролиза и влажность исходного сырья. Оптимальной температурой для пиролиза древесных отходов, доведенных до воздушно-сухого состояния, является 400 °С, при которой суммарный тепловой эффект максимален и составляет 36,3 кДж/кг для опилок и 78,8 кДж/кг для щепы, для суховского торфа при 500 °С суммарный тепловой эффект равен 149,7 кДж/кг. Максимальные значения влажности, обеспечивающие покрытие тепловых затрат за счет теплоты экзотермических реакций, при данных температурах пиролиза составили 10 % для древесных отходов и 14 % для суховского торфа. Величина суммарного теплового эффекта пиролиза аркадьевского торфа даже в сухом состоянии имеет отрицательное значение.

### **Ключевые слова:**

Биомасса, термическая переработка, экзотермические реакции, тепловой эффект, целлюлоза, лигнин.

### **Введение**

Использование традиционных источников, таких как каменный уголь, нефть и природный газ, для получения энергии оказывает негативное влияние на окружающую среду. Основной проблемой являются вредные выбросы, образующиеся при сжигании сырья: согласно экспертной оценке [1], на долю энергетики приходится более половины от всех генерируемых в мире оксидов азота и серы. Постепенно происходит увеличение выбросов углекислого газа – их объем за последние 40 лет вырос в 2 раза [2, 3]. В целом в ходе деятельности энергетического сектора образуется примерно 2/3 мировых выбросов парниковых газов. Такие колоссальные значения связаны с тем, что по разным оценкам от 78 до 86 % глобального энергопотребления обеспечивается ископаемым топливом [3–6]. В целях снижения вредного воздей-

ствия энергетики все более актуальными становятся технологии с использованием возобновляемых источников энергии (ВИЭ), способствующих предотвращению выбросов CO и CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>. В ряде стран с тенденцией к сокращению использования ископаемых топлив и активно развивающихся возобновляемую энергетику (Австрия, Дания, Швеция и др.) наблюдается положительный экологический эффект, отражающийся в снижении выбросов вредных веществ [7].

Одним из наиболее перспективных источников для энергетического использования является биомасса. В ее составе содержится малое количество серы и азота [8–10], что обеспечивает низкий уровень выбросов их оксидов при сжигании, кроме того следует отметить замкнутый цикл углекислого газа при использовании ресурсов биомассы [9, 11]. Это приводит

к тому, что в настоящее время биомасса является четвертым по значению топливом в мире [12], а в развивающихся странах доля ее использования составляет 35 % в общем топливно-энергетическом балансе [13]. Однако из всех видов биомассы для производства топлива используется в основном качественная древесина, применение которой наиболее целесообразно в строительстве, архитектуре, мебельной промышленности и др. С точки зрения энергетического использования могут быть рассмотрены отходы этих видов деятельности – щепа, опилки, стружка и т. п., а также неиспользуемые для производства части дерева (ветки, кора и др.) и перезрелая древесина, представляющая собой перегниваемое сырье, накапливаемое в лесах и на местах производства. Более того, большое количество древесных отходов ухудшает экологическую обстановку и увеличивает пожароопасность лесов, в связи с чем требуется принятие мер по их утилизации. Помимо древесины, значительную долю потенциала растительной биомассы для энергетических целей составляют отходы сельского и лесного хозяйств, при этом их накопление в России увеличилось с 14,3 до 41,5 млн т за период с 2005 по 2017 гг. [14].

В ряде стран, в том числе в России, торф считается медленно возобновляемым источником энергии при условии, что прирост превышает объемы добычи. В связи с тем, что годовой прирост слоя торфа составляет ~1 мм [15], а торфяные месторождения занимают в мире площадь, равную 4 млн км<sup>2</sup> [16], накапливаются большие запасы, требующие эффективного использования. При этом торфяные болота являются одним из основных естественных источников выброса в атмосферу метана [17, 18], оказывающего большее влияние на глобальное потепление по сравнению с CO<sub>2</sub> [19]. Однако в настоящее время в мире добывается лишь ~25 млн т торфа в год, что составляет менее 1 % от мировых запасов [20]. В Российской Федерации, занимающей первое место в мире по запасам и обладающей 175 млрд т торфа (приведенного к влажности 40 %), ежегодная добыча не превышает 1 млн т, а доля в энергобалансе страны составляет лишь 0,1–0,2 % [6, 15, 16, 20]. При этом увеличение использования торфа выгодно не только с точки зрения экологии, но и с точки зрения эффективного землепользования. Рекультивация выработанных торфяных месторождений позволяет использовать земли для сельскохозяйственных нужд, кроме того, в западных странах существуют технологии повторного заболачивания с ускорением роста торфообразования [21].

Причиной низкой вовлеченности биомассы в топливно-энергетический баланс Российской Федерации является рассеянность энергии, заложенной в ее ресурсы, и связанная с этим сложность транспортировки в больших объемах для использования на крупных энергоустановках [22]. Кроме того, биомасса обладает рядом недостатков, среди которых низкая насыпная плотность, склонность к шлакованию [23], высокая влажность (а для торфа и высокая зольность). Среднее значение влажности для древесной биомассы

составляет ~19 % [10], а для отходов преимущественно верхней части дерева может достигать 40–50 % [24]. Влажность торфа в естественном состоянии достигает 95 %, при этом в его сухом остатке может содержаться до 50 % минеральной части [25, 26]. Это приводит к проблемам при сжигании традиционными методами [27, 28]. Помимо этого, торф должен добываться с учетом биосферных функций болот, а также экологических последствий от разработок на окружающую среду [21]. Результатом вышеперечисленного является экономическая неэффективность и во многих случаях невозможность выработки энергии, полученной из растительной биомассы и торфа, конкурировать с выработкой из традиционных источников.

В Российской Федерации проблема использования местных ресурсов биомассы имеет особую актуальность, так как треть от производимого тепла приходится на долю децентрализованного теплоснабжения [29]. В таких районах функционируют малые котельные, работающие в основном на привозном топливе. Дороговизна газификации или поставки угля влечет за собой повышение тарифов, компенсация которого происходит из бюджета администрации района [30, 31]. Повышение эффективности энергетического использования биомассы для получения энергии на местном и региональном уровнях позволит улучшить экологическую обстановку в регионах, снизить зависимость от крупных энергетических компаний и поставок топлива, уменьшив тем самым затраты на производство энергии. Например, в России насчитывается 19 субъектов, обладающих запасами торфа более 1 млрд т [20]. Накопление отходов древесины по оценкам исследователей составляет 35,5 млн м<sup>3</sup> ежегодно, при этом большая их часть сжигается в отвалах либо вывозится на свалки для перегнивания [32]. На сегодняшний день в нескольких областях Российской Федерации введены в эксплуатацию котельные на различных видах торфа (фрезерный, топливные гранулы) [20], также в мире активно развиваются технологии изготовления топливных брикетов из различных древесных отходов [22, 33]. Для брикетирования могут использоваться отходы древесины, локально накапливаемые на деревообрабатывающих предприятиях (опилки, щепа, кора), а также собираемые коммунальными службами (листья). При этом наиболее прочные брикеты получают из опилок или с их добавлением, так как они обладают достаточно высокой насыпной плотностью, а также содержат в своем составе лигнин, выступающий в роли связующего вещества [22].

Одним из наиболее перспективных вариантов повышения энергетической эффективности биомассы является пиролитическая переработка, в результате которой можно получить ценные для энергетики твердые, жидкие и газообразные продукты [34, 35]. На данный момент ведутся исследования пиролиза различных ресурсов биомассы, в том числе в виде смесей [36–38]. Например, совместный пиролиз торфа и опилок способствует уменьшению зольности углеродистого остатка по сравнению с исходным



торфом, а также предотвращению зависания в реакционной зоне пиролизера более легкой фракции опилок [39].

Протекание пиролиза зависит от выбора параметров процесса. В ходе медленного пиролиза (скорость нагрева от 6 до 60 К/мин [40]) преимущественным выходом обладает твердый продукт (углеродистый остаток или полукок), который находит применение во многих областях промышленности. Основными потребителями являются химическая промышленность, вырабатывающая активированный уголь и сорбенты по улавливанию различных вредных выбросов [41, 42], а также энергетическая отрасль – более 50 % древесного угля используется в качестве топлива [12], например, в виде исходного вещества для формирования брикетов [43].

При высоких скоростях нагрева (до 1000 К/с) преобладает выход жидких продуктов (до 80 % от массы сухого сырья) [44]. Несмотря на большое количество химически ценных компонентов в пиролизной жидкости, выделение каждого из них трудозатратно и экономически неэффективно. В связи с этим самый распространенный вариант использования пиролизной жидкости – замена котельному топливу. При этом на сегодняшний день около 75 % биотоплива в мире получают из древесины [22]. Перспективным направлением является производство продуктов для очистки дымовых газов от вредных выбросов. Компанией Dynamotive разработан органический кальциевый продукт под названием BioLime™ для улавливания из газоходов котла оксидов азота и серы, который представляет собой раствор жидких продуктов пиролиза биомассы с известью и обладает большей эффективностью по сравнению с известью [45].

Пиролизный газ является среднекалорийным, так как состоит в основном из негорючего компонента CO<sub>2</sub>, в связи с чем применяется для поддержания процесса пиролиза или получения тепла в этом же производстве [12]. Оптимальной температурой пиролиза для получения газа с наибольшей теплотой сгорания является 500 °С, так как концентрация в нем водорода и углекислого газа невелика по сравнению с концентрацией метана [46].

Предпосылкой к обоснованию применения пиролиза в энергетике является возможность проведения процесса за счет собственных тепловых эффектов разложения. Часть исследователей отмечает протекание экзотермических реакций в отдельных видах органического сырья после нагрева без доступа воздуха до 200 °С [46, 47]. В связи с этим целью настоящей работы является оценка возможности пиролиза древесной биомассы и торфа за счет тепловыделения от разложения органической части сырья.

#### Методика исследования

*Объект исследования.* В работе рассмотрены образцы торфа с двух месторождений Томской области, являющихся перспективными для разработки в энергетических целях [48] – Суховского (~55,5 млн т) и Аркадьевского (~3 млн т), а также древесные отходы двух видов – щепа из различных древесных пород

(сосна, береза, осина и др.) и сосновые опилки, характерные для Сибири в целом. Характеристики сырья исследованы после достижения воздушно-сухого состояния в лабораторных условиях. Зольность и влажность древесных отходов определены согласно ГОСТ Р 56881-2016 и ГОСТ 33503-2015, зольность и влажность торфа – согласно ГОСТ 11306-2013 и ГОСТ 11305-2013. Выход летучих веществ определен согласно ГОСТ Р 55660-2013, теплота сгорания – с помощью бомбового калориметра АБК-1 (РЭТ, Россия). Элементный состав определен на анализаторе Vario Micro Cube (Elementar, Германия) с учетом содержания диоксида углерода карбонатов, устанавливаемого объемным методом согласно ГОСТ 13455-91.

*Дифференциально-термический и гравиметрический анализ.* Термогравиметрический и дифференциально-термический анализы рассматриваемых видов сырья выполнены на микротермоанализаторе STA 449C (Netzsch, Германия) в инертной среде (гелий) с целью имитации условий пиролизической переработки, а также исключения влияния окислительных реакций на результаты исследования. Для анализа использованы пробы, предварительно доведенные до воздушно-сухого состояния. Скорость нагрева составила 10 °С в минуту, что соответствует средней скорости нагрева согласно ГОСТ 3168-93, используемого для определения выхода продуктов полукоксования при медленном типе пиролиза. Медленный тип пиролиза выбран в связи с тем, что в его результате образуется преимущественно углеродистый остаток, а образование полукокса сопровождается реакциями с выделением теплоты [49, 50]. Температурный диапазон эксперимента составил от 20 до 600 °С. Конечная температура выбрана в связи с тем, что до этого значения в сырье завершаются все экзотермические реакции [46].

*Оценка тепловых затрат процесса пиролиза.* Величина тепловых затрат, необходимых для осуществления пиролиза, рассчитывалась по методике, представленной в [51], согласно которой теплота, подведенная к сырью, расходуется на сушку ( $Q_1$ ), нагрев до температуры ( $t_1$ ) начала активного разложения сырья ( $Q_2$ ), образование углеродистого остатка ( $Q_3$ ) и потери с летучими продуктами пиролиза – газом, парами пирогенетической воды и смолы ( $Q_4$ ). За критерий автотермичности принято условие, при котором теплоты экзотермических реакций, протекающих в сырье во время нагрева, достаточно для компенсации вышеперечисленных затрат. Температурные интервалы экзотермических реакций ( $t_{\text{экзо}}^{\text{H}} - t_{\text{экзо}}^{\text{K}}$ ) определены из пиков на кривой ДТА; величина тепловых эффектов на сухую массу сырья ( $Q_{\text{ТЭ}}$ ) – путем сопоставления площадей эндотермического и экзотермического пиков на кривых ДТА. Величина суммарного теплового эффекта ( $\sum Q$ ) отражает разницу между тепловыделением от протекания экзотермических реакций ( $Q_{\text{ТЭ}}$ ) и тепловыми затратами ( $Q_{1-4}$ ). Значения удельной теплоемкости ( $C_{\text{рв}}$ ) определены на анализаторе теплопроводности DLF-1200 (TA Instruments, США), подробная методика представлена в [51]. Теп-

лоёмкость углеродистого остатка принята равной 0,707 кДж/(кг·К) для торфа [52] и 1,7 кДж/(кг·К) для древесных отходов [53].

### Обсуждение результатов

В табл. 1 представлены результаты определения теплотехнических характеристик исследуемого сырья. Следует отметить, что древесные отходы обладают высокой для биомассы теплотой сгорания, торф из-за высокой зольности характеризуется низким ее значением. Высокий выход летучих у всех видов рассматриваемого сырья говорит о слабой термической стойкости органической части сырья и низкой температуре воспламенения, что подтверждается литературными данными. Наименее стойкие к нагреву компоненты древесины, такие как целлюлоза и ксилан, начинают разлагаться уже при температуре 150 °С [12]. Температура начала выхода летучих из торфа составляет ~100 °С [54], а высушенный торф может самовозгораться даже при отрицательных температурах (вплоть до -15 °С) [25].

**Таблица 1.** Теплотехнические характеристики биомассы  
**Table 1.** Thermotechnical characteristics of biomass

Характеристика Characteristic	Характеристика/Characteristic			
	Суховской торф Sukhovskoy peat	Аркадьевский торф Arkadievsky peat	Опилки Sawdust	Щепа Chips
Влажность/Moisture, $W^a$ , %	9,9	9,9	7,0	7,8
Зольность на сухую массу Ash on dry basis, $A^d$ , %	22,8	25,4	1,6	1,9
Выход летучих веществ Yield of volatile substances, $V^{daf}$ , %	74,8	70,7	83,4	81,5
Низшая теплота сгорания, МДж/кг Lower calorific value, $Q_l^t$ , MJ/kg	11,8	11,4	18,1	17,1
Элементный состав на сухую беззольную массу Elemental composition per combustible mass, %				
$C^{daf}$	52,06	53,11	52,50	50,32
$H^{daf}$	6,31	5,90	6,58	6,05
$N^{daf}$	3,58	3,60	0,22	0,24
$S^{daf}$	0,20	0,14	0,00	0,00
$O^{daf}$	37,85	37,25	40,70	43,39
Содержание диоксида углерода карбонатов Carbon dioxide content in the carbonates, $(CO_2)_d^m$ , %	9,82	9,11	–	–

Результаты дифференциально-термического анализа представлены на рис. 1. Согласно полученным кривым определены значения величин, необходимых для расчета тепловых затрат (табл. 2). Температура полного испарения влаги ( $t_d$ ) соответствует окончанию эндотермического пика на кривой ДТА, значение влажности ( $W^a$ ) принято равным убыли массы при этой температуре. Температура начала разложения сырья ( $t_1$ ) соответствует началу увеличения скорости убыли массы.

Расчет тепловых затрат проведен для нескольких температур из интервала  $t_1 - t_p$ . Величина массы полученного углеродистого остатка при температуре  $t_1$

вычислялась путем вычитания из общей массы сырья значения влажности, выход летучих веществ в этот момент принимался равным нулю. Для выбранных температур окончания пиролиза величина массы углеродистого остатка определялась по кривой ТГ (рис. 1), а выход летучих продуктов составлял разницу между значениями массы углеродистого остатка при температурах  $t_1$  и  $t_p$ .

**Таблица 2.** Исходные данные для расчета тепловых затрат  
**Table 2.** Initial data for calculation of thermal consumptions

Топливо Fuel	Характеристика/Characteristic					
	$t_d$ , °С	$W^a$ , %	$t_1$ , °С	$C_{pb}$ , кДж/кг kJ/kg	$t_{exo}^s - t_{exo}^f$ , °С	$Q_{TЭ}/Q_{ТЕ}$ , кДж/кг kJ/kg
Опилки Sawdust	110	8	230	2,377	240–550	1062
Щепа/Chips	110	6	230	2,292	240–570	1103
Аркадьевский торф Arkadievsky peat	105	6	180	1,486	200–570	393
Суховской торф Sukhovskoy peat	105	7	180	1,624	200–530	862

Результаты расчетов тепловых затрат представлены в табл. 3, 4. Следует отметить, что значение теплоты, необходимое для нагрева до температуры начала активного разложения сырья ( $Q_2$ ) для древесных отходов вдвое больше, чем для торфа. Это связано с большей теплоемкостью древесины, что обусловлено химическим составом сырья – древесина содержит в своем составе большее количество органических веществ (табл. 1), которые обладают более высоким значением удельной теплоемкости по сравнению с минеральными [55, 56], содержание которых выше в торфе. Кроме того, влияние на величину  $Q_2$  оказывает различие в компонентных составах торфа и древесных отходов. Древесина примерно на треть состоит из лигнина [57] по сравнению с торфом, содержащим менее 10 % [58]. Это подтверждается результатами материального баланса различных видов биомассы [59], из которых видно, что максимальный выход смолы, являющейся продуктом термического разложения лигнина [39], свойственен древесным отходам. Так как лигнин является наиболее термически стойким компонентом, укрепляющим стенки клеток растений [39, 60], то для начала активного разложения древесного сырья требуется нагрев до большей температуры. В связи с этим  $t_1$  при переработке древесных отходов на 50 °С выше, чем аналогичная величина при переработке торфа (рис. 1, табл. 2). Щепа и опилки начинают активно разлагаться после нагрева до 230 °С (рис. 1 в, г) и до 400 °С теряют основную часть массы. Это может быть связано с тем, что в данном температурном диапазоне совместно разлагаются все основные компоненты древесины – целлюлоза, гемицеллюлоза и лигнин [61]. Выход летучих из торфа начинается практически сразу после удале-

ния влаги, после чего происходит равномерная потеря массы до окончания нагрева (рис. 1, а, б). Величина теплоты на образование углеродистого остатка ( $Q_3$ ) при переработке древесины также имеет большее значение по сравнению с торфом, так как выше теп-

лоемкость углеродистого остатка. Потери с летучими продуктами ( $Q_4$ ) до температуры 300 °С больше при пиролизе торфа, при нагреве выше этой температуры больше выход летучих и, соответственно, теплота, уходящая с ними, для щепы и опилок.

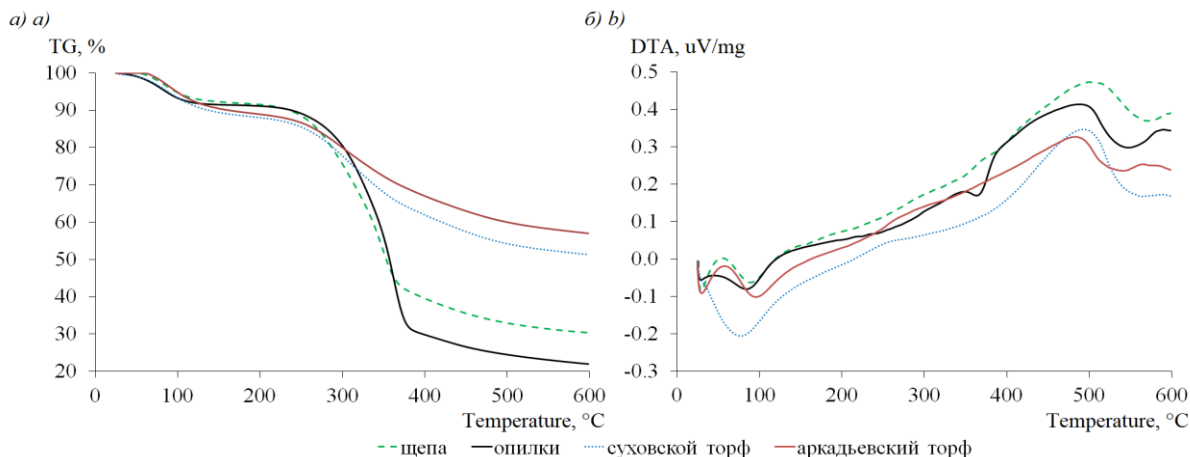


Рис. 1. Результаты термогравиметрического (а) и дифференциально-термического (б) анализа исследуемого сырья  
 Fig. 1. Results of thermogravimetric (a) and differential thermal (b) analysis of raw material

Таблица 3. Тепловые затраты на осуществление пиролиза древесных отходов (опилок/щепы)

Table 3. Thermal consumptions for pyrolysis of wood waste (sawdust/chips)

Температура окончания разложения Temperature of decomposition ending, $t_p$ , °C	Тепловые затраты на осуществление пиролиза, кДж/кг Thermal consumptions for pyrolysis, kJ/kg			
	$Q_1$	$Q_2$	$Q_3$	$Q_4$
300	210,8/158,1	459,3/452,5	93,3/99,0	5,2/3,9
350	210,8/158,1	459,3/452,5	137,0/138,1	33,0/39,6
380	210,8/158,1	459,3/452,5	143,1/160,6	71,7/63,1
400	210,8/158,1	459,3/452,5	159,5/178,6	85,1/76,1
420	210,8/158,1	459,3/452,5	176,1/197,4	98,7/88,5
450	210,8/158,1	459,3/452,5	200,4/225,0	120,1/108,2
500	210,8/158,1	459,3/452,5	241,8/269,7	156,4/143,9
550/570	210,8/158,1	459,3/452,5	282,8/334,1	194,6/194,3

Таблица 4. Тепловые затраты на осуществление пиролиза торфа (суховского/аркадьевского)

Table 4. Thermal consumptions for pyrolysis of peat (sukhovskoy/arkadyevsky)

Температура окончания разложения Temperature of decomposition ending, $t_p$ , °C	Тепловые затраты на осуществление пиролиза, кДж/кг Thermal consumptions for pyrolysis, kJ/kg			
	$Q_1$	$Q_2$	$Q_3$	$Q_4$
300	183,0/156,8	241,7/223,6	67,3/69,4	14,2/12,9
350	183,0/156,8	241,7/223,6	90,0/94,1	33,6/29,2
400	183,0/156,8	241,7/223,6	112,1/117,7	55,7/49,1
450	183,0/156,8	241,7/223,6	133,6/140,9	80,8/71,4
480	183,0/156,8	241,7/223,6	146,0/154,5	97,9/85,9
500	183,0/156,8	241,7/223,6	154,6/163,8	108,4/95,6
530/570	183,0/156,8	241,7/223,6	168,0/196,3	123,7/130,0

Основываясь на результатах расчета (табл. 3, 4) и ДТА-анализа (рис. 1) построены температурные зависимости суммарных тепловых эффектов процесса

пиролиза исследуемого сырья (рис. 2). Теплового эффекта при пиролизе аркадьевского торфа из-за его малой величины недостаточно для покрытия тепловых затрат во всем рассматриваемом температурном интервале. Наибольшие значения теплоты в ходе переработки древесины можно получить при температуре 400 °С – 36,3 кДж/кг для опилок и 78,8 кДж/кг для щепы. Для суховского торфа максимальное значение (149,7 кДж/кг) достигается при 500 °С. Это объясняется разным механизмом разложения древесного сырья и торфа и протекания экзотермических реакций в ходе процесса. Как видно из рис. 2, а, величина теплового эффекта пиролиза древесины резко увеличивается при нагреве до 400 °С, после чего изменяется незначительно. Выделение теплоты при разложении суховского торфа происходит практически линейно (рис. 2, б) в интервале всего экзотермического пика разложения сырья (200–530 °С).

Различия связаны с тем, что основные экзотермические реакции разложения древесины заканчиваются до температуры 400 °С, после чего в величину теплового эффекта вносит вклад лишь распад лигнина, а масса сырья изменяется незначительно. Торф обладает более сложным составом [25], в который в зависимости от типа образования и степени разложения входят легкогидролизуемые вещества (25–47 %), гуминовые и фульвовые кислоты (31–68 %), а также в меньшем количестве битумы, водорастворимые вещества, лигнин и целлюлоза [58, 62, 63]. В связи с многокомпонентным составом разложение сырья происходит равномерно во всем исследуемом температурном интервале (рис. 1, б). При этом практически все компоненты, входящие в состав торфа (за исключением битумов), разлагаются с выделением теплоты: до 400 °С гуминовые кислоты, водорастворимые и легкогидролизуемые соединения, после 400 °С – лигнин и негидролизуемый

остаток [64]. Однако из-за низинного типа образования суховского торфа [65] и, как следствие, высокой зольности (22,8 %) величина теплового эффекта составляет меньшее значение по сравнению с древесными отхо-

дами. Несмотря на это, из-за меньших тепловых затрат, необходимых для осуществления пиролиза суховского торфа, величина  $\sum Q$  имеет большее значение, чем для пиролиза древесных отходов.

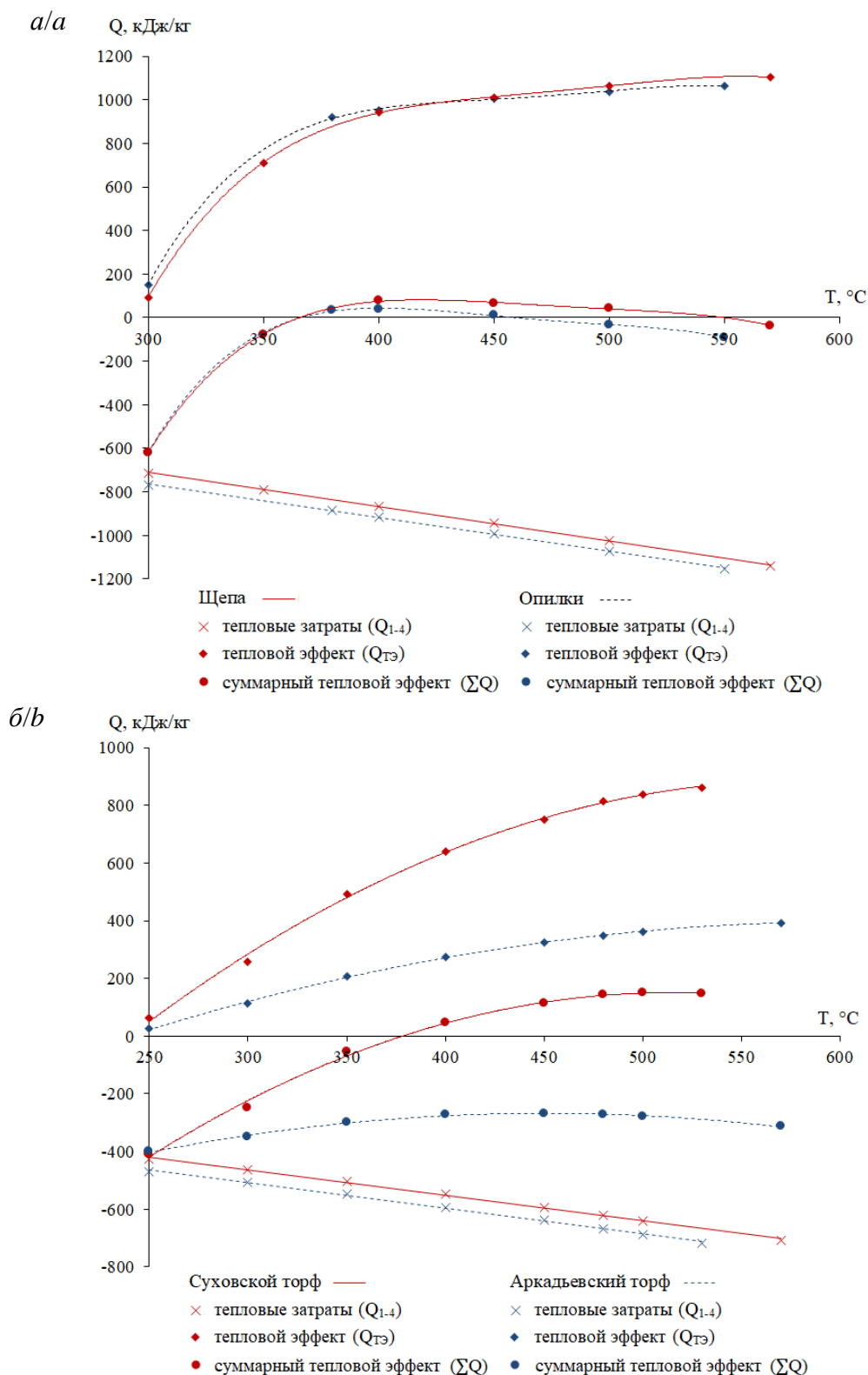


Рис. 2. Зависимость суммарного теплового эффекта пиролиза от температуры процесса для древесных отходов (а) и торфа (б) при значениях влажности  $W^a$

Fig. 2. Dependence of the total heat effect from pyrolysis on temperature for wood waste (a) and peat (b) at moisture values  $W^a$

Ранее в работе [59] показано, что немаловажным фактором, оказывающим влияние на протекание процесса пиролиза, является влажность перерабатываемого сырья. Предварительная сушка биомассы позволяет варьировать выход продуктов пиролиза – при уменьшении влажности акцент смещается от образования жидких и газообразных к твердым продуктам [40, 66]. Исследование оптимальных значений влажности, при которых пиролитическая переработка биомассы наиболее эффективна, упоминается во многих работах [9–11, 40, 65, 66]. Согласно [40], биомассе с содержанием влажности выше 30 % неэффективно использовать в целях пиролиза, так как при ее переработке уменьшается скорость нагрева, что приводит к увеличению времени протекания процесса. Более того, использование высоковлажной биомассы увеличивает расход топлива и снижает КПД пиролизных установок [66].

Для изучения горения топлив за счет тепловыделения от разложения наиболее наглядным методом считается треугольник Таннера, связывающий три ключевых параметра в составе сырья – содержание горючих веществ, влажность и зольность. Так, органический топливный эффект  $Q$ , кДж/кг

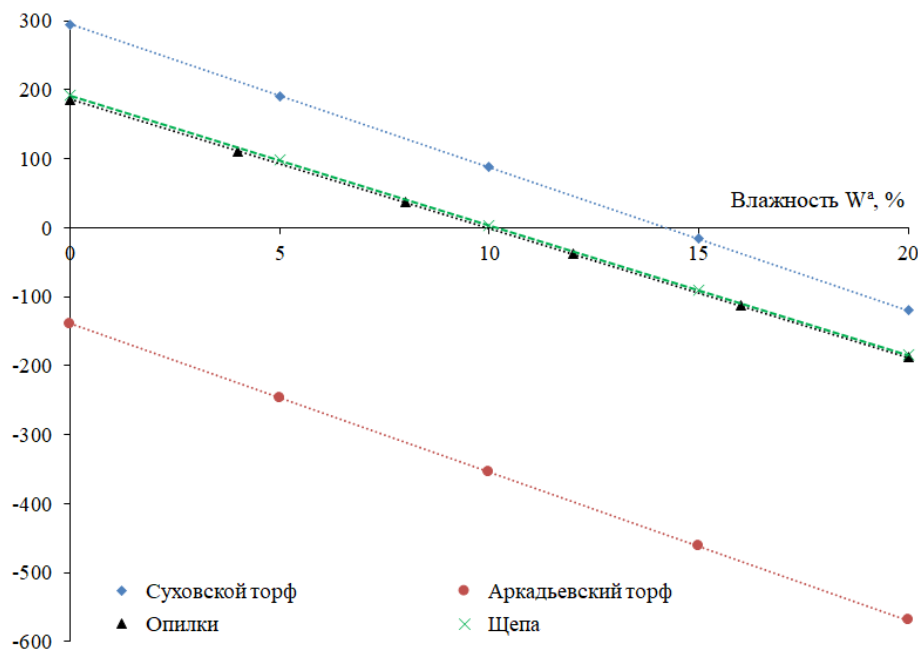


Рис. 3. Зависимость суммарного теплового эффекта пиролиза от влажности исходного сырья  
Fig. 3. Dependence of the total heat effect on moisture of raw material

### Заключение

Результаты расчета тепловых затрат и оценки тепловых эффектов разложения сырья позволили определить оптимальные параметры пиролитической переработки различных видов биомассы – температуру пиролиза и влажность исходного сырья. Наиболее перспективным является медленный тип пиролиза, позволяющий получить максимальный выход углеродистого остатка, образование которого сопровождается реакциями с выделением теплоты.

ническое топливо может самопроизвольно поддерживать процесс горения без подвода внешней теплоты при содержании в составе более 25 % горючих, влажности и зольности – менее 50 и 60 % [67]. Аналогично данному методу могут быть получены значения для пиролитической переработки за счет собственного тепловыделения. В связи с чем при температурах, позволяющих достичь максимального суммарного теплового эффекта, произведена оценка влияния влажности на возможность организации процесса пиролиза в автотермическом режиме. Полученные результаты представлены на рис. 3.

Тепловые затраты пиролиза суховского торфа могут быть покрыты при влажности исходного сырья менее 14 %, для древесных отходов значение максимальной влажности для теоретически возможной переработки за счет собственного тепловыделения составляет ~10 %. Аркадьевский торф даже в сухом состоянии невозможно переработать за счет тепловых эффектов разложения, в связи с чем необходимо покрытие части тепловых затрат с помощью внешнего источника. Один из вариантов – использование теплоты сгорания получаемых в ходе пиролиза продуктов.

Оптимальной температурой для пиролиза древесных отходов является 400 °С, при которой суммарный тепловой эффект максимален и составляет 36,3 кДж/кг для опилок и 78,8 кДж/кг для щепы, для суховского торфа при 500 °С суммарный тепловой эффект равен 149,7 кДж/кг. Большая величина для суховского торфа связана с тем, что тепловые затраты на организацию его пиролитической переработки приблизительно в 1,5 раза меньше по сравнению с переработкой древесины. Это связано с меньшей теплоемкостью исходного торфа и углеродистого остатка

из него, а также более низким выходом летучих продуктов. Максимальные значения влажности, обеспечивающие покрытие тепловых затрат за счет теплоты экзотермических реакций, при оптимальных температурах пиролиза составили 10 % для древесных отходов и 14 % для суховского торфа. Процесс пиролиза даже сухого аркадьева торфа невозможно организовать за счет тепловых эффектов разложения в связи с малой величиной тепловыделения (393 кДж/кг) и высокой зольностью (25,4 %). В качестве внешнего источника для покрытия тепловых затрат может быть

использована теплота от сжигания продуктов пиролиза или части исходного сырья.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Национального исследовательского Томского политехнического университета (ВИУ-НОЦ И.Н. Бутакова-101/2019), аналитическая часть выполнена на приборной базе ФГБУН Федеральный исследовательский центр «Институт катализа им. Г.К. Борескова Сибирского отделения Российской академии наук» в рамках государственного задания (проект № АААА-А17-117041710075-0).*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. World Energy Outlook Special Report. Energy and Air Pollution. – Paris: International Energy Agency Publ., 2016. – 9 p.
2. The proportionality of global warming to cumulative carbon emissions / H.D. Matthews, N.P. Gillett, P.A. Stott, K. Zickfeld // Nature. – 2009. – V. 459. – P. 829–832.
3. Сидорович В. Мировая энергетическая революция. Как возобновляемые источники энергии изменят наш мир. – М.: Альпина Паблишер, 2015. – 208 с.
4. Попель О.С., Фортос В.Е. Возобновляемая энергетика в современном мире. – М.: Издательский дом МЭИ, 2015. – 450 с.
5. Statistics of International Energy Agency. URL: <https://www.iea.org/statistics/?country=WORLD&year=2016&category=Energy%20supply&indicator=TPEsbySource&mode=chart&dataTable=BALANCES> (дата обращения: 23.08.2019).
6. Тимохов В.М., Жизнин С.З. Ресурсы мировой энергетики // Вестник Московского гуманитарно-экономического института. – 2018. – № 2. – С. 115–124.
7. Ермоленко Г.В. и др. Справочник по возобновляемой энергетике европейского союза. – М.: Институт энергетики НИУ ВШЭ, 2016. – 96 с.
8. Dhyani V., Bhaskar T. A comprehensive review on the pyrolysis of lignocellulosic biomass // Renewable energy. – 2018. – V. 129. – P. 695–716.
9. A review on biomass as a fuel for boilers / R. Saidur, E.A. Abdelaziz, A. Demirbas, M.S. Hossaina, S. Mekhilef // Renewable and sustainable energy reviews. – 2011. – V. 15. – P. 2262–2289.
10. An overview of the chemical composition of biomass / S.V. Vassilev, D. Baxter, L.K. Andersen, C.G. Vassileva // Fuel. – 2010. – V. 89. – P. 913–933.
11. McKendry P. Energy production from biomass. P. 1: overview of biomass // Bioresource Technology. – 2002. – V. 83. – P. 37–46.
12. Терентьева Э.П., Удовенко Н.К., Павлова Е.А. Комплексная химическая переработка древесины. – СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2016. – 74 с.
13. Вафина Ю.А. Энергосбережение за счет использования альтернативных источников энергии и вторичных энергоресурсов: Россия и мировой опыт // Вестник Казанского технологического университета. – 2012. – Т. 15. – № 9. – С. 265–272.
14. Лайкам К.Э. и др. Охрана окружающей среды в России: Статистический сборник. – М.: Росстат, 2018. – 125 с.
15. Перспективы использования торфа и продуктов его переработки в коммунальной энергетике сельских и отдаленных районов / Е.А. Медведева, Ю.Н. Женихов, И.В. Урванцев, В.Е. Цыба // Теплоэнергетика. – 2017. – № 6. – С. 14–21.
16. Михайлов А.В. Развитие глобального рынка торфа // Труды Инсторфа. – 2018. – № 18 (71). – С. 3–7.
17. Паников Н.С. Таежные болота – глобальный источник атмосферного метана // Природа. – 1995. – № 6. – С. 14–25.
18. Deer peat warming increases surface methane and carbon dioxide emissions in a black spruce-dominated ombrotrophic bog / A.L. Gill, M.-A. Giasson, R. Yu, A.C. Finzi // Global change biology. – 2017. – V. 23. – Iss. 12. – P. 5398–5411.
19. Суворов Г.Г., Чистотин М.В., Сирин А.А. Влияние растительности и режима увлажнения на эмиссию метана из осушенной торфяной почвы // Агрохимия. – 2010. – № 12. – С. 37–45.
20. Потенциал и возможности использования торфа. Некоммерческое партнерство «Российское торфяное и биоэнергетическое общество». URL: [http://rostorf.ru/files/prezentaciya\\_universal.pdf](http://rostorf.ru/files/prezentaciya_universal.pdf) (дата обращения: 26.08.2019).
21. Родионов В.З. Разработка торфяных месторождений в Ленинградской области (проблемы и решения) // Региональная экология. – 2017. – № 3 (49). – С. 59–64.
22. Получение топливных брикетов из растительной биомассы / Д.Е. Ушаков, Д.В. Карелин, А.Л. Бычков, О.П. Коробейничев, А.Г. Шмаков // Химия твердого топлива. – 2017. – № 4. – С. 46–50.
23. Алехнович А.Н., Богомолов В.В., Артемьева Н.В. Совместное факельное сжигание биомассы с углем // Теплоэнергетика. – 2001. – № 2. – С. 26–33.
24. Роддатис К.Ф., Полтарецкий А.Н. Справочник по котельным установкам малой производительности. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 488 с.
25. Торф: возгорание торфа, тушение торфяников и торфокомпозиции / Л.Б. Хорошавин, О.А. Медведев, В.А. Беляков, Е.В. Михеева, В.С. Руднов. – М.: МЧС России. ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2013. – 256 с.
26. Штин С.М. Применение торфа как топлива для малой энергетики // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – № 7. – С. 82–96.
27. Mostafa F. Process optimization of gasification of peat // Modern problems of science and education. – 2015. – V. 1–2. – P. 1–7.
28. Боднар Л.А., Ткаченко С.И., Дахновская О.В. Проблемы сжигания низкосортного топлива в котлах малой мощности // Научные труды Винницкого национального технического университета. – 2012. – № 4. – С. 1–7.
29. Гашо Е.Г., Пузаков В.С., Степанова М.В. Резервы и приоритеты теплоэнергоснабжения российских городов в современных условиях. – М.: ИПП РАН, 2015. – 97 с.
30. Чайка Л.В. Региональное управление развитием систем энергоснабжения европейского севера России // Энергетическая политика. – 2016. – № 5. – С. 35–43.
31. Чаплыгина М.А., Белоусов Р.С. Мировой опыт автономного энергоснабжения для российской глубинки // Аллея науки. – 2017. – Т. 2. – № 16. – С. 464–474.
32. Мохирев А.П., Безруких Ю.А., Медведев С.О. Переработка древесных отходов предприятий лесопромышленного комплекса, как фактор устойчивого природопользования // Инженерный вестник Дона. – 2015. – № 2. – Ч. 2. – С. 1–13.
33. Recent developments in biomass pelletization – a review / W. Stelte, A.R. Sanadi, L. Shang, J.K. Holm, J. Ahrenfeldt, U.B. Henriksen // Bioresources. – 2012. – V. 7. – № 3. – P. 4451–4490.
34. Kan T., Strezov V., Evans T.J. Lignocellulosic biomass pyrolysis: a review of product properties and effects of pyrolysis parameters // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2016. – V. 57. – P. 1126–1140.
35. Thermal enrichment of different types of biomass by low-temperature pyrolysis / R.B. Tabakaev, K.T. Ibraeva, A.V. Astafev, Yu.V. Dubinin, N.A. Yazykov, A.S. Zavorin, V.A. Yakovlev // Fuel. – 2019. – V. 245. – P. 29–38.
36. Получение газообразных продуктов при пиролизе биомассы микроводорослей / Н.И. Чернова, С.В. Киселева, О.М. Ларина, Г.А. Сычев // Альтернативная энергетика и экология. – 2018. – № 31–36. – С. 23–34.
37. Mohan D., Pittman C.U., Steele P.H. Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: a critical review // Energy & Fuels. – 2006. – V. 20. – № 3. – P. 848–889.
38. TG-FTIR-MS study of pyrolysis products evolving from peat / J.L. Yang, H.X. Chen, W.T. Zhao, J.J. Zhou // Journal of analytical and applied pyrolysis. – 2016. – V. 117. – P. 296–309.

39. Перспективы энерготехнологического использования биомассы в Беларуси / И.И. Лиштван, В.М. Дударчик, В.М. Крайко, Е.В. Ануфриева, Е.А. Смолячкова // Химия твердого топлива. – 2017. – № 5. – С. 15–23.
40. Tripathi M., Sahu J.N., Ganesan P. Effect of process parameters on production of biochar from biomass waste through pyrolysis // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2016. – V. 55. – P. 467–481.
41. Influence of pyrolysis temperature on biochar property and function as a heavy metal sorbent in soil / M. Uchimiya, L.H. Wartelle, K.T. Klason, C.A. Fortier, I.M. Lima // Journal of agricultural and food chemistry. – 2011. – V. 59. – № 6. – P. 2501–2510.
42. Влияние модификаторов на структурные особенности углеродсодержащих композиционных материалов при карбонизации древесины сосны / С.И. Цыганова, Е.В. Мазурова, Г.Н. Бондаренко, О.Ю. Фетисова // Химия растительного сырья. – 2016. – № 4. – С. 143–150.
43. Thermal processing of biomass into high-calorific solid composite fuel / R.B. Tabakaev, I.I. Shanenkov, A.V. Kazakov, A.S. Zavorin // Journal of analytical and applied pyrolysis. – 2017. – V. 124. – P. 94–102.
44. Башкиров В.Н., Бикбулатова Г.М., Гатауллина А.А. Перспективы промышленного использования жидких продуктов быстрого пиролиза растительной биомассы // Евразийское научное объединение. – 2018. – № 12-3 (46). – С. 207–210.
45. Simultaneous SO<sub>x</sub>/NO<sub>x</sub> emission control with Biolime™ derived from biomass pyrolysis oil / K.H. Oehr, J. Zhou, G.A. Simons, M. Wójtowicz // Developments in thermochemical biomass conversion. – 1997. – V. 1–2. – P. 1477–1481.
46. Таймаров М.А., Лавирко Ю.В. Теплогенерирующий агрегат с выработкой пиролизного газа // Известия КГАСУ. – 2017. – № 3 (41). – С. 158–166.
47. Левин Э.Д. Причины, обуславливающие знак и величину теплового эффекта пиролиза древесины // Химия древесины. – 1969. – № 4. – С. 143–148.
48. Геоинформационная система «Возобновляемые источники энергии в Томской области». URL: <http://green.tsu.ru/tomres> (дата обращения: 20.08.2019).
49. Formation of charcoal from biomass in a sealed reactor / W.S.L. Mok, M.G. Antal, P. Szabo, G. Varhegyi, B. Zelei // Industrial & Engineering Chemistry. – 1992. – V. 31. – P. 1162–1166.
50. Thermal effects during biomass pyrolysis / L. Basile, A. Tugnoli, C. Stramigioli, V. Cozzani // Thermochimica Acta. – 2016. – V. 636. – P. 63–70.
51. Исследование тепловых эффектов пиролиза соломы для оценки возможности его реализации в автотермическом режиме / А.В. Астафьев, Р.Б. Табакаев, Д.Е. Мусафиров, А.С. Заворин, Ю.В. Дубинин, Н.А. Языков, В.А. Яковлев // Химия растительного сырья. – 2019. – № 2. – С. 271–280.
52. Кулеш Р.Н. Теплоассоциация при зажигании и горении массива торфа: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2010. – 19 с.
53. Heat capacity measurements of various biomass types and pyrolysis residues / C. Dupont, R. Chiriac, G. Gauthier, F. Toche // Fuel. – 2014. – V. 115. – P. 644–651.
54. Кафедра ЮНЕСКО «Энергосбережение и возобновляемые подходы энергии». Топливо и его использование. URL: <https://en.ppt-online.org/304929> (дата обращения: 27.08.2019).
55. Кикоин И.К. Таблицы физических величин. Справочник. – М.: Атомиздат, 1976. – 1008 с.
56. Термодинамические свойства неорганических веществ / У.Д. Верятин, В.П. Маширев, Н.Г. Рязцев, В.И. Тарасов. – М.: Атомиздат, 1965. – 461 с.
57. Тепловыделение при горении древесины / Б.Б. Серков, А.Б. Сивенков, Д.Т. Буй, Р.М. Асеева // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. – 2003. – № 5. – С. 74–79.
58. Архипов В.С., Маслов С.Г. Состав и свойства типичных видов торфа центральной части Западной Сибири // Химия растительного сырья. – 1998. – № 4. – С. 9–16.
59. Autothermal pyrolysis of biomass due to intrinsic thermal decomposition effects / A.V. Astafev, R.B. Tabakaev, Yu.V. Dubinin, N.A. Yazykov, V.A. Yakovlev, A.S. Zavorin // Journal of thermal analysis and calorimetry. – 2018. – V. 134. – № 2. – P. 1045–1057.
60. Demirbas A. Mechanisms of liquefaction and pyrolysis reactions of biomass // Energy Conversion & Management. – 2000. – V. 41. – P. 633–646.
61. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis / H. Yang, R. Yan, H. Chen, D.H. Lee, C. Zheng // Fuel. – 2007. – V. 86. – P. 1781–1788.
62. Ларина Г.В., Иванов А.А., Казанцева Н.А. Групповой состав органического вещества торфов Горного Алтая и некоторые структурные характеристики гуминовых кислот // Вестник ТГПУ. – 2009. – № 3 (81). – С. 110–115.
63. Чухарева Н.В. Исследование группового состава торфов месторождений Томской области // Вестник КрасГАУ. – 2013. – № 7. – С. 65–71.
64. Лобзин В.И., Смолянинов С.И. Некоторые особенности термического разложения торфа // Известия Томского политехнического института. – 1974. – Т. 198. – С. 38–40.
65. Бородина Т.А., Дроздова Н.А. Состояние торфяных ресурсов Томской области и направления их использования в сельском хозяйстве // Проблемы современной аграрной науки: материалы международной заочной научной конференции. – Красноярск: КГАУ, 2017. – С. 104–108.
66. Процесс пиролиза биомассы как источник получения альтернативного топлива / В.М. Капустин, Е.А. Чернышева, Ю.В. Кожевникова, В.Ю. Асаула // Технологии нефти и газа. – 2011. – № 3 (74). – С. 31–35.
67. Characterization of Singapore RDF resources and analysis of their heating value / L. Zhao, A. Giannis et al. // Sustainable Environment Research. – 2016. – V. 26. – P. 51–54.

Поступила 02.12.2019 г.

#### Информация об авторах

**Астафьев А.В.**, аспирант научно-образовательного центра И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Табакаев Р.Б.**, кандидат технических наук, научный сотрудник научно-образовательного центра И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Языков Н.А.**, кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории каталитических процессов переработки возобновляемого сырья Института катализа им. Г.К. Борескова СО РАН.

**Заворин А.С.**, доктор технических наук, заведующий кафедрой – руководитель научно-образовательного центра И.Н. Бутакова на правах кафедры Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета

UDC 662.638

## THERMOPHYSICAL SUBSTANTIATION OF RENEWABLE BIOMASS PYROLYTIC PROCESSING DUE TO HEAT DECOMPOSITION

**Alexander V. Astafev<sup>1</sup>,**  
ava31@tpu.ru

**Roman B. Tabakaev<sup>1</sup>,**  
TabakaevRB@tpu.ru

**Nikolay A. Yazykov<sup>2</sup>,**  
yazykov@catalysis.ru

**Alexander S. Zavorin<sup>1</sup>,**  
Zavorin@tpu.ru

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

<sup>2</sup> Borekov Institute of Catalysis SB RAS,  
5, Acad. Lavrentiev avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

**The relevance** of the research is caused by the need of renewable energy sources share increase in the fuel and energy balance to reduce harmful impact on the environment.

**The main aim** of the research is to evaluate the possibility of woody biomass and peat pyrolysis due to heat from the organic part decomposition of the raw material.

**Objects:** peat samples from two deposits of the Tomsk region, promising for energy development, – Sukhovskoy and Arkadievskoy, as well as wood waste of two types – chips and sawdust.

**Methods:** physical experiment and differential thermal analysis. Thermotechnical characteristics of woody biomass determined by the methods SS R 56881-2016, SS 33503-2015 and SS R 55660-2013; thermal characteristics of peat – using the SS 11306-2013, SS 11305-2013 and SS R 55660-2013. Calorific value of raw materials determined in the bomb calorimeter ABK-1 (RET, Russia), the elemental composition is determined by the analyser Vario Micro Cube (Elementar, Germany) taking into account the carbon dioxide content of the carbonates, established by volumetric method according to SS 13455-91.

**Results.** The authors have established the optimal parameters of pyrolytic processing for various types of biomass, such as pyrolysis temperature and moisture of the raw material. The optimum temperature for pyrolysis of wood waste in the air-dry state is 400 °C, at which the total thermal effect is maximum and equal to 36,3 kJ/kg for sawdust and 78,8 kJ/kg for wood chips, for sukhovskoy peat at 500 °C total heat effect is equal to 149,7 kJ/kg. The maximum values of moisture, providing coverage of heat costs due to the heat of exothermic reactions, at these pyrolysis temperatures were 10 % for wood waste and 14 % for sukhovskoy peat. The value of the total thermal effect of arkadievskoy peat pyrolysis even in the dry state has a negative value.

### Key words:

Biomass, thermal processing, exothermic reactions, thermal effect, cellulose, lignin.

The research is executed at financial support of the National Research Tomsk Polytechnic University (VIU-NOC I.N. Butakova-101/2019), the analytical part is executed at the instrument basis of FPFIS Federal research center «Institute of catalysis G.K. Borekov of the Siberian branch of the Russian Academy of Sciences» in the framework of the state task (project no. AAAA A17-117041710075-0).

### REFERENCES

1. *World Energy Outlook Special Report. Energy and Air Pollution.* Paris, International Energy Agency Publ., 2016. 9 p.
2. Matthews H.D., Gillett N.P., Stott P.A., Zickfeld K. The proportionality of global warming to cumulative carbon emissions. *Nature*, 2009, vol. 459, pp. 829–832.
3. Sidorovich V. *Mirovaya energeticheskaya revolyutsiya. Kak vozobnovlyayemye istochniki energii izmenyat nash mir* [World energy revolution. How renewables will change our world]. Moscow, Alpina Publ., 2015. 208 p.
4. Popel O.S., Fortov V.E. *Vozobnovlyayemaya energetika v sovremennom mire* [Renewable energy in the modern world]. Moscow, MPEI Publ. house, 2015. 450 p.
5. *Statistics of International Energy Agency.* Available at: <https://www.iea.org/statistics/?country=WORLD&year=2016&category=Energy%20supply&indicator=TPESbySource&mode=chart&dataTable=BALANCES> (accessed 23 August 2019).
6. Timokhov V.M., Zhiznin S.Z. Resources of world energy. *Herald of Moscow Humanitarian Economic University*, 2018, no. 2, pp. 115–124. In Rus.
7. Ermolenko G.V. *Spravochnik po vozobnovlyayemoy energetike evropeyskogo soyuza* [Handbook of renewable energy of the European Union]. Moscow, HSE Institute of energy Publ., 2016. 96 p.
8. Dhyani V., Bhaskar T. A comprehensive review on the pyrolysis of lignocellulosic biomass. *Renewable energy*, 2018, vol. 129, pp. 695–716.
9. Saidur R., Abdelaziz E.A., Demirbas A., Hossaina M.S., Mekhilef S. A review on biomass as a fuel for boilers. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2011, vol. 15, pp. 2262–2289.
10. Vassilev S.V., Baxter D., Andersen L.K., Vassileva C.G. An overview of the chemical composition of biomass. *Fuel*, 2010, vol. 89, pp. 913–933.



11. McKendry P. Energy production from biomass. P. 1: overview of biomass. *Bioresource Technology*, 2002, vol. 83, pp. 37–46.
12. Terenteva E.P., Udovenko N.K., Pavlova E.A. *Kompleksnaya khimicheskaya pererabotka drevesiny* [Complex chemical processing of wood]. St-Petersburg, VSTA Spbgutd Publ., 2016. 74 p.
13. Vafina Yu.A. Energy saving through the use of alternative energy sources and secondary energy resources: Russia and world experience. *Herald of Kazan technological University*, 2012, vol. 15, no. 9, pp. 265–272. In Rus.
14. Laykam K.E. *Okhrana okruzhayushchey sredy v Rossii: statisticheskiy sbornik* [Environmental protection in Russia: statistical compendium]. Moscow, Rosstat Publ., 2018. 125 p.
15. Medvedeva E.A., Zhenikhov Yu.N., Urvantsev I.V., Tsyba V.E. Prospects for using peat and products of its processing in municipal power engineering in rural and remote areas. *Thermal Engineering*, 2017, no. 6, pp. 14–21. In Rus.
16. Mikhaylov A.V. Global peat market development. *Proceedings of the peat Institute*, 2018, no. 18 (71), pp. 3–7. In Rus.
17. Panikov N.S. Tazhnye bolota – globalny istochnik atmosfernogo metana [Taiga swamps are a global source of atmospheric methane]. *Priroda*, 1995, no. 6, pp. 14–25.
18. Gill A.L., Giasson M.-A., Yu R., Finzi A.C. Deep peat warming increases surface methane and carbon dioxide emissions in a black spruce-dominated ombrotrophic bog. *Global change biology*, 2017, vol. 23, Iss. 12, pp. 5398–5411.
19. Suvorov G.G., Chistotin M.V., Sirin A.A. Effect of vegetation and moisture conditions on the emission of methane from drained peat soil. *Agrochemistry*, 2010, no. 12, pp. 37–45. In Rus.
20. *Potentsial i vozmozhnosti ispolzovaniya torfa. Nekommercheskoe partnerstvo «Rossiyskoe torfyanoe i bioenergeticheskoe obshchestvo»* [Potential and possibilities of peat use. Non-profit partnership «Russian peat and bioenergy society»]. Available at: [http://rostorf.ru/files/prezentaciya\\_universal.pdf](http://rostorf.ru/files/prezentaciya_universal.pdf) (accessed 26 August 2019).
21. Rodionov V.Z. Development of peat deposits in the Leningrad oblast: problems and solutions. *Regional ecology*, 2017, no. 3 (49), pp. 59–64. In Rus.
22. Ushakov D.E., Karelin D.V., Bychkov A.L., Korobeynichev O.P., Shmakov A.G. Poluchenie toplivnykh briкетов iz rastitelnoy biomassy [Production of fuel briquettes from plant biomass]. *Khimiya tverdogo topliva*, 2017, no. 4, pp. 46–50.
23. Alekhnovich A.N., Bogomolov V.V., Artemeva N.V. Co-flaring of biomass with coal. *Thermal Engineering*, 2001, no. 2, pp. 26–33. In Rus.
24. Roddatis K.F., Poltaretskiy A.N. *Spravochnik po kotelnykh ustanovkam maloy proizvoditelnosti* [Handbook of small capacity boiler plants]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1989. 488 p.
25. Khoroshavin L.B., Medvedev O.A., Belyakov V.A., Mikhcheva E.V., Rudnov V.S. *Torf: vozgoranie torfa, tushenie torfyanikov i torfokompozity* [Peat: a peat fire, a suppression of peat and tivocommunity]. Moscow, EMERCOM of Russia, 2013. 256 p.
26. Shtin S.M. Primenenie torfa kak topliva dlya maloj energetiki [The use of peat as a fuel for small energy]. *Gorny informatsionno-analiticheskiy byulleten*, 2011, no. 7, pp. 82–96.
27. Mostafa F. Process optimization of gasification of peat. *Modern problems of science and education*, 2015, vol. 1–2, pp. 1–7.
28. Bodnar L.A., Tkachenko S.I., Dakhnovskaya O.V. Problemy szhiganiya nizkosortnogo topliva v kotlakh maloy moshchnosti [Problems of low-grade fuel combustion in low-power boilers]. *Nauchnye trudy vinnitskogo natsionalnogo tekhnicheskogo universiteta*, 2012, no. 4, pp. 1–7.
29. Gasho E.G., Puzakov V.S., Stepanova M.V. *Rezervy i priorityety teploenergobzabzheniya rossiyskikh gorodov v sovremennykh usloviyakh* [Reserves and priorities of heat supply of Russian cities in modern conditions]. Moscow, INEF RAS Publ., 2015. 97 p.
30. Chayka L.V. Regional management of energy supply systems development in the European North of Russia. *Energy policy*, 2016, no. 5, pp. 35–43. In Rus.
31. Chaplygina M.A., Belousov R.S. World experience of autonomous power supply for the Russian hinterland. *Alley science*, 2017, vol. 2, no. 16, pp. 464–474. In Rus.
32. Mokhirov A.P., Bezrukikh Yu.A., Medvedev S.O. Pererabotka drevesnykh otkhodov predpriyatiy lesopromyshlennogo kompleksa, kak faktor ustoychivogo prirodopolzovaniya [Processing of wood waste of the timber industry enterprises as a factor of sustainable nature management]. *Inzhenerny vestnik Dona*, 2015, no. 2, P. 2, pp. 1–13.
33. Stelte W., Sanadi A.R., Shang L., Holm J.K., Ahrenfeldt J., Henriksen U.B. Recent developments in biomass pelletization – a review. *Bioresources*, 2012, vol. 7, no. 3, pp. 4451–4490.
34. Kan T., Strezov V., Evans T.J. Lignocellulosic biomass pyrolysis: a review of product properties and effects of pyrolysis parameters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, vol. 57, pp. 1126–1140.
35. Tabakaev R.B., Ibraeva K.T., Astafev A.V., Dubinin Yu.V., Yazykov N.A., Zavorin A.S., Yakovlev V.A. Thermal enrichment of different types of biomass by low-temperature pyrolysis. *Fuel*, 2019, vol. 245, pp. 29–38.
36. Chernova N.I., Kiseleva S.V., Larina O.M., Sychev G.A. Production of gaseous products during pyrolysis of microalgae biomass. *Alternative energy and ecology*, 2018, no. 31–36, pp. 23–34. In Rus.
37. Mohan D., Pittman C.U., Steele P.H. Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: a critical review. *Energy & Fuels*, 2006, vol. 20, no. 3, pp. 848–889.
38. Yang J.L., Chen H.X., Zhao W.T., Zhou J.J. TG-FTIR-MS study of pyrolysis products evolving from peat. *Journal of analytical and applied pyrolysis*, 2016, vol. 117, pp. 296–309.
39. Lishvan I.I., Dudarchik V.M., Krayko V.M., Anufrieva E.V., Smolyachkova E.A. Perspektivy energotekhnologicheskogo ispolzovaniya biomassy v Belarusi [Prospects of energy and technological use of biomass in Belarus]. *Khimiya tverdogo topliva*, 2017, no. 5, pp. 15–23.
40. Tripathi M., Sahu J.N., Ganesan P. Effect of process parameters on production of biochar from biomass waste through pyrolysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, vol. 55, pp. 467–481.
41. Uchimiya M., Wartelle L.H., Klasson K.T., Fortier C.A., Lima I.M. Influence of pyrolysis temperature on biochar property and function as a heavy metal sorbent in soil. *Journal of agricultural and food chemistry*, 2011, vol. 59, no. 6, pp. 2501–2510.
42. Tsyganova S.I., Mazurova E.V., Bondarenko G.N., Fetisova O.Yu. Effect of modifiers on the structural features of carbonaceous composite during carbonization of pine wood. *Chemistry of plant raw material*, 2016, no. 4, pp. 143–150. In Rus.
43. Tabakaev R.B., Shanenkov I.I., Kazakov A.V., Zavorin A.S. Thermal processing of biomass into high-calorific solid composite fuel. *Journal of analytical and applied pyrolysis*, 2017, vol. 124, pp. 94–102.
44. Bashkurov V.N., Bikbulatova G.M., Gataullina A.A. Perspektivy promyshlennogo ispolzovaniya zhidkikh produktov bystrogo piroliza rastitelnoy biomassy [Prospects of industrial use of liquid products of fast pyrolysis of plant biomass]. *Evraziyskoe nauchnoe obiedinenie*, 2018, no. 12-3 (46), pp. 207–210.
45. Oehr K.H., Zhou J., Simons G.A., Wójtowicz M. Simultaneous SOx/NOx emission control with Biolime™ derived from biomass pyrolysis oil. *Developments in thermochemical biomass conversion*, 1997, vol. 1–2, pp. 1477–1481.
46. Taymarov M.A., Lavirko Yu.V. The heat generating unit with the pyrolysis gas generation. *News of KSUAE*, 2017, no. 3 (41), pp. 158–166. In Rus.
47. Levin E.D. Prichiny, obuslavlivayushchie znak i velichinu teplovogo efekta piroliza drevesiny [The reasons for the sign and magnitude of the thermal effect of pyrolysis of wood]. *Khimiya drevesiny*, 1969, no. 4, pp. 143–148.
48. *Geoinformatsionnaya sistema «Vozobnovlyayemye istochniki energii v Tomskoy oblasti» [Geoinformation system «Renewable energy sources in Tomsk region»]*. Available at: <http://green.tsu.ru/tomres> (accessed 20 August 2019).

49. Mok W.S.L., Antal M.G., Szabo P., Varhegyi G., Zelei B. Formation of charcoal from biomass in a sealed reactor. *Industrial & Engineering Chemistry*, 1992, vol. 31, pp. 1162–1166.
50. Basile L., Tugnoli A., Stramigioli C., Cozzani V. Thermal effects during biomass pyrolysis. *Thermochimica Acta*, 2016, vol. 636, pp. 63–70.
51. Astafev A.V., Tabakaev R.B., Musafirov D.E., Zavorin A.S., Dubinin Yu.V., Yazykov N.A., Yakovlev V.A. Research of straw pyrolysis thermal effects for estimation of possibility its implementation in autothermal mode. *Chemistry of plant raw material*, 2019, no. 2, pp. 271–280. In Rus.
52. Kulesh R.N. *Teplomassoperenos pri zashiganii i gorenii massiva torfa*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Heat and mass transfer during ignition and burning of peat massif. Cand. Diss. Abstract]. Tomsk, 2010. 19 p.
53. Dupont C., Chiriac R., Gauthier G., Toche F. Heat capacity measurements of various biomass types and pyrolysis residues. *Fuel*, 2014, vol. 115, pp. 644–651.
54. *Kafedra YUNESKO «Energoberezhenie i vozobnovlyayemye podkhody energii». Toplivo i ego ispolzovanie* [UNESCO academic chair «Energy saving and renewable energy approaches». Fuel and its use]. Available at: <https://en.ppt-online.org/304929> (accessed 27 August 2019).
55. Kikoin I.K. *Tablitsy fizicheskikh velichin. Spravochnik* [Tables of physical quantities. A handbook]. Moscow, Atomizdat Publ., 1976. 1008 p.
56. Veryatin U.D. *Termodinamicheskie svoystva neorganicheskikh veshchestv* [Thermodynamic properties of inorganic substances]. Moscow, Atomizdat Publ., 1965. 461 p.
57. Serkov B.B., Sivenkov A.B., Buy D.T., Aseeva P.M. Teplovydelenie pri gorenii drevesiny [The generated heat of burning wood]. *Vestnik moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoy vestnik*, 2003, no. 5, pp. 74–79.
58. Arkhipov V.S., Maslov S.G. Composition and properties of typical peat species in the Central part of Western Siberia. *Chemistry of plant raw material*, 1998, no. 4, pp. 9–16. In Rus.
59. Astafev A.V., Tabakaev R.B., Dubinin Y.V., Yazykov N.A., Yakovlev V.A., Zavorin A.S. Autothermal pyrolysis of biomass due to intrinsic thermal decomposition effects. *Journal of thermal analysis and calorimetry*, 2018, vol. 134, №. 2, pp. 1045–1057.
60. Demirbas A. Mechanisms of liquefaction and pyrolysis reactions of biomass. *Energy Conversion & Management*, 2000, vol. 41, pp. 633–646.
61. Yang H., Yan R., Chen H., Lee D.H., Zheng C. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. *Fuel*, 2007, vol. 86, pp. 1781–1788.
62. Larina G.V., Ivanov A.A., Kazantseva N.A. The group structure of organic substances of peats of Gorny Altai and something structural characteristics of humic acids. *TSPU Bulletin*, 2009, no. 3 (81), pp. 110–115. In Rus.
63. Chukhareva N.V. The research of peat group composition in Tomsk region deposits. *Bulletin of KrasSAU*, 2013, no. 7, pp. 65–71. In Rus.
64. Lobzin V.I., Smolyaninov S.I. Some features of thermal peat decomposition. *Bulletin of TPI*, 1974, vol. 198, pp. 38–40. In Rus.
65. Borodina T.A., Drozdova N.A. Sostoyanie torfyanykh resursov Tomskoy oblasti i napravleniya ikh ispolzovaniya v selskom khozyaystve [State of peat resources of Tomsk region and directions of their use in agriculture]. *Problemy sovremennoy agrarnoy nauki. Materialy mezhdunarodnoy zaochnoy nauchnoy konferentsii* [Problems of modern agricultural science. Proc. of the international correspondence scientific conference]. Krasnoyarsk, KSAU Publ., 2017. pp. 104–108.
66. Kapustin V.M., Chernysheva E.A., Kozhevnikova Yu.V., Asaula V.Yu. Biomass pyrolysis process as a source for alternative fuel. *Oil and gas technologies*, 2011, no. 3 (74), pp. 31–35. In Rus.
67. Zhao L., Giannis A. Characterization of Singapore RDF resources and analysis of their heating value. *Sustainable Environment Research*, 2016, vol. 26, pp. 51–54.

Received: 2 December 2019.

#### Information about the authors

**Alexander V. Astafev**, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Roman B. Tabakaev**, Cand. Sc., researcher, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Nikolay A. Yazykov**, Cand. Sc., researcher, Boreskov Institute of Catalysis SB RAS.

**Alexander S. Zavorin**, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 332.234.4:631.1:528.8:55:002.6

## МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА ТЕРРИТОРИИ ЦЕНТРАЛЬНОГО ИРАКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ LANDSAT-8

Токарева Ольга Сергеевна<sup>1</sup>,  
ost@tpu.ru

Пасько Ольга Анатольевна<sup>1</sup>,  
oap@tpu.ru

Маджид Саиф Моханад<sup>1</sup>,  
ostokareva@gmail.com

Кабраль Педро<sup>2</sup>,  
pcabral@novaims.unl.pt

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

<sup>2</sup> Лиссабонский университет,  
Португалия, г. Лиссабон, 1070-312.

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью получения объективной информации о закономерностях территориально-временной изменчивости состояния растительности в республике Ирак и о факторах, ее определяющих, для максимально эффективного использования земель в экстремальных природных и социально-экономических условиях хозяйствования.

**Цель:** анализ динамики состояния растительного покрова территорий четырех провинций Центрального Ирака с использованием нормализованного разностного вегетационного индекса NDVI в период с 2014 по 2017 гг.

**Объектом** исследования являются территории четырех провинций Центрального Ирака: Бабиля, Багдада, Васита и Диялы. Предмет исследования – временно-территориальная изменчивость состояния растительности.

**Методы:** дистанционного зондирования Земли, тематического картирования, обработки изображений, пространственного анализа данных, статистического анализа.

**Результаты.** С использованием вегетационного индекса, рассчитанного по данным дистанционного зондирования Земли, полученным со спутника Landsat-8, выявлены закономерности временно-территориальной динамики состояния растительности территории Центрального Ирака. Установлены региональные особенности, проявившиеся в структуре растительности и скорости ее изменения. Максимальные площади земель, не покрытых растительностью, выявлены в провинциях Багдад и Васит; покрытых растительностью большинства классов – также в Васите; покрытых плотной растительностью – в Дияле, отмеченной также минимумом бесплодных территорий. Бабиль характеризуется минимальной площадью, покрытой растительностью. Багдад по изученным показателям занимает промежуточное положение. Данные закономерности слабо согласуются с абсолютными значениями площадей провинций. Они вызваны сложившимися условиями хозяйствования и проявляются в качественной и количественной неоднородности распределения растительности по провинциям. Во время активной стадии вегетации, при переходе от февраля к марту, вариации площадей, не занятых растительностью, занятых умеренной и плотной растительностью, стабильны; в то же время происходит рост вариации площадей с очень плотной и падение площадей со слабой растительностью и растительностью максимальной плотности. Корреляционный анализ между показателями NDVI и погодными условиями достоверных связей не выявил.

### Ключевые слова:

Вегетационный индекс, геоинформационная система, данные дистанционного зондирования, классы растительности, сельское хозяйство, Центральный Ирак.

### Введение

В процессе изменения климата и деятельности человека в мире происходит прогрессирующая деградация земель [1], которая ведет к снижению плодородия почвы, сокращению площади пашни и ухудшению качества жизни населения [2]. В засушливых, полузасушливых и сухих субгумидных районах культурные растения возделывают вблизи границ их экологической толерантности, поэтому они особенно чувствительны к изменениям внешней среды, и сельскохозяйственное производство связано с высокими рисками. С другой стороны, игнорирование биологических особенностей почв ведет к деградации сельскохозяй-

ственных (с.-х.) земель [3–5] и проявляется в форме засоления, опустынивания почв, снижения биологической продуктивности экосистем и др. [6, 7]. Для предотвращения деградации требуется комплекс организационно-хозяйственных и технических мероприятий, таких как искусственное орошение почвы, рекультивация засоленных земель, новые агротехнические методы и технологии [8].

Перечисленные проблемы особенно актуальны для Республики Ирак, основу экономического благополучия которой составляют нефть и сельское хозяйство. Земли сельскохозяйственного назначения составляют примерно пятую часть территории Ирака, из них половина расположена в долинах Евфрата и Тигра и

относится к орошаемым угодьям [9]. До 1995 г. Ирак по площади орошаемых земель (3,5 млн га) входил в десятку ведущих стран мира. Основными орошаемыми культурами являются хлопок, овощи, фрукты и зерновые культуры [9, 10].

До середины 90-х гг. доля сельского хозяйства в валовом национальном продукте Ирака составляла 7 %, происходил рост посевных площадей, были построены крупные плотины и ирригационные системы, восстановлены старые каналы. После вторжения в Кувейт, в отношении Ирака была начата экономическая блокада и предотвращен импорт жизненно важных товаров. В результате военной операции США и её стран-союзников против Ирака в 2003 г. были разрушены основные оросительные и дренажные системы [5]. Фермеры стали продавать скот, сокращать площади обрабатываемых земель и использовать низкокачественные удобрения. Переход рабочей силы в государственный сектор, миграция населения в города, отсутствие государственных субсидий, многолетняя сильная засуха (2004–2010 гг.) нанесли значительный ущерб сельскому хозяйству [9], его производительность упала на 90 %. Последствия засухи были усилены экономическими санкциями против Ирака, запретившими импорт с.-х. товаров, включая технику и удобрения. Ситуацию осложнили межобщинные столкновения, вынуждающие жителей временно покидать свои деревни и земельные угодья.

К положительным моментам можно отнести деятельность Международного комитета Красного Креста, за счет которого в последние годы в провинциях Центрального Ирака (Дияла, Багдад, Васит и Бабиль) установлены системы капельного орошения [11]. Они позволяют экономить расход воды на 67 % и значительно снижают риск потери урожая в условиях сильной засухи.

Для максимально эффективного ведения сельскохозяйственного производства в экстремальных условиях природного и антропогенного характера необходима объективная информация о территориально-временной изменчивости состояния растительности. Современный мониторинг земель в значительной мере основан на геоинформационных технологиях и результатах дистанционного зондирования Земли [12–16]. Использование разновременных данных позволяет оценивать происходящие процессы по обнаруженным различиям в состоянии объектов [17–21]. Например, в работе [22] путем анализа изображений, полученных со спутника Landsat-5, выявлены изменения в классах растительности г. Халабджа (Ирак), обстрелянного химическим оружием 16 марта 1988 г. Установлено резкое снижение густой, разреженной и умеренной растительности на 55, 7 и 9 % соответственно и рост площади пустынной территории на 5 %. В результате дистанционных исследований в провинции Багдад [23] в период с 1990 по 2001 гг. обнаружен рост площадей посадок с 44760 до 75411 га и сокращение площадей деградированных земель. В [24] установлены явные экологические изменения, произошедшие в растительном покрове болот Междуречья и юга Ирака в период с 1973 по 2004 гг., а именно, сокращение площади растительно-

го покрова и поверхностных вод и рост площади бесплодных засушливых и заболоченных территорий.

Необходимость скорейшего восстановления разрушенного хозяйства и максимальной экономии средств в сложных природных и антропогенных условиях вызывают потребность в оперативном мониторинге состояния земель сельскохозяйственного назначения, сосредоточенных преимущественно в Центральном Ираке.

Независимо от причины, процесс деградации земель начинается с повреждения растительного покрова [25, 26], биомасса которого является наиболее динамичной характеристикой [27]. Для ее оценки используются различные вегетационные индексы, рассчитываемые по данным дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) [28, 29].

**Целью** исследования является анализ динамики состояния растительного покрова территорий четырех провинций Центрального Ирака с использованием нормализованного разностного вегетационного индекса NDVI в период с 2014 по 2017 гг.

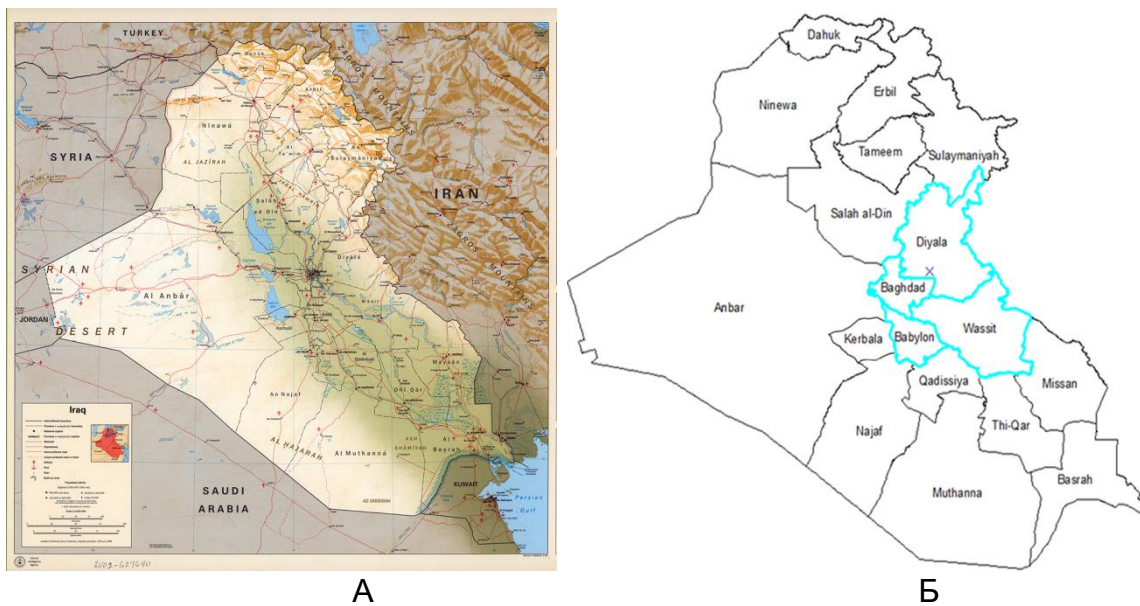
#### **Объекты и методы исследований**

##### **Объекты исследования**

Республика Ирак находится на Ближнем Востоке, между Ираном и Саудовской Аравией, граничит на западе с Иорданией и Сирией, на юго-востоке – с Кувейтом, на севере – с Турцией (рис. 1, А) и занимает площадь 437072 кв. км [30, 31]. Климат на севере резко континентальный, на юге жаркий и сухой. Температура воздуха в регионах варьирует от 50–60 °С (июль, август) до нуля и ниже (январь). Максимум осадков выпадает с ноября по апрель (90 %), поздней осенью и зимой дожди крайне редки, выпадают нерегулярно. Во время засух уровень воды в реках падает, снижается урожай, и возникает проблемы с питьевой водой. Снега практически нет. Характерны ветровые явления и пыльные бури [30–32].

Всю страну пересекают Тигр и Евфрат, самые полноводные реки Ближнего Востока, которые играют исключительную роль в хозяйстве Ирака. Их разливы зависят от таяния снегов на Армянском нагорье, они максимальны в феврале–мае и минимальны в сентябре и октябре [33]. Наиболее динамично развитие растений в Ираке происходит в начале года, что подтверждается максимальным диапазоном изменчивости значений NDVI [34]. Поэтому для анализа выбраны многолетние (февраль–март 2014–2017 гг.) ряды данных ДЗЗ четырех провинций: Багдад, Бабиль, Васит и Дияла, границы которых показаны на рис. 1, Б.

Изучаемые провинции находятся в пустыне, в зоне аридного климата. Среднегодовая температура воздуха составляет в Багдаде 22,8 °С, в Бабиле и Дияле 22,9 °С, в Васите 23 °С. Среднегодовое количество осадков в Багдаде – 156 мм, в Васите – 221 мм, в Дияле – 228 мм. В Бабиле осадки в течение года отсутствуют [35]. Главными сельскохозяйственными культурами в Багдаде являются рис, кукуруза, финики, хлопок, овощи и фрукты, в Бабиле – пшеница, ячмень и финики, в Дияле и Васите – фрукты и финики [9].



**Рис. 1.** Карта Республики Ирак по [31] (А) и границы исследуемых провинций (Б)  
**Fig. 1.** Map of the Republic of Iraq by [31] (A) and the boundaries of selected provinces for this study (B)

По данным метеостанций, территориально близких к изучаемым провинциям, погодные условия февраля–марта 2015–2017 гг. оказались сходными. Осадки отсутствовали. Наблюдались природные засухи в провинции Багдад в 2015 и 2017 гг., а также в провинции Дияла в 2015 г. [36].

#### Методы исследования

Как было указано выше, для оценки распределения растительного покрова и состояния растительности и почвы используются различные вегетационные индексы, рассчитываемые по данным ДЗЗ [28, 29]. Вегетационный индекс представляет собой числовое значение, которое определяют для каждого пикселя аэрокосмического снимка земной поверхности на основе комбинации данных, полученных при съемке в разных диапазонах электромагнитного спектра. В данной работе использовался известный вегетационный индекс NDVI [37], который является показателем состояния экосистемы и часто коррелирует со следующими параметрами: продуктивность и биомасса растительности; влажность, температура, испаряемость и минеральная или органическая насыщенность почвы; объем выпадаемых осадков и др. Зависимость между этими параметрами и значениями NDVI, как правило, не прямая и обусловлена особенностями исследуемой территории, ее климатическими и экологическими характеристиками [38]. NDVI позволяет дать количественную оценку фотосинтетически активной биомассы и, соответственно, плотности растительности на заданном участке территории. Его рассчитывают по формуле [37]:

$$NDVI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + \rho_{red}},$$

где  $\rho_{nir}$  – значения спектральной яркости пикселя в ближнем инфракрасном диапазоне;  $\rho_{red}$  – в красном диапазоне электромагнитного спектра, по данным, получа-

емым с различных спутников [39, 40]. NDVI применяется для широкого спектра исследований [22, 23, 25, 34, 41, 42], в том числе в сельском и лесном хозяйстве.

В работе для расчета NDVI использованы данные со спутника Landsat-8 (сканер OLI), являющегося современным средством мониторинга состояния растительного покрова в региональном масштабе [43–50]. Они имеют пространственное разрешение 30 м в видимом и инфракрасном диапазонах электромагнитного спектра и периодичность съемки 16 дней, доступны на сайте Геологической службы США [51] и распространяются на безвозмездной основе.

Полученные космические снимки соответствовали уровню обработки LT1, и каждый пиксель изображения был представлен калиброванным значением яркости Digital Number (DN). Для получения корректных значений NDVI и проведения анализа по космическим снимкам с разными датами съемки значения DN были конвертированы в значения спектральной яркости на земной поверхности по формулам, предлагаемым в руководстве Handbook Landsat 8 [52].

Далее для каждого космического снимка были рассчитаны значения NDVI. Для зонирования территории по плотности растительности была проведена классификация данных полученных карт NDVI с использованием метода параллелепипеда [53]. Значения границ классов задавались в соответствии со значениями NDVI и плотностью растительности по следующей классификации: нет растительности (–1–0), слабая растительность (0–0,15), умеренной плотности (0,15–0,30), плотная (0,30–0,45), очень плотная (0,45–0,60), максимальной плотности (0,6–1,0) (рис. 2).

Анализ динамики состояния растительного покрова изучаемых территорий проводился по снимкам, полученным в близкие даты февраля и марта в период с 2014 по 2017 гг. (19.02.2014; 23.03.2014; 06.02.2015; 09.02.2016; 12.03.2016; 11.02.2017; 15.03.2017) (рис. 3). Координаты снимков в системе WRS2 – path 168, row 37.

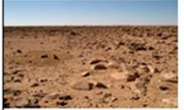





Классификация растительности / Vegetation classification	Нет растительности / No vegetation	Слабая / Poor	Умеренная / Moderate	Плотная / Dense	Очень плотная / Very dense	Максимальной плотности / High
Значение NDVI / NDVI value	–1–0	0–0,15	0,15–0,30	0,30–0,45	0,45–0,60	0,6–1,0
Изображение / Image						

Рис. 2. Классификация растительности, используемая в статье

Fig. 2. Vegetation classification used in the article

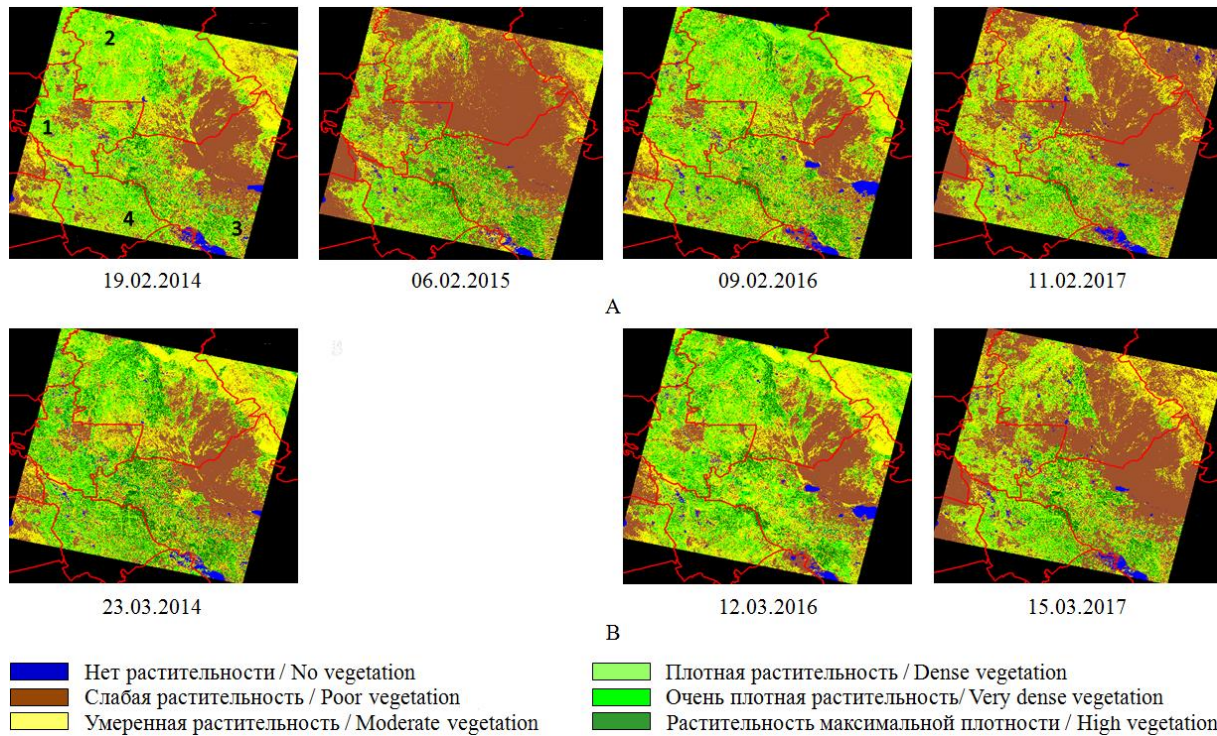


Рис. 3. Карты классификации NDVI по годам в феврале (А) и марте (В) 2014–2017 гг. провинций: 1) Багдад, 2) Дияла, 3) Васит, 4) Бабиль

Fig. 3. NDVI classification maps by year in February (A) and March (B) 2014–2017 of provinces: 1) Baghdad, 2) Diyala, 3) Wasit, 4) Babil

Далее были рассчитаны площади, занимаемые растительностью каждого класса, построены графики изменения площадей классов во времени (по годам), и проведен анализ изменения соотношения площадей классов растительности в каждом регионе за 2014–2017 гг. Полученные данные обработаны с применением методов корреляционного анализа и вариационной статистики.

Для объяснения полученных закономерностей рассчитаны среднесуточные температуры воздуха (по данным [36]). Используются данные метеостанций, территориально близких к изучаемым провинциям. Отмечены природные засухи в провинции Багдад и близлежащих территориях в 2015 и 2017 гг., в провинции Дияла в 2015 г. Среднесуточная температура в 2016–2017 гг. в провинциях составила 12.03.2016 – 18,4 °С, 11.02.2017 – 10,3 °С; 15.03.2017 – 19,0 °С (даты выбраны в соответствии с рис. 3). Осадки в указанные периоды отсутствовали. Рассчитаны коэффи-

циенты корреляции между температурными данными и значениями NDVI, а также коэффициенты вариации значений NDVI. Число данных в выборке составило 168, точность расчетов 95 %.

Для обработки и представления данных использовано программное обеспечение QGIS [54] и ERDAS Imagine [55].

#### Результаты и обсуждение

Анализ значений NDVI выявил региональные особенности развития растительности на территориях провинций Центрального Ирака в начале полевых работ (рис. 4).

Изменение площадей составило на территориях:

- не покрытых растительностью – 30,81–169,83 км<sup>2</sup> (Дияла; 12.03.16 – Васит; 09.02.16, соответственно); отношение минимума к максимуму (Max/Min) – 5,5;
- покрытых слабой растительностью – 460,99–6452,17 км<sup>2</sup> (Бабиль, 12.03.16 – Дияла; 11.02.17); Max/Min=14,0;

- покрытых умеренной растительностью – 856,34–3032,34 км<sup>2</sup> (Бабиль, 23.03.14 – Дияла; 09.02.16); Max/Min=3,5;
- покрытых плотной растительностью – 441,47–2725 км<sup>2</sup> (Дияла, 06.02.15 – Дияла, 19.02.14); Max/Min=6,2
- покрытых очень плотной растительностью – 223,64–1622,84 км<sup>2</sup> (Дияла, 06.02.15 – Дияла, 09.02.16); Max/Min=7,3
- покрытых растительностью максимальной плотности – 80,63–1051,04 км<sup>2</sup> (Багдад, 11.02.17 – Дияла, 23.03.14); Max/Min=13,0.

Максимальные площади земель, не покрытых растительностью, обнаружены в Багдаде и Васите; покрытых растительностью большинства классов – также в Васите; покрытых плотной растительностью – в Дияле, отмеченной также минимумом бесплодных территорий. Бабиль отличается наимень-

шей площадью, покрытой растительностью. Багдад по изученным показателям занимает промежуточное положение. При равномерном распределении растительности в самой маленькой провинции (Багдад) можно было бы ожидать соответствующий минимум площадей, покрытых растительностью всех классов; в самой крупной провинции Дияла – их максимум. Реальная картина указывает на наличие явных неоднородностей в распределении растительности.

**Особенности развития растительного покрова провинций Центрального Ирака.** Во время периода активной вегетации для всех провинций выявлена стабильность значений площади территорий без растительности (0–4 %), а также закономерный рост площадей территорий с растительностью средней плотности (17–35 %) (рис. 4, 5).

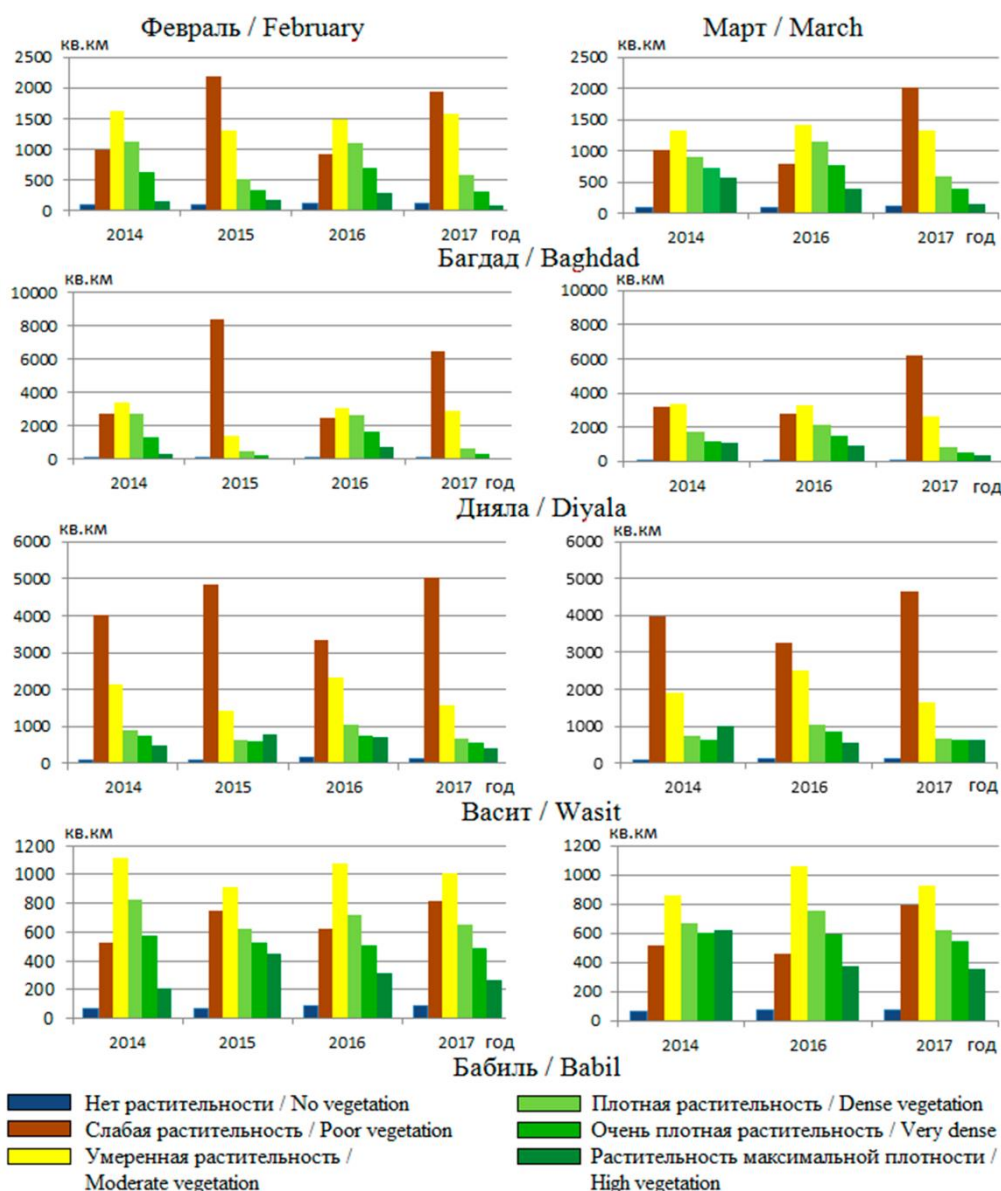
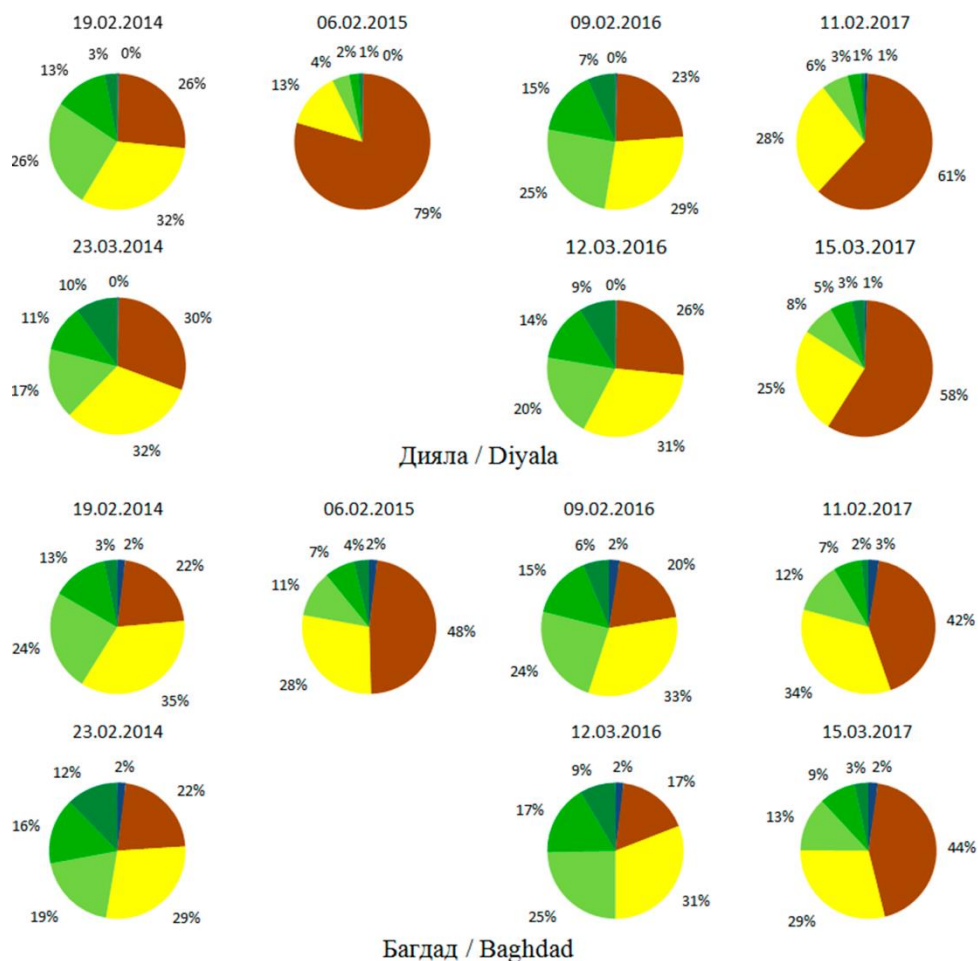


Рис. 4. Территориально-временная изменчивость значений NDVI

Fig. 4. Territorial-temporal variability of NDVI values



**Рис. 5.** Структура растительности в провинциях Дияла и Багдад в феврале–марте 2014–2017 гг. (легенда в соответствии с рис. 4)

**Fig. 5.** Vegetation structure in Diyala and Baghdad provinces in February–March 2014–2017

Соотношение других площадей меняется по годам разнонаправленно и с разной скоростью. В Багдаде с февраля по март доля площадей со слабой и плотной растительностью возрастает более чем в 2 раза (20–48 % и 11–24 % соответственно), а доля площадей с очень плотной растительностью изменяется незначительно (7–15 %). Обращает на себя внимание рост доли площадей с очень плотной растительностью в четыре раза, что обусловлено усилением вегетации сельскохозяйственных культур.

Близкая картина перераспределения площадей с растительностью разных классов характерна для провинции Васит: отсутствие растительности на площадях в 1–2 %; преобладание площадей со слабой растительностью (39–60 %); стабильность площадей с плотной, очень плотной и растительностью высокой плотности (6–13 %).

Кербела отличается очень высокой долей площадей со слабой растительностью (23–79 % в феврале и 30–58 % в марте), заметным ростом доли площадей с плотной растительностью (4–26 % в феврале и 8–20 % в марте) и с очень плотной растительностью (1–15 % и 5–14 %). Доля площадей с растительностью высокой плотностью меняется от 1 до 7 % в феврале и 10 % в марте.

Бабиль характеризуется заметно иной структурой площадей, занятых растительностью, и их относительной стабильностью. Территории со слабой и плотной растительностью занимают 15–25 % площади в феврале–марте, с очень плотной растительностью – 15–18 %, с растительностью высокой плотности – 6–13 % в феврале и 11–19 % в марте.

Анализ площадей разных групп растительности по провинциям выявил их незначительную и среднюю многолетнюю изменчивость для Бабиля и Диялы, среднюю для провинции Васит, незначительную, среднюю и значительную для провинции Багдад. Установлена высокая изменчивость площадей, слабо покрытых растительностью, – коэффициенты их вариации изменялись от 8 до 83 (таблица). Максимальная стабильность коэффициентов вариации (далее CV) установлена для площадей, покрытых умеренной растительностью (< 33).

Также выявлена разногодичная изменчивость площадей с разными классами растительности. В феврале–марте 2014 г. вариативность территорий, не покрытых растительностью или покрытых слабой растительностью, изменялась в пределах 6–32 и 67–68 соответственно; площадей, покрытых умеренной и очень плотной растительностью – 19–52 и 7–30. CV площадей, покрытых растительно-



стью максимальной плотности, упала на 33 единицы. В 2015 г. показатели CV площадей, не покрытых или слабо покрытых растительностью, оказались выше, чем в 2014 г.; в 2016 г. – близкими по площадям, не покрытым растительностью, но ниже по площадям, покрытым слабой, очень плотной и растительностью максимальной плотности (в 4,5, 1,5 и 1,7 раза, соответственно). По площадям, занятым плотной растительностью, отмечено слабое падение CV, очень плотной растительностью – рост в 3 раза. В феврале–марте 2017 г. показатели коэффициентов вариации значений NDVI по не покрытым растительностью или слабо покрытым территориям возросли, по покрытым умеренной растительностью и очень плотной растительностью выровнялись. Минимальной оказалась разногодичная изменчивость CV площадей территорий, покрытых умеренной растительностью, максимальной – слабой растительностью. CV площадей остальных территорий, покрытых растительностью других классов, оказались близкими по значениям.

**Таблица.** Вариативность значений площадей по классам растительности, годам и месяцам

**Table.** Variability of areas with vegetation classes, years and months

2014 февраль February	2014 март March	2015 февраль February	2016 февраль February	2016 март March	2017 февраль February	2017 март March	Разница Max–min
Отсутствие растительности/No vegetation							
6	32	58	21	25	18	25	40
Слабая растительность/Poor vegetation							
67	68	83	60	8	62	52	75
Умеренная растительность/Moderate vegetation							
19	52	17	42	27	39	31	33
Плотная растительность/Dense vegetation							
13	55	56	40	32	7	11	49
Очень плотная растительность/Very dense vegetation							
7	30	54	15	57	16	13	50
Растительность максимальной плотности/High vegetation							
57	24	70	70	40	31	30	46

Отмечены следующие закономерности изменения CV – при переходе от февраля к марту вариации площадей, не занятых растительностью, занятых умеренной и плотной растительностью, стабильны; происходит рост вариации площадей с очень плотной и падение площадей со слабой растительностью и растительностью максимальной плотности. Корреляционный анализ между показателями NDVI и погодными условиями достоверных связей не выявил.

Полученные результаты можно интерпретировать следующим образом.

Условия перехода между соседними классами определяют его скорость и пороговые значения. Участки, на которых растительность отсутствует, полностью непригодны для сельскохозяйственного производства с силу объективных причин (горы, перепады высот, отсутствие источников водоснабжения и др.), поэтому их площадь сохраняется стабильной во времени и пространстве. Плотная растительность

разных степеней развивается на территориях, занятых растительностью предыдущих классов (умеренная и слабая), поэтому рост ее площади максимален. Изменчивость площадей остальных классов растительности относительно равномерная.

Незначительная и средняя изменчивость площадей разных классов растительности в Бабиле и Дияле, средняя изменчивость в Васите, незначительная, средняя и значительная в Багдаде обусловлены, прежде всего, набором культур, сроками и темпами их вегетации. В Бабиле и Дияле культивируют преимущественно многолетние растения: в Бабиле – кормовые культуры на пастбищах, в Дияле – финиковые пальмы и фруктовые деревья в садах. Специализация Багдада традиционно связана с выращиванием зерновых культур на пашне. Сельскохозяйственная специализация регионов хорошо объясняет выявленные закономерности. Многолетним плодовым культурам свойственно постепенное нарастание и сохранение биомассы, однолетним зерновым – ее резкое изменение в зависимости от стадии вегетации (посев – всходы – вегетативный рост и т. д.). Этим, в частности, объясняется максимальная доля территории Диялы, покрытая растительностью разной плотности. Кроме того, в провинции сельскохозяйственные угодья близки к двум главным рекам Ирака, имеется обширная сеть ирригационных сооружений, а культуры выращивают в несколько ярусов, к примеру, ананасы и фрукты в рощах финиковых пальм.

Близкий по срокам посев зерновых культур в разных провинциях и их интенсивное параллельное развитие объясняет существенное преимущество временной изменчивости площадей с растительностью разных классов перед территориальной.

Несомненно, большую роль в выращивании сельскохозяйственных растений, основного фактора изменения площади занятой растительностью, играют социально-экономические условия. Получение объективной информации о них затруднено в связи со сложными политическими событиями, частым отключением Интернета в Ираке, отсутствием справочной литературы. Экстремисты из террористической группировки «Исламское государство», запрещенной в России, нередко опускали шлюзы дамбы на реках, лишая крестьян возможности полива угодий и выработки электроэнергии (постоянное электричество отсутствует).

По данным одного из авторов данной публикации, гражданина Республики Ирак, антропогенными факторами снижения площадей под сельхозкультурами являются отсутствие удобрений, высокая цена семян, иностранный импорт продукции, отсутствие государственной поддержки, военные разрушения населенных пунктов. В Васите ситуация осложняется дефицитом водных ресурсов, в том числе в связи с неуклонным падением уровня воды в реке Евфрат, удаленностью сел от источников водоснабжения, отсутствием в провинции постоянного электричества. Причинами сокращения площадей сельскохозяйственных угодий в Бабиле является полное отсутствие дождя, пыльные бури, чрезмерный выпас скота, а также миграция населения из сельской местности в города.

Следует отметить, что выявленные значительные изменения в площадях и структуре растительного покрова свидетельствуют о потерях сельскохозяйственных земель и нарушении экологической ситуации в регионе. Мониторинг скорости и степени этих процессов методами дистанционного зондирования Земли позволяет получать важную информацию для анализа этих процессов и предотвращения неблагоприятного развития событий.

#### Выводы

1. С помощью вегетационных индексов, рассчитанных по данным ДЗЗ, выявлены закономерности временно-территориальной динамики площадей разных классов растительности территории Центрального Ирака. Установлены региональные особенности, проявившиеся в структуре растительности и скорости ее изменения.
2. Максимальные площади земель, не покрытых растительностью, выявлены в Багдаде и Васите; покрытых растительностью большинства классов – также в Васите; покрытых плотной растительностью – в Дияле, отмеченной также минимумом

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pushpam Kumar. The Economics of land degradation in Africa. Benefits of action outweigh the costs: a report of ELD Initiative. – Bonn: Kippconcept GmbH, 2015. – 156 p.
2. Proxy global assessment of land degradation / Z.G. Bai, D.L. Dent, L. Olsson, M.E. Schaepman // Soil Use and Management. – 2008. – V. 24. – № 3. – P. 223–234.
3. The issues of weed infestation with environmentally hazardous plants and methods of their control / V.L. Bogdanov, O.A. Pasko, V.F. Kovyazin, T.S. Posternak // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2016. – V. 43. – № 1. – 012036. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/43/1/012036/pdf> (дата обращения: 01.02.2019).
4. Pomelov A.S., Pasko O.A., Baranova A.V. Comparative analysis of land management in the World // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2015. – V. 27. – № 1. – 012040. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/27/1/012040/pdf> (дата обращения: 01.02.2019).
5. Iraqi Agriculture in Crisis. 2017. URL: <https://www.epic-usa.org/agriculture-crisis/> (дата обращения: 01.02.2019).
6. Governance and the capacity to manage resilience in regional socio-ecological systems / L. Lebel, J.M. Anderies, B. Campbell, C. Folke, S. Hattfield-Dodds, T.P. Hughes, J. Wilson // Ecology and Society. – 2006. – V. 11. – № 1. – Article number 19.
7. Abdelfattah M.A., Shahid S.A. A comparative characterization and classification of soils in Abu Dhabi Coastal Area in relation to arid and semi-arid conditions using USDA and FAO Soil classification systems // Arid Land Research and Management. – 2007. – V. 21. – № 3. – P. 245–271.
8. Lal R., Stewart B.A. World soil resources and food security (advances in soil sciences). – Boca Raton: CRC Press, 2011. – 574 p.
9. Agriculture in Iraq: resources, potentials, constraints, and research needs and priorities. URL: <http://www.ars.usda.gov/SP2UserFiles/Place/50600000/Products-Reprints/2002/1107.pdf> (дата обращения: 01.02.2019).
10. Monitoring-based analysis of agriculture in Iraq / O. Tokareva, O. Pasko, A. Alshaibi, M. Mochalov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2016. – V. 43. – № 1. – 012035. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/43/1/012035/pdf> (дата обращения: 01.02.2019).
11. Ирак: жители сельских районов остаются в крайне сложном положении. URL: <https://www.icrc.org/rus/resources/documents/update/2011/iraq-update-2011-12-14.htm> (дата обращения: 01.02.2019).

бесплодных территорий. Багдиль характеризуется минимальной площадью, покрытой растительностью. Багдад по изученным показателям занимает промежуточное положение. Данные закономерности слабо согласуются с абсолютными значениями площадей провинций. Они вызваны сложившимися условиями хозяйствования и проявляются в качественной и количественной неоднородности распределения растительности по провинциям.

3. Во время активной стадии вегетации, при переходе от февраля к марту, вариации площадей, не занятых растительностью, занятых умеренной и плотной растительностью стабильны; в то же время происходит рост вариации площадей с очень плотной и падение площадей со слабой растительностью и растительностью максимальной плотности.
4. Корреляционный анализ между показателями NDVI и погодными условиями достоверных связей не выявил.

*Работа выполнена в Томском политехническом университете в рамках программы повышения конкурентоспособности Томского политехнического университета.*

12. Возможности дистанционной оценки состояния и степени деградации природных кормовых угодий / Ф.В. Ерошенко, С.А. Бартаев, Н.Г. Лапенко, Е.В. Самофал, И.Г. Сторчак // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2018. – Т. 15. – № 7. – С. 53–66.
13. Катаев М.Ю., Скугарев А.А., Сорокин И.Б. Возможности космического мониторинга для целей сельского хозяйства Томской области // Доклады ТУСУР. – 2017. – Т. 20. – № 3. – С. 186–190.
14. Михайленко И.М., Тимошин В.Н. Оценивание химического состояния почвенной среды по данным дистанционного зондирования Земли // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2018. – Т. 15. – № 7. – С. 102–113.
15. Geoinformation systems for regional environmental studies / Y. Polichtchouk, E. Kozin, V. Ruyhko, O. Tokareva // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. – 1999. – V. 3983. – P. 572–577.
16. Марков Н.Г. Геоинформационные системы предприятий нефтегазовой отрасли: функциональность, архитектура и перспективы развития // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 9. – С. 16–32.
17. Landscape disturbance caused by non-renewable energy production in a semi-arid region: a case study on the Russian steppe / K.V. Mjachina, C.W. Baynard, A.A. Chibilyev, R.D. Richardson // International Journal of Sustainable Development and World Ecology. – 2018. – V. 25. – № 6. – P. 541–553.
18. Плотников Д.Е., Хвостиков С.А., Бартаев С.А. Метод автоматического распознавания сельскохозяйственных культур на основе спутниковых данных и имитационной модели развития растений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2018. – Т. 15. – № 4. – С. 131–141.
19. The possibility of distance methods application for snow dump sites monitoring / O. Pasko, E. Makartsova, N. Ushakova, O. Tokareva, M. Mochalov // MATEC Web of Conferences. – 2016. – V. 48. – 05002. URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/20164805002> (дата обращения: 01.02.2019).
20. Kovalev A., Tokareva O. Using MODIS NDVI products for vegetation state monitoring on the oil production territory in Western Siberia // MATEC Web of Conferences. – 2016. – V. 48. – 05003. URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/20164805003> (дата обращения: 01.02.2019).

21. Ziboon A.R.T., Alawan I.A., Khalaf A.G. Study and analysis of desertification phenomenon in Karbala governorate by remote sensing data and GIS // *Iraqi Bulletin of Geology and Mining*. – 2015. – V. 11. – № 1. – P. 143–156.
22. Al-doski J., Mansor S.B., Shafri H.Z.M. NDVI differencing and post-classification to detect vegetation changes in Halabja City, Iraq // *IOSR Journal of Applied Geology and Geophysics (IOSR-JAGG)*. – 2013. – V. 1. – № 2. – P. 1–10.
23. Najeeb A.A. Estimation of the normalized Difference Vegetation Index (NDVI) variation for selected regions in Iraq for two years 1990&2001 // *Journal of University of Anbar for pure science*. – 2009. – V. 3. – № 3. – P. 86–89.
24. Saleh S.A.H. Studying of the environmental changes in marsh area using Landsat satellite images // *Journal of Asian Scientific Research*. – 2012. – V. 2. – № 8. – P. 427–435.
25. Assessing the effects of human-induced land degradation in the former homelands of northern South Africa with a 1km AVHRR NDVI time-series / K.J. Wessels, S.D. Princ, P.E. Frost, D. van Zyl // *Remote Sensing of Environment*. – 2004. – V. 91. – № 1. – P. 47–67.
26. Комплексная оценка развития деградации растительного покрова снежных отвалов / О.С. Токарева, О.А. Пасько, Н.С. Ушакова, Е.С. Макарова, Л.А. Федорова // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. – 2018. – Т. 15. – № 2. – С. 75–83.
27. Le Q.B., Nkonya E.M., Mirzabaev A. Biomass productivity-based mapping of global land degradation hotspots // *Economics of land degradation and improvement – a global assessment for sustainable development* / Eds. E. Nkonya, A. Mirzabaev, J. von Braun. – Cham: Springer, 2015. – P. 55–84.
28. Zhou G., Liu X., Liu M. Assimilating remote sensing phenological information into the WOFOST model for rice growth simulation // *Remote Sensing*. – 2019. – V. 11. – № 3. – P. 268. URL: <https://doi.org/10.3390/rs11030268> (дата обращения 01.02.2019).
29. Padmanaban R., Bhowmik A.K., Cabral P. Satellite image fusion to detect changing surface permeability and emerging urban heat islands in a fast-growing city // *PLOS ONE*. – 2019. – V. 14. – № 1. – e0208949. URL: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0208949> (дата обращения 01.02.2019).
30. Карта Республики Ирак. URL: <https://www.maps-of-the-world.ru/asia/iraq/large-scale-detailed-country-profile-map-of-iraq-1994> (дата обращения: 01.02.2019).
31. Nations encyclopedia. Iraq. URL: <https://www.nationsencyclopedia.com/economies/Asia-and-the-Pacific/Iraq.html> (дата обращения: 01.02.2019).
32. Climate change knowledge portal. Average monthly temperature & rainfall for Iraq from 1901–2015. URL: [http://sdwebx.worldbank.org/climateportal/index.cfm?page=country\\_historical\\_climate&ThisCCode=IRQ](http://sdwebx.worldbank.org/climateportal/index.cfm?page=country_historical_climate&ThisCCode=IRQ) (дата обращения: 01.02.2019).
33. Реки Ирака. URL: [http://www.best-country.org/asia/iraq/water\\_source](http://www.best-country.org/asia/iraq/water_source) (дата обращения: 01.02.2019).
34. Estimation of protein content in rice crop and nitrogen content in rice leaves through regression analysis with NDVI derived from camera mounted radio-control helicopter / K. Arai, M. Sakashita, O. Shigetomi, Y. Miura // *International Journal of Advanced Research in Artificial Intelligence*. – 2014. – V. 3. – № 3. – P. 12–19.
35. Baghdad Climate & Temperature. URL: <http://www.baghdad.climateemps.com> (дата обращения: 01.02.2019).
36. Погода и климат. URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/weather.php?id=40656&bday=15&fday=15&amonth=3&ayear=20> (дата обращения: 01.02.2019).
37. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS / J.W. Rouse, R.H. Haas, J.A. Scheel, D.W. Deering // *3rd Earth Resource Technology Satellite (ERTS) Symposium. Proc. Conf. – USA, Washington, 1973. – V. 1. – P. 309–317*.
38. An extended AVHRR 8-km NDVI dataset compatible with MODIS and SPOT vegetation NDVI data / C.J. Tucker, J.E. Pinzon, M.E. Brown, D.A. Slayback, E.W. Pak, R. Mahoney, E.V. Vermote, N. El Saleous // *International Journal of Remote Sensing*. – 2005. – V. 26. – № 20. – P. 4485–4498.
39. Evaluation of the consistency of long-term NDVI time series derived from AVHRR, SPOT-vegetation, SeaWiFS, MODIS, and Landsat ETM+ sensors / M.E. Brown, J.E. Pinzon, K. Didan, J.T. Morisette, C.J. Tucker // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – 2006. – V. 44. – № 7. – P. 1787–1793.
40. Global evaluation of four AVHRR–NDVI data sets: Intercomparison and assessment against Landsat imagery / H.E. Beck, T.R. McVicar, A.I.J.M. van Dijk, J. Schellekens, R.A.M. de Jeu, L.A. Bruijnzeel // *Remote Sensing of Environment*. – 2011. – V. 115. – № 10. – P. 2547–2563.
41. Ahmad W.A., Ahmed M.A., Al-Sharia G.H. Using Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to identify hydrocarbon seepage in Kifl oil field and adjacent areas South of Iraq // *Journal of Environment and Earth Science*. – 2017. – V. 7. – № 1. – P. 16–30.
42. Spring Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) predicts annual variation in timing of peak faecal crude protein in mountain ungulates Steeve / S. Hamel, M. Garel, M. Festa-Bianchet, J.-M. Gaillard // *Journal of applied ecology*. – 2009. – V. 46. – № 3. – P. 582–589.
43. Characterization of Landsat-7 to Landsat-8 reflective wavelength and 2 normalized difference vegetation index continuity / D.P. Roy, V. Kovalskyy, H.K. Zhang, E.F. Vermote, L. Yan, S.S. Kumar, A. Egorov // *Remote Sensing of Environment*. – 2016. – V. 185. – P. 57–70.
44. Zhu Z., Woodcock C.E. Continuous change detection and classification of land cover using all available Landsat data // *Remote Sensing of Environment*. – 2014. – V. 144. – P. 152–171.
45. Kennedy R.E., Yang Z., Cohen W.B. Detecting trends in forest disturbance and recovery using yearly Landsat time series: 1. LandTrendr – Temporal segmentation algorithms // *Remote Sensing of Environment*. – 2010. – V. 114. – № 12. – P. 2897–2910.
46. Monitoring conterminous United States (CONUS) land cover change with Web-Enabled Landsat Data (WELD) / M.C. Hansen, A.J. Egorov, P.V. Potapov, S.V. Stehman, A. Tyukavina, S.A. Turubanova, D.P. Roy, S.J. Goetz, T.R. Loveland, Ju.A. Kommareddy, V. Kovalskyy, C. Forsyth, T. Bents // *Remote Sensing of Environment*. – 2014. – V. 140. – P. 466–484.
47. Anderson L.O. Biome-scale forest properties in Amazonia based on field and satellite observations // *Remote Sensing*. – 2012. – V. 4. – № 5. – P. 1245–1271.
48. Quantifying forest cover loss in Democratic Republic of the Congo, 2000–2010, with Landsat ETM+data / P.V. Potapov, S.A. Turubanova, M.C. Hansen, B. Adusei, M. Broich, A. Altstatt, L. Mane, C.O. Justice // *Remote Sensing of Environment*. – 2012. – V. 122. – P. 106–116.
49. Mjachina K., Hu Z., Chibilyev A. Detection of damaged areas caused by the oil extraction in a steppe region using winter Landsat imagery // *Journal of Applied Remote Sensing*. – 2018. – V. 12. – № 1. – P. 016017. URL: <https://doi.org/10.1117/1.JRS.12.016017> (дата обращения: 01.02.2019).
50. Mapping cropping practices on a national scale using intra-annual landsat time series binning / P. Rufin, D. Frantz, S. Ernst, A. Rabe, P. Griffiths, M. Özdoğan, P. Hostert // *Remote Sensing*. – 2019. – V. 11. – № 3. – P. 232. URL: <https://doi.org/10.3390/rs11030232> (дата обращения: 01.02.2019).
51. Earth Explorer (Сайт Геологической службы США). URL: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (дата обращения: 01.02.2019).
52. Zanter K. LANDSAT 8 (L8) Data users handbook. – Sioux Falls, South Dakota: EROS, 2016. – 98 p.
53. Al-doski J., Mansor S.B., Shafri H.Z.M. Image classification in remote sensing // *Journal of Environment and Earth Science*. – 2013. – V. 3. – № 10. – P. 141–148.
54. QGIS. A free and open source geographic information system. URL: <https://qgis.org/en/site/> (дата обращения: 01.02.2019).
55. ERDAS IMAGINE. URL: <https://www.hexagongeo.com/products/power-portfolio/erdas-imagine> (дата обращения: 01.02.2019).

Поступила 02.12.2019 г.

#### **Информация об авторах**

**Токарева О.С.**, кандидат технических наук, доцент отделения информационных технологий Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Пасько О.А.**, доктор сельскохозяйственных наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Маджид С.М.**, магистрант отделения информационных технологий Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Кабраль П.**, доктор прикладной математики, доцент Школы информационного менеджмента Лиссабонского университета.

UDC 332.234.4:631.1:528.8:55:002.6

## MONITORING VEGETATION STATE IN THE CENTRAL IRAQ USING LANDSAT-8 SATELLITE DATA

**Olga S. Tokareva<sup>1</sup>,**  
ost@tpu.ru

**Olga A. Pasko<sup>1</sup>,**  
oap@tpu.ru

**Saif M. Majid<sup>1</sup>,**  
ostokareva@gmail.com

**Pedro Cabral<sup>2</sup>,**  
pcabral@novaims.unl.pt

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

<sup>2</sup> Nova University of Lisbon, Nova Information Management School,  
1070-312, Lisboa, Portugal.

**The relevance** of the research is caused by the need to obtain objective information about the patterns of territorial and temporal variability of vegetation state and the factors that determine it for the most effective use of lands in extreme natural and socio-economic conditions in the Republic of Iraq.

**The aim** of the research is to analyze the dynamics of vegetation of territories of the four provinces in Central Iraq using the normalized difference vegetation index NDVI in the period from 2014 to 2017.

**The objects** of the research are territories of Central Iraq: Babil, Baghdad, Wasit and Diyala. The subject of the study is temporal-territorial variability of vegetation state.

**Methods:** remote sensing, thematic mapping, image processing, spatial data analysis, statistical analysis.

**Results.** Patterns of temporarily-territorial dynamics of vegetation state in Central Iraq were revealed using vegetation index NDVI calculated with remote sensing data obtained by Landsat-8. Regional features of the vegetation structure and the rate of its state change were established. The maximum areas of non-vegetated territories were found in Baghdad and Wasit; covered by vegetation of most classes – also in Wasit; covered by dense vegetation – in Diyala, marked as well by minimum of barren areas. Babil is characterized by minimum area covered by vegetation. Baghdad in the studied indicators is intermediate. These patterns are poorly consistent with the absolute values of the province areas. They are caused by the prevailing economic conditions and are manifested in the qualitative and quantitative heterogeneity of the distribution of vegetation in the provinces. During the active stage of vegetation, from February to March, the variations in areas of non-vegetated territories, occupied by moderate and dense vegetation, are stable. At the same time, the variability of areas of territories with very dense vegetation is growing, with weak vegetation and vegetation of maximum density decreases. A correlation analysis between NDVI values and weather conditions did not reveal any significant relationships.

**Key words:**

Vegetation index, geoinformation system, remote sensing data, vegetation classes, agriculture, Central Iraq.

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

### REFERENCES

1. Pushpam Kumar. *The Economics of land degradation in Africa. Benefits of action outweigh the costs: a report of ELD Initiative.* Bonn, Kippconcept GmbH, 2015. 156 p.
2. Bai Z.G., Dent D.L., Olsson L., Schaepman M.E. Proxy global assessment of land degradation. *Soil Use and Management*, 2008, vol. 24, no. 3, pp. 223–234.
3. Bogdanov V.L., Pasko O.A., Kovyazin V.F., Posternak T.S. The issues of weed infestation with environmentally hazardous plants and methods of their control. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016, vol. 43, no 1, 012036. Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/43/1/012036/pdf> (accessed 1 February 2019).
4. Pomelov A.S., Pasko O.A., Baranova A.V. Comparative analysis of land management in the World. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2015, vol. 27, no. 1, 012040. Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/27/1/012040/pdf> (accessed 1 February 2019).
5. *Iraqi agriculture in crisis.* 2017. Available at: <https://www.epic-usa.org/agriculture-crisis/> (accessed 1 February 2019).
6. Lebel L., Anderies J.M., Campbell B., Folke C., Hattfield-Dodds S., Hughes T.P., Wilson J. Governance and the capacity to manage resilience in regional socio-ecological systems. *Ecology and Society*, 2006, vol. 11, no. 1, Article number 19. Available at: <http://www.ecologyandsociety.org/vol11/iss1/art19/> (accessed 1 February 2019).
7. Abdelfattah M.A., Shahid S.A. A comparative characterization and classification of soils in Abu Dhabi Coastal Area in relation to arid and semi-arid conditions using USDA and FAO Soil classification systems. *Arid Land Research and Management*, 2007, vol. 21, no. 3, pp. 245–271.
8. Lal R., Stewart B.A. *World soil resources and food security (advances in soil sciences).* Boca Raton, CRC Press, 2011. 574 p.
9. Agriculture in Iraq: resources, potentials, constraints, and research needs and priorities. Available at: <http://www.ars.usda.gov/SP2UserFiles/Place/50600000/Products-Reprints/2002/1107.pdf> (accessed 1 February 2019).

10. Tokareva O., Pasko O., Alshaibi A., Mochalov M. Monitoring-based analysis of agriculture in Iraq. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016, vol. 43, no. 1, 012035. Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/43/1/012035/pdf> (accessed 1 February 2019).
11. *Irak: zhiteli selskikh rayonov ostayutsya v krayne slozhnom polozenii* [Iraq: residents of rural areas remain in an extremely difficult situation]. Available at: <https://www.icrc.org/rus/resources/documents/update/2011/iraq-update-2011-12-14.htm> (accessed 1 February 2019).
12. Eroshenko F.V., Bartalev S.A., Lapenko N.G., Samofal E.V., Storchak I.G. Capabilities for rangelands state and degradation assessment using remote sensing data. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, vol. 15, no. 7, pp. 53–66. In Rus.
13. Kataev M.Yu., Skugarev A.A., Sorokin I.B. Possibilities of space monitoring for agriculture in Tomsk region. *Proceedings of TUSUR*, 2017, vol. 20, no. 3, pp. 186–190. In Rus.
14. Mikhaylenko I.M., Timoshin V.N. Assessment of the chemical state of soil environment from remote sensing data of the Earth. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, vol. 15, no. 7, pp. 102–113. In Rus.
15. Polichtchouk Y., Kozin E., Ryuhko V., Tokareva O. Geoinformation systems for regional environmental studies. *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*, 1999, vol. 3983, pp. 572–577.
16. Markov N.G. Geoinformation systems for oil and gas enterprises: functionality, architecture and development prospects. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 9, pp. 16–32. In Rus.
17. Mjachina K.V., Baynard C.W., Chibilyev A.A., Richardson R.D. Landscape disturbance caused by non-renewable energy production in a semi-arid region: a case study on the Russian steppe. *International Journal of Sustainable Development and World Ecology*, 2018, vol. 25, no. 6, pp. 541–553.
18. Plotnikov D.E., Khvostikov S.A., Bartalev S.A. Method for automated crop types mapping using remote sensing data and a plant growth simulation model. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, vol. 15, no. 4, pp. 131–141. In Rus.
19. Pasko O., Makartsova E., Ushakova N., Tokareva O., Mochalov M. The possibility of distance methods application for snow dump sites monitoring. *MATEC Web of Conferences*, 2016, vol. 48, 05002. Available at: <https://doi.org/10.1051/mateconf/20164805002> (accessed 1 February 2019).
20. Kovalev A., Tokareva O. Using MODIS NDVI products for vegetation state monitoring on the oil production territory in Western Siberia. *MATEC Web of Conferences*, 2016, vol. 48, 05003. Available at: <https://doi.org/10.1051/mateconf/20164805003> (accessed 1 February 2019).
21. Ziboon A.R.T., Alawan I.A., Khalaf A.G. Study and analysis of desertification phenomenon in Karbala governorate by remote sensing data and GIS. *Iraqi Bulletin of Geology and Mining*, 2015, vol. 11, no. 1, pp. 143–156.
22. Al-doski J., Mansor S.B., Shafri H.Z.M. NDVI differencing and post-classification to detect vegetation changes in Halabja City, Iraq. *IOSR Journal of Applied Geology and Geophysics (IOSR-JAGG)*, 2013, vol. 1, no. 2, pp. 1–10.
23. Najeeb A.A. Estimation of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) variation for selected regions in Iraq for two years 1990&2001. *Journal of University of Anbar for pure science*, 2009, vol. 3, no. 3, pp. 86–89.
24. Saleh S.A.H. Studying of the environmental changes in marsh area using Landsat satellite images. *Journal of Asian Scientific Research*, 2012, vol. 2, no. 8, pp. 427–435.
25. Wessels K.J., Princ S.D., Frost P.E., van Zyl D. Assessing the effects of human-induced land degradation in the former homelands of northern South Africa with a 1km AVHRR NDVI time-series. *Remote Sensing of Environment*, 2004, vol. 91, no. 1, pp. 47–67.
26. Tokareva O.S., Pasko O.A., Ushakova N.S., Makartsova E.S., Fedorova L.A. Comprehensive assessment of degradation of snow dump vegetation. *Sovremennye Problemy Distantsionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*, 2018, vol. 15, no. 2, pp. 75–83. In Rus.
27. Le Q.B., Nkonya E.M., Mirzabaev A. Biomass productivity-based mapping of global land degradation hotspots. *Economics of Land Degradation and Improvement – A Global Assessment for Sustainable Development*. Eds. E. Nkonya, A. Mirzabaev, J. von Braun. Cham, Springer, 2015. pp. 55–84.
28. Zhou G., Liu X., Liu M. Assimilating remote sensing phenological information into the WOFOST model for rice growth simulation. *Remote Sensing*, 2019, vol. 11, no. 3, 268. Available at: <https://doi.org/10.3390/rs11030268> (accessed 1 February 2019).
29. Padmanaban R., Bhowmik A.K., Cabral P. Satellite image fusion to detect changing surface permeability and emerging urban heat islands in a fast-growing city. *PLOS ONE*, 2019, vol. 14, no. 1, e0208949. Available at: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0208949> (accessed 1 February 2019).
30. *Karta Respubliki Irak* [Map of the Republic of Iraq]. Available at: <https://www.maps-of-the-world.ru/asia/iraq/large-scale-detailed-country-profile-map-of-iraq-1994> (accessed 1 February 2019).
31. *Nations encyclopedia. Iraq*. Available at: <https://www.nationsencyclopedia.com/economics/Asia-and-the-Pacific/Iraq.html> (accessed 1 February 2019).
32. *Climate change knowledge portal. Average monthly temperature & rainfall for Iraq from 1901–2015*. Available at: [http://sdwebx.worldbank.org/climateportal/index.cfm?page=countr\\_y\\_historical\\_climate&ThisCCode=IRQ](http://sdwebx.worldbank.org/climateportal/index.cfm?page=countr_y_historical_climate&ThisCCode=IRQ) (accessed 1 February 2019).
33. *Reki Iraka* [The rivers of Iraq]. Available at: [http://www.best-country.org/asia/iraq/water\\_source](http://www.best-country.org/asia/iraq/water_source) (accessed 1 February 2019).
34. Arai K., Sakashita M., Shigetomi O., Miura Y. Estimation of protein content in rice crop and nitrogen content in rice leaves through regression analysis with NDVI derived from camera mounted radio-control helicopter. *International Journal of Advanced Research in Artificial Intelligence*, 2014, vol. 3, no. 3, pp. 12–19.
35. *Baghdad Climate & Temperature*. Available at: <http://www.baghdad.climateemps.com> (accessed 1 February 2019).
36. *Pogoda i klimat* [Weather and Climate]. Available at: <http://www.pogodaiklimat.ru/weather.php?id=40656&bday=15&fday=15&amonth=3&ayear=20> (accessed 1 February 2019).
37. Rouse J.W., Haas R.H., Scheel J.A., Deering D.W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *3<sup>rd</sup> Earth Resource Technology Satellite (ERTS) Symposium. Proc. Conf. USA*, Washington, 1973. Vol. 1, pp. 309–317.
38. Tucker C.J., Pinzon J.E., Brown M.E., Slayback D.A., Pak E.W., Mahoney R., Vermote E.V., El Saleous N. An extended AVHRR 8-km NDVI dataset compatible with MODIS and SPOT vegetation NDVI data. *International Journal of Remote Sensing*, 2005, vol. 26, no. 20, pp. 4485–4498.
39. Brown M.E., Pinzón J.E., Didan K., Morisette J.T., Tucker C.J. Evaluation of the consistency of long-term NDVI time series derived from AVHRR, SPOT-vegetation, SeaWiFS, MODIS, and Landsat ETM+ sensors. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, vol. 44, no. 7, pp. 1787–1793.
40. Beck H.E., McVicar T.R., van Dijk A.I.J.M., Schellekens J., de Jeu R.A.M., Bruijnzeel L.A. Global evaluation of four AVHRR–NDVI data sets: Intercomparison and assessment against Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 2011, vol. 115, no. 10, pp. 2547–2563.
41. Ahmad W.A., Ahmed M.A., Al-Sharia G.H. Using Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to Identify Hydrocarbon Seepage in Kifl Oil Field and Adjacent Areas South of Iraq. *Journal of Environment and Earth Science*, 2017, vol. 7, no. 1, pp. 16–30.
42. Hamel S., Garel M., Festa-Bianchet M., Gaillard J.-M. Spring Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) predicts annual variation in timing of peak faecal crude protein in mountain ungulates Steeve. *Journal of applied ecology*, 2009, vol. 46, no. 3, pp. 582–589.
43. Roy D.P., Kovalsky V., Zhang H.K., Vermote E.F., Yan L., Kumar S.S., Egorov A. Characterization of Landsat-7 to Landsat-8 reflective wavelength and 2 normalized difference vegetation index continuity. *Remote Sensing of Environment*, 2016, vol. 185, pp. 57–70.
44. Zhu Z., Woodcock C.E. Continuous change detection and classification of land cover using all available Landsat data. *Remote Sensing of Environment*, 2014, vol. 144, pp. 152–171.

45. Kennedy R.E., Yang Z., Cohen W.B. Detecting trends in forest disturbance and recovery using yearly Landsat time series: 1. LandTrendr – Temporal segmentation algorithms. *Remote Sensing of Environment*, 2010, vol. 114, no. 12, pp. 2897–2910.
46. Hansen M.C., Egorov A., Potapov P.V., Stehman S.V., Tyukavina A., Turubanova S.A., Roy D.P., Goetz S.J., Loveland T.R., Ju J., Kommareddy A., Kovalsky V., Forsyth C., Bents T. Monitoring conterminous United States (CONUS) land cover change with Web-Enabled Landsat Data (WELD). *Remote Sensing of Environment*, 2014, vol. 140, pp. 466–484.
47. Anderson L.O. Biome-scale forest properties in Amazonia based on field and satellite observations. *Remote Sensing*, 2012, vol. 4, no. 5, pp. 1245–1271.
48. Potapov P.V., Turubanova S.A., Hansen M.C., Adusei B., Broich M., Altstatt A., Mane L., Justice C.O. Quantifying forest cover loss in Democratic Republic of the Congo, 2000–2010, with Landsat ETM+data. *Remote Sensing of Environment*, 2012, vol. 122, pp. 106–116.
49. Mjachina K., Hu Z., Chibilyev A. Detection of damaged areas caused by the oil extraction in a steppe region using winter Landsat imagery. *Journal of Applied Remote Sensing*. 2018, vol. 12, no. 1, 016017. Available at: <https://doi.org/10.1117/1.JRS.12.016017> (accessed 1 February 2019).
50. Rufin P., Frantz D., Ernst S., Rabe A., Griffiths P., Özdoğan M., Hostert P. Mapping Cropping Practices on a National Scale Using Intra-Annual Landsat Time Series Binning. *Remote Sensing*, 2019, vol. 11, no. 3, 232. Available at: <https://doi.org/10.3390/rs11030232> (accessed 1 February 2019).
51. *Earth Explorer (USGS)*. Available at: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (accessed 1 February 2019).
52. Zanter K. *LANDSAT 8 (L8) Data users handbook*. Sioux Falls, South Dakota, EROS, 2016. 98 p.
53. Al-doski J., Mansor S.B., Shafri H.Z.M. Image classification in remote sensing. *Journal of Environment and Earth Science*, 2013, vol. 3, no. 10, pp. 141–148.
54. *QGIS. A free and open source geographic information system*. Available at: <https://qgis.org/en/site/> (accessed 1 February 2019).
55. *ERDAS IMAGINE*. Available at: <https://www.hexagongeospatial.com/products/power-portfolio/erdas-imagine> (accessed 1 February 2019).

*Received: 2 December 2019.*

#### Information about the authors

**Olga S. Tokareva**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Olga A. Pasko**, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Saif M. Majid**, student, National Research Tomsk Polytechnic University .

**Pedro Cabral**, PhD, associate professor, Nova University of Lisbon.

УДК 551.77; 551.87

## ИСКОПАЕМЫЕ НОРЫ *THALASSINOIDES* В ОПОКАХ СЕРОВСКОЙ СВИТЫ (СРЕДНЕЕ ЗАУРАЛЬЕ, ВЕРХНИЙ ПАЛЕОЦЕН)

Трубин Ярослав Сергеевич<sup>1</sup>,  
iyr-2009@mail.ru

Ян Петр Александрович<sup>2</sup>,  
yaupa@ipgg.sbras.ru

<sup>1</sup> Тюменский государственный университет,  
Россия, 625003, г. Тюмень, ул. Володарского, 6.

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

**Актуальность исследования.** В северных районах Западной Сибири в отложениях танетского яруса отмечаются перерывы осадконакопления, масштабность проявления и диапазон которых остаются неясными. В частности, для доказательства их существования на южных окраинах бассейна требуется привлечение дополнительных палеонтологических и седиментологических данных, которые могут фиксировать кризис привноса осадочного материала. Одним из наиболее надежных источников информации о перерывах в осадконакоплении и других седиментационных событиях могут являться ископаемые ходы.

**Цель:** ихнофациальный анализ кремнистых отложений верхнего палеоцена Западной Сибири

**Объект:** ископаемые норы *Thalassinoides* серовской свиты (среднее Зауралье, верхний палеоцен), вмещающие ходы породы (темные опоки с афанитовой структурой), заполняющие ходы породы (светлые опоки с тонкоглобулярной структурой)

**Методика:** полевые исследования, растровая электронная микроскопия, литолого-петрографический, ихнотекстурный, ихнофациальный и седиментологический анализы

**Результаты.** Приведены данные о находках ископаемых следов *Thalassinoides* в кремнистых породах серовской свиты (верхний палеоцен, среднее Зауралье), и дана характеристика особенностей их морфологии. Рассматриваются вопросы возможных условий, при которых происходило формирование нор и их сохранение в ископаемом состоянии. Микроскопические исследования кремнистых пород серовской свиты позволяют определить особенности и различия в постседиментационных изменениях вмещающих и выполняющих норы отложений. В качестве наиболее вероятных продуцентов ходов *Thalassinoides* в танетском бассейне определены десятиногие ракообразные. Ископаемые следы в кремнистых формациях палеогена ранее не изучались и приводятся в научной литературе впервые.

### Ключевые слова:

Ихнофоссилии, опоки, серовская свита, палеоцен, Западная Сибирь, Зауралье, *Thalassinoides*, *Glossifungites*

### Введение

Серовская свита, время формирования которой охватывает большую часть танетского века, соответствует нижнему люлиноворскому подгоризонту [1]. В это время возобновляется, после глобального перерыва на рубеже мела и палеогена, прочная связь Западно-Сибирского бассейна с Арктическим океаном и северными окраинами океана Тетис (Туранское и Прикаспийское моря) через Тургайский пролив [2]. Западно-Сибирский бассейн служил ключевым звеном единой коммуникационной системы между северными и южными морями, оказывая глобальное влияние на циркуляцию водных масс, влаго- и теплоперенос, климат и развитие биоты [2–8].

Формировавшаяся в это время серовская свита практически полностью сложена опоками, глинистыми опоками и опокovidными глинами различных окрасок и степеней «зрелости», много реже диатомитами, трепелами и кварц-глауконитовыми песками [7, 9]. На отдельных участках распространения серовской свиты опоки полностью замещаются трепелами и опокovidными глинами [10]. Опоки серовской свиты ранее редко служили источником палеонтологических находок [11], в том числе и ихнофоссилий. Сохранение реликтов диатомовой флоры наблюдается

преимущественно в светло- и сероокрашенных разностях опок и сильно варьируется и зависит от степени постседиментационных изменений [12].

Нижняя граница серовской свиты с подстилающей ее талицкой свитой устанавливается по увеличению числа и разнообразия диноцист морского бассейна *Alterbidinium circulum* до 15–20 % [7, 13]. В ее кровельной части могут залегать диатомиты, которые постепенно переходят в диатомиты вышележащей ирбитской свиты [10]. Этот переход макроскопически не фиксируется, а устанавливается по смене диатомового комплекса *Trinacria ventriculosa-Sheshukovia mirabilis*, соответствующего серовской свите, на комплексы *Coscinodiscus uralensis-Hemiaulus proteus*, *Coscinodiscus payeri*, *Puxilla gracilis* и *Puxilla oligocaenica*, характерный для ирбитской свиты [14, 15].

В позднепалеоценовое время кремненакопление в Западной Сибири происходило в условиях циклической смены трансгрессивного и регрессивного ритмов [7, 8] с перерывами осадконакопления. На северных окраинах в отложениях эти перерывы установлены однозначно [16]. Вопросы существования таких перерывов в южных районах морского бассейна, корреляция с северными перерывами и их глобальность остаются открытыми. Это требует привлечения дополнительных



палеонтологических и седиментологических данных, фиксирующих кризис привноса осадочного материала. Одним из наиболее перспективных направлений для решения подобных задач в настоящее время считается анализ яркости и последовательности наложения ихнотекстур, а также интерпретация ихнологических сообществ, развивавшихся в уплотненных субстратах [17–19 и др.]. Уплотненным субстратам, согласно концепции ихнофаций и ихнотекстурного анализа [20–22], соответствует ихнофация *Glossifungites*. С ней связаны ихнофосилии – *Thalassinoides*, *Glossifungites*, *Tryanites*, *Rhizocorallium* и *Psilonichnus* [23]. В породах серовской свиты отмечается отдельный горизонт биотурбированных опок с норами *Thalassinoides*. Их детальное изучение и прослеживание по горизонту необходимо для представления полной характеристики текстурных признаков особой фации слабо биотурбированных кремнистых пород серовской свиты, по которым можно отметить кризис привноса осадочного

материала в определенный период существования тагетского Западно-Сибирского бассейна. Ранее ихнофосилии в опоках серовской свиты описаны не были и в настоящей работе охарактеризованы впервые.

#### Материалы и методы

Материалами для исследования послужили находки систем ходов *Thalassinoides* (Ehrenberg, 1944), наиболее морфологически близкие к ихновиду *Thalassinoides suevicus* (Rieth, 1932). Сборы были произведены за летний полевой период 2017 г. с естественных обнажений опок серовской свиты на правом берегу р. Реутинка, Свердловская область, Камышловский городской округ (56°48'26.19"С, 62°44'34.99"В) [24] (рис. 1). Кроме макропического описания пород проводилось также их микроскопическое изучение с помощью сканирующего электронного микроскопа на базе растрового электронного микроскопа JEOL JSM 6510A (ТИУ).

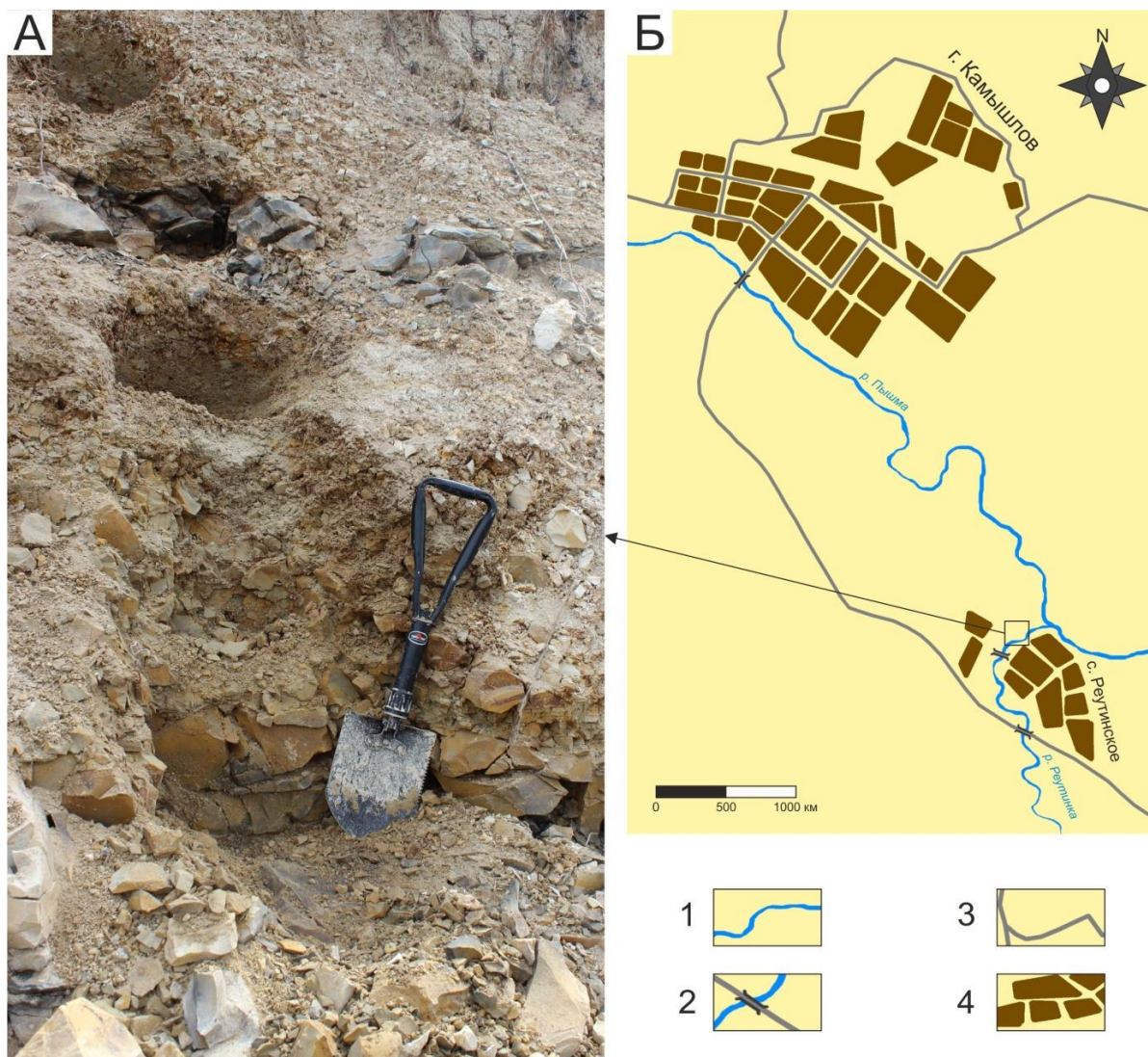


Рис. 1. Район полевых работ: А) обнажение опок серовской свиты на правом берегу р. Реутинка. Штык лопаты = 60 см; Б) положение исследуемого обнажения на карте; 1 – река; 2 – мост; 3 – автомобильная дорога; 4 – населенный пункт

Fig. 1. Field area: А) outcrop of gaizes from Serov suite on the right bank of the Reutinka river. Bayonet of shovels = 60 cm; Б) outcrop location on the map; 1 – river; 2 – bridge; 3 – road; 4 – town/locality

## Результаты

Согласно современной ихнотаксономической классификации [20, 22, 25, 26], ихнород *Thalassinoides* (Ehrenberg, 1944) совместно с *Ophiomorpha* (Lundgren, 1891) и *Radomorpha* (Vialov, 1966) объединены в ихносемейство *Thalassinoididae* (Vialov, 1993), которое в свою очередь включено в ихноотряд *Crustolithida* (Vialov, 1966). Наиболее распространенными ихновидами из ихнорода *Thalassinoides* в кремнистых формациях кайнозоя являются *Th. suervicus* и *Th. paradoxicus* (Woodward, 1830) [27, 28].

В опоках серовской свиты ходы наиболее сходны с ихновидом *Th. suervicus*. Однако не исключено, что глубокие диагенетические преобразования могли привести к ухудшению степени сохранности, искажению морфологических признаков и, как следствие, к ошибочной ихнотаксономической идентификации. Других типов ихнофоссилий встречено не было. Норы прямые, трубчатые. Состоят из вертикальных, наклоненных и одиночных горизонтальных туннелей. Предпочтительная ориентировка вертикальная. Стенки гладкие, с редкими бугорками и валиками, без выраженной футеровки. В поперечном сечении норы овальные, эллиптические с выдержанной шириной. Диаметр измеряется в пределах от 1,5 до 2,0 см у разных нор. В длину превышают 15 см. Ходы не пересекаются между собой, занимают около 15 % от общего объема породы. Четко места ветвлений не распознаются ввиду плохой сохранности из-за диагенетических преобразований породы. *Thalassinoides suervicus* отличаются от морфологически близкого ихновида *Th. callianassae* (Ehrenberg, 1944) меньшими размерами – 1,5–3,3 см, против 3,4–5,0 см [29], а от ихновида, также характерного для кремнистых формаций, *Th. paradoxicus* исследуемые ходы отличаются выдержанностью диаметра нор во всех направлениях [30, 31].

Норы заполнены светлой опоккой, которая имеет тонкоглобулярное строение, а в общей массе фиксируются реликты створок диатомовых и пластинчатые и хлопьевидные агрегаты глинистых минералов. Вмещающая порода – темная опока – сложена бесструктурной массой кремнезема с немногочисленными, отдельными зонами, где контуры глобулей опал-СТ с характерной ребристой поверхностью и границы между ними хорошо различимы. Контакт заполняющих и вмещающих норы горных пород четкий (рис. 2).

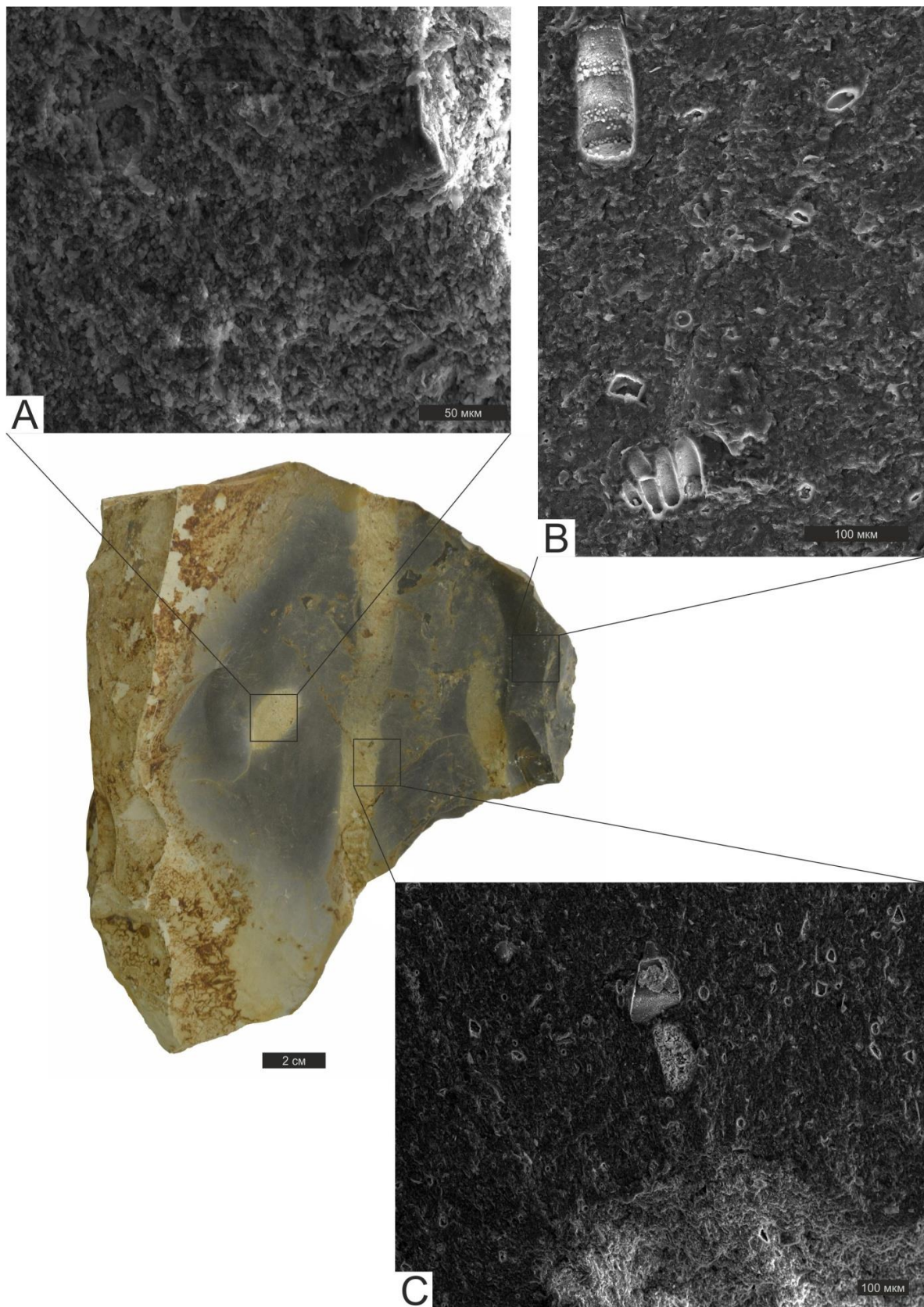
## Обсуждения

В палеоэкологическом и палеобиологическом плане ихнофоссилии представляют интерес как важный источник информации об особенностях поведения организма, о его форме и размерах, расширяя представления о биоразнообразии, биопродуктивности и популяции биотурбаторов древнего бассейна [32–35].

Наиболее вероятными продуцентами ходов серовской свиты могли служить десятиногие ракообразные, о чем свидетельствуют бугорки и валики на гладких

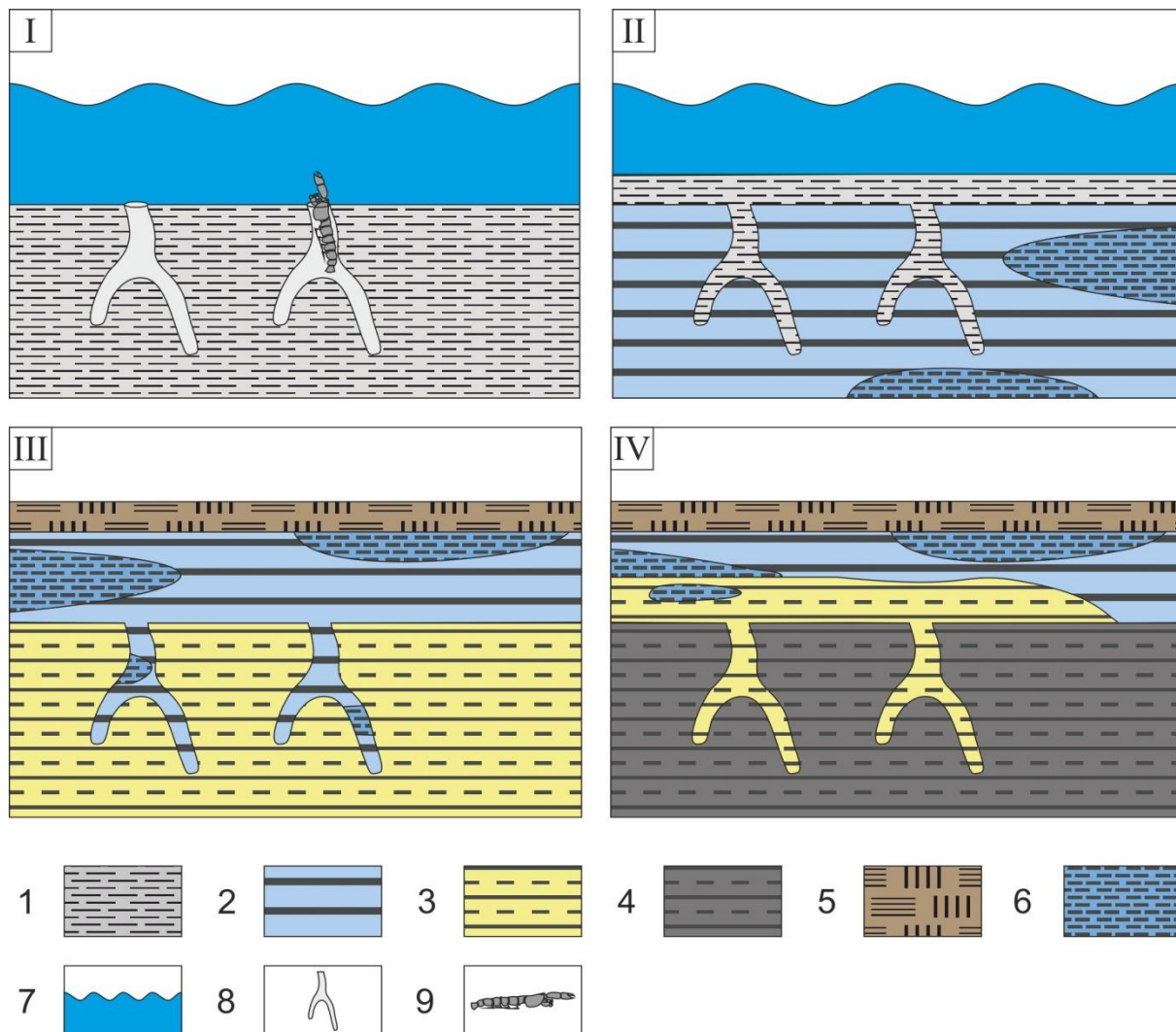
стенках нор, которые, возможно, были оставлены конечностями членистоногих [29]. Норы служили постоянными жилищными постройками [29, 35, 36] и норами питания [31, 37, 38]. Современные аналогичные ходы *Thalassinoides* формируют креветки *Thalassinidean* видов *Upogebia affinis* [30] и *Upogebia pusilla* [32, 33], а также крабы, омары и, в редких случаях, рыбы и амфибии [34, 36]. Есть свидетельства в пользу того, что продуцентами нор *Thalassinoides* могли являться крупные многощетинковые черви семейства *Nereididae* или представители родственных им таксонов [34, 39].

Исходным осадочным материалом, из которого формировались исследуемые опоки, служили кремнистые биохомогенные илы [8, 15]. Однако в научной литературе также известны и другие седиментологические модели формирования некоторых силицитов, в которых ведущая роль отведена вулканической и гидротермальной деятельности [40–42]. По мере прогрессирующей кристаллизации и упорядочивания кремниевого вещества в осадке происходят постепенные минеральные переходы с образованием горных пород и приобретением новых структурно-текстурных признаков: кремнистые илы дают начало диатомитам, из которых в ходе дальнейших изменений образуются светлые тонкоглобулярные опоки с многочисленными реликтами диатомитов. В процессе дальнейшей трансформации светлая тонкоглобулярная опока преобразуется в темную бесструктурную опокку [12]. Вмещающими отложениями для рассматриваемых ходов *Thalassinoides* являются темные бесструктурные опоки наиболее поздней стадии постседиментационного преобразования. Общее строение ихнофоссилий с характерным отсутствием футеровки стенок, постоянным диаметром и выдержанной глубиной нор свидетельствует о том, что продуценты колонизировали уже уплотненный осадок в период с нулевой или очень низкой скоростью осадконакопления. Их пассивное заполнение, различная степень зрелости и резкая граница между осадками, вмещающими и выполняющими ходы, свидетельствуют о существовавшем перерыве в осадконакоплении (рис. 3). Благоприятными условиями для этого могли быть полные прекращения биохомогенной седиментации, а периодические повышения гидродинамики среды могли вызывать эрозию рыхлых уплотненных осадков и обеспечивать выход на поверхность нижележащих уплотненных отложений. В последствии быстро осаждающийся материал засыпал норы животных, исключая их дальнейшую жизнедеятельность там и обеспечивая сохранность следов в ископаемом состоянии. Не исключено, что перерывы осадконакопления, отмеченные в данной работе по ихнофоссилиям, не являлись локальным процессом и связаны с глобальными перерывами на северных окраинах Западно-Сибирского моря, которые являются следствием трансгрессивно-регрессивных циклов в танетское время [16].



**Рис. 2.** Макроскопическое и микроскопическое исследование икнофоссилий опок серовской свиты: А) заполняющая ходы порода (светлая опока с тонкоглобулярным строением); В) вмещающая ходы порода (темная опока, представленная бесструктурной массой кремнезема); С) граница между заполняющей и вмещающей ходы породой

**Fig. 2.** Macroscopic and microscopic study of ichnofossils in gaizes of Serov suite: А) burrow-filling rock (light gaize with a thin-globular structure); В) burrow-containing rock (dark gaize, represented by a structureless mass of silica); С) boundary between filling and containing rocks



**Рис. 3.** Последовательность формирования и сохранения ходов *Thalassinoides* в кремнистых отложениях серовской свиты. I – Колонизация уплотненного субстрата инфаунными десятиногими ракообразными в условиях кризиса привноса осадочного материала; II – Засыпание нор диатомовым илом и его уплотнение. Вмещающий ходы осадочный материал в ходе диагенетических преобразований переходит в горную породу диатомит; III – Заполняющий норы осадочный материал в ходе диагенетических преобразований переходит в горную породу диатомит. Вмещающие породы в ходе дальнейших диагенетических преобразований переходят в светлую опоку с тонкоглобулярным строением; IV – Породы, заполняющие норы, претерпевают постседиментационные изменения и переходят из диатомитов в светлую опоку с тонкоглобулярным строением. Вмещающая порода в ходе дальнейших преобразований переходит в темную опоку в виде бесструктурной массы кремнезема; 1 – Уплотненный диатомовый ил; 2 – Диатомит; 3 – Светлая опока с тонкоглобулярным строением; 4 – Темная опока, представленная бесструктурной массой кремнезема; 5 – Почвенно-растительный слой; 6 – Диатомовая глина; 7 – Воды морского Западно-Сибирского бассейна в танетское время; 8 – Норы *Thalassinoides*; 9 – Наиболее вероятный продуцент ходов *Thalassinoides*, морфологически близкий к современным креветкам *Thalassinidean*

**Fig. 3.** Sequence of formation and preservation of *Thalassinoides* burrows in siliceous sediments from Serov suite. I – Colonization of compacted substrate with infauna decapods in conditions of lack of sediment input; II – Filling with diatom ooze and its compaction. Sedimentary material containing the burrows transforms into diatomite during the diagenetic processes; III – Sedimentary material filling the burrows during the diagenetic processes transforms into diatomite. In further diagenetic transformations burrow-containing rock transforms into light gaize with a thin-globular structure; IV – Burrow-filling rock undergoes postdepositional change and turns from diatomite to light gaize with a thin-globular structure. During diagenetic transformations burrow-containing rock turns into dark gaize in the form of an unstructured mass of silica; 1 – Compacted diatom ooze; 2 – Diatomite; 3 – Light gaize with a thin-globular structure; 4 – Dark gaize, represented by a structureless mass of silica; 5 – Topsoil; 6 – Diatom clay; 7 – Waters of the marine West Siberian basin in Thanetian time; 8 – *Thalassinoides* burrows; 9 – The most likely *Thalassinoides* producer, morphologically close to modern *Thalassinidean* shrimp

### Заклучение

В изученных опоках ихнород *Thalassinoides* представлен единственным ихновидом *Th. suervicus*. Ископаемые системы ходов *Thalassinoides* служили постоянными жилищными постройками для десятиногих ракообразных, что подтверждают бугорки и валики на гладких стенках нор. Присутствие ходов *Thalassinoides* отмечает кризис привноса осадочного материала в определенный период существования танетского Западно-Сибирского бассейна, который, возможно, не был локальным процессом и может коррелироваться с глобальными перерывами на севере моря, являющимися частью трансгрессивно-регрессивного цикла [16]. Норы формировались в уплотненном осадке, их заполнение происходило без участия продуцирующих организмов значительно позднее. Об этом свидетельствуют резкие четкие стенки ихнофоссилий без признаков футеровки и зафиксированные различия в степени диагенетической преобразованности вмещающих и выполняющих норы отложений. Отсутствие на данном этапе исследований необходимого объема материала по ихнофос-

силиям серовской свиты не дает возможности выполнить более точные седиментологические и палеоэкологические построения и сделать более предметные выводы относительно их стратиграфического значения. Для этого необходимо привлечение дополнительных палеонтологических, литологических и геохимических данных по большему числу разрезов.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках государственного задания FEWZ-2020-0007 «Фундаментальные закономерности развития природной среды юга Западной Сибири и Тургай в кайнозое: седиментология осадочных толщ, абиотические геологические события и эволюция палеобиосферы».*

*Авторы выражают искреннюю благодарность д.г.-м.н. Е.Ю. Барабошкину (МГУ) за помощь в определении ихнофоссилий, к.г.-м.н. П.В. Смирнову (ТюмГУ) за обсуждение результатов и ценные профессиональные советы на протяжении всего проекта и А.Е. Олоховой (ТИУ) за качественные фотографии, которыми проиллюстрирована настоящая работа.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Унифицированные региональные стратиграфические схемы неогеновых и палеогеновых отложений Западно-Сибирской равнины. Объяснительная записка / Ф.Г. Гурари, В.С. Волкова, А.Е. Бабушкин, А.Г. Головина, В.П. Никитин, А.И. Некрасов, А.В. Кривенцов, Ж.А. Доля, Ю.М. Колыхалов, З.Н. Гнибиденко. – Новосибирск: СНИИГиМС, 2001. – 81 с.
2. Ахметьев М.А. Проблемы стратиграфии и палеогеографии палеогена средних широт центральной Евразии // Геология и геофизика. – 2011. – Т. 52. – № 10. – С. 1367–1387.
3. Новые данные по морскому палеогеону юга Западно-Сибирской плиты. Статья 1 / М.А. Ахметьев, Г.Н. Александрова, В.Н. Беньямовский, Д.И. Витухин, З.И. Глезер, З.Н. Гнибиденко, В.Д. Дергачев, Ж.А. Доля, Н.И. Запорожец, Г.Э. Козлова, И.А. Кулькова, И.А. Николаева, М.Н. Овечкина, Э.П. Радионова, Н.И. Стрельникова // Стратиграфия. Геологическая корреляция. – 2004. – Т. 12. – № 1. – С. 67–93.
4. Новые данные по морскому палеогеону юга Западно-Сибирской плиты. Статья 2 / М.А. Ахметьев, Г.Н. Александрова, В.Н. Беньямовский, Д.И. Витухин, З.И. Глезер, З.Н. Гнибиденко, В.Д. Дергачев, Ж.А. Доля, Н.И. Запорожец, Г.Э. Козлова, И.А. Кулькова, И.А. Николаева, М.Н. Овечкина, Э.П. Радионова, Н.И. Стрельникова // Стратиграфия. Геологическая корреляция. – 2004. – Т. 12. – № 3. – С. 65–86.
5. Амон Э.О., Холлис К.Дж. Некоторые особенности палеобиогеографии радиоларий в средне-высокоширотных палеогеновых морских бассейнах (Западная Сибирь, Новая Зеландия) // Литосфера. – 2008. – № 2. – С. 25–45.
6. Диатомеи и диноцисты в интервале позднего палеоцено-раннего эоцена в биокремнистых фациях среднего Зауралья / Г.Н. Александрова, Т.В. Орешкина, А.И. Яковлева, Э.П. Радионова // Стратиграфия. Геологическая корреляция. – 2012. – Т. 20. – № 4. – С. 68–94.
7. Смирнов П.В., Константинов А.О. Биогенное кремненакопление в Западно-Сибирском морском бассейне в палеоцено-эоцене: факторы и стадии // Литосфера. – 2017. – Т. 17. – № 4. – С. 26–47.
8. Амон Э.О. Факторы и условия накопления биогенных силицитов в палеогеновом бассейне Западной Сибири // Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел геологии. – 2018. – Т. 93. – Вып. 4. – С. 51–67.
9. Дистанов У.Г. Особенности кремненакопления в морских платформенных бассейнах // Сырьевая база кремнистых пород СССР. – М.: Наука, 1974. – С. 13–17.
10. Смирнов П.В. Результаты комплексных исследований вещественного состава диатомитов Ирбитского месторождения //

- Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 6. – С. 93–104.
11. Мартынов В.А., Сигов А.П., Чирва С.А. Западно-Сибирская плита. В: Наливкин Д.В. (ред.) Стратиграфия СССР. Палеогеновая система. – М.: Недра, 1975. – С. 315–329.
12. Смирнов П.В. Фазовые переходы кремнезема в опал-кристобалитовых породах как фактор качества кремнистого сырья // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 9. – С. 6–15.
13. Бакиева Л.Б. Палинология и стратиграфия палеогена зауральского и центрального литологофациальных районов Западной Сибири. – Тюмень: Тюменский государственный нефтегазовый университет, 2005. – 190 с.
14. Кротов А.И., Шибкова К.Г. Комплексы диатомовых и кремневых жгутиковых водорослей в верхнемеловых палеогеновых и неогеновых отложениях восточного склона Урала и Зауралья // Материалы по геол. и полезным ископаемым Урала. – М.: Госгеолтехиздат, 1961. – Вып. 9. – С. 191–249.
15. Смирнов П.В., Константинов А.О. Сравнительные исследования эоценовых и палеоценовых диатомитов Зауралья (на примере Камышловского месторождения и разреза Брусняна) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 11. – С. 96–104.
16. Ахметьев М.А., Запорожец Н.И. Климатообразующая роль морских течений в раннем палеоцене в высоких широтах Евразии // Стратиграфия. Геологическая корреляция. – 2017. – Т. 25. – № 2. – С. 115–126.
17. Bockelie J.F. Ichnofabric mapping and interpretation of Jurassic reservoir rocks of the Norwegian North Sea // Palaios. – 1991. – № 6. – P. 206–215.
18. Bromley R.G. Trace fossils. Biology, taphonomy and applications. – London: Chapman and Hall, 1996. – 361 p.
19. Buatois L.A., Mángano M.G. Ichnology: organism-substrate interactions in space and time. – New York: Cambridge university press, 2011. – 358 p.
20. Вялов О.С. Следы жизнедеятельности организмов и их классификация // Следы жизнедеятельности древних организмов. – М.: Наука, 1993. – С. 5–11.
21. Микулаш Р., Дронов А. Палеоихнология – введение в изучение следов ископаемых организмов. – Прага: Геологический институт Академии наук Чешской Республики, 2006. – 122 с.
22. Seilacher A. Trace fossil analysis. – Berlin: Springer, 2007. – 226 p.
23. Frey R.W., Pemberton S.G. Trace fossils facies models // Facies models. Geoscience Canada. – 1984. – V. 2. – № 1. – P. 189–207.

24. Смирнов П.В. Предварительные результаты ревизии минерально-сырьевой базы опал-кристобалитовых пород в среднем Зауралье // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 4. – С. 28–37.
25. Вялов О.С. Следы жизнедеятельности организмов и их палеонтологическое значение. – Киев: Наукова думка, 1966. – 219 с.
26. Вялов О.С. Палеоихнологический этюд // Палеонтологический сборник. – 1989. – № 26. – С. 72–78.
27. Bromley R.G., Ekdale A.A. Fossil preservation in flint in the European chalk // Journal of Paleontology. – 1984. – V. 48. – № 2. – P. 298–311.
28. Ichnofabrics of the Capdevila Formation (early Eocene) in the Los Palacios Basin (western Cuba): Paleoenvironmental and paleoecological implications // J. Villegas-Martin, R.G. Netto, E.C. Lavina, R. Rojas-Consuegra // Journal of South American Earth Sciences. – 2014. – V. 56. – P. 214–227.
29. Янин Б.Т., Барабошкин Е.Ю. Норы *Thalassinoides* (структуры зарывания десятиногих ракообразных) из нижнемеловых отложений юго-западного и центрального Крыма // Стратиграфия. Геологическая Корреляция. – 2013. – Т. 21. – № 3. – С. 39–49.
30. Frey R.W., Howard J.D. Upper Cretaceous trace fossils, Book cliffs of Utah: a field guide // Society of Economic Paleontologists and Mineralogists. Rocky Mountain Section. – 1985. – № 10. – P. 115–152.
31. Frey R.W., Howard J.D. Trace fossils and depositional sequences in a clastic shelf setting, Upper Cretaceous of Utah // Journal of Paleontology. – 1990. – V. 64. – P. 803–820.
32. Dworschak P.C. The pumping rates of the burrowing shrimp *Upogebia Pusilla* (Petagna) (Decapoda: Thalassinidea) // Journal of Experimental Marine Biology and Ecology. – 1981. – V. 52. – P. 25–35.
33. Dworschak P.C. The Biology of *Upogebia pusilla* (Petagna) (Decapoda, Thalassinidea) // P.S.Z.N.I: Marine Ecology. – 1983. – V. 4. – № 1. – P. 19–43.
34. Murow P.M. *Thalassinoides* and the Enigma of Early Paleozoic open-framework burrow System // Palaios. – 1995. – V. 10. – № 1. – P. 58–74.
35. Urash R.G., Savrda C.E. Ichnology of an Eocene shallow marine passive margin condensed section, eastern Gulf coastal plain, Alabama, U.S.A. // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. – 2017. – V. 471. – P. 58–70.
36. Kim J.Y., Pickerill R.K. Cretaceous Nonmarine Trace Fossils from the Hasandong and Jinju formations of the Namhae Area, Kyongsangnamdo, Southeast Korea // Ichnos. – 2002. – V. 9. – P. 41–60.
37. Bromley R.G., Frey R.W. Redescription of the trace fossil *Gyrolithes* and taxonomic evaluation of *Thalassinoides*, *Ophiomorpha* and *Spongeliomorpha* // Bulletin of the Geological Society of Denmark. – 1974. – V. 23. – P. 311–335.
38. Ekdale A.A., Bromley R.G. Paleontologic interpretation of complex *Thalassinoides* in shallow-marine limestones, Lower Ordovician, southern Sweden // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. – 2003. – V. 192. – P. 221–227.
39. Dashtgard S.E., Gingras M.K. Facies architecture and ichnology of recent salt-marsh deposits: Waterside Marsh, New Brunswick, Canada // Journal of Sedimentary Research. – 2005. – V. 75. – P. 596–607.
40. Цеховский Ю.Г. Участие вулканизма и гидротерм в платформенном осадконакоплении пограничной мел-палеогеновой эпохи деструктивного тектогенеза в Центральной Евразии. Статья 1. Палеогеография, продукты вулканизма и гидротермальной деятельности // Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел геологии. – 2017. – Т. 92. – Вып. 4. – С. 34–48.
41. Цеховский Ю.Г. Участие вулканизма и гидротерм в платформенном осадконакоплении пограничной мел-палеогеновой эпохи деструктивного тектогенеза в Центральной Евразии. Статья 2. Особенности платформенного осадконакопления // Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел геологии. – 2017. – Т. 92. – Вып. 6. – С. 3–13.
42. Зорина С.О., Афанасьева Н.И., Хайрtdинова Л.Р. Событийная модель образования палеоцен-эоценовой песчано-глинисто-силицитовой толщи Русской плиты // Доклады Академии Наук. – 2018. – Т. 480. – № 1. – С. 60–63.

Поступила 29.01.2020 г.

#### Информация об авторах

**Трубин Я.С.**, лаборант-исследователь лаборатории седиментологии и эволюции палеобиосферы, Тюменский государственный университет.

**Ян П.А.**, кандидат геолого-минералогических наук, доцент, заведующий лабораторией седиментологии, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

UDC 551.77; 551.87

## FOSSIL TRACES OF THALASSINOIDES FROM SEROV SUITE GAIZES (MIDDLE TRANS-URALS, UPPER PALEOCENE)

**Yaroslav S. Trubin<sup>1</sup>,**  
iyr-2009@mail.ru

**Peter A. Yan<sup>2</sup>,**  
yanpa@ipgg.sbras.ru

<sup>1</sup> University of Tyumen,  
6, Volodarsky street, Tyumen, 625003, Russia.

<sup>2</sup> Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
3, Koptuyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

**The relevance of the research.** In the northern margins of Western Siberia, depositional breaks are indicated in the sediments of Tanetian stage. Global nature of such hiatuses and possibility of their existence in the southern margins remain debatable. This requires the use of additional paleontological and sedimentological data that capture the crisis of the introduction of sedimentary material. One of the most reliable source of information about interruptions to introduction of sedimentary material and other events in sedimentation can be fossil burrows.

**The aim of the research** is the ichnofacial analysis of siliceous sediments of the Upper Paleocene of Western Siberia.

**Objects:** fossil traces of *Thalassinoides* from silica rocks Serov suite (Middle Trans-Urals, Upper Paleocene), burrow-filling rock (light gaize with a thin-globular structure), burrow-containing rock (dark gaize, represented by a structureless mass of silica)

**Methods:** field work, scanning electron microscopy, lithologic-petrographic, ichno-structure, ichno-facies and sedimentological analyzes.

**Results.** Information on fossil traces of *Thalassinoides* from Serov suite gaizes and fossil traces morphology are given. The paper considers the issues of possible environmental conditions, under which the burrow marks were formed and preserved in fossil state. Microscopic studies of Serov suite gaizes allow identifying the features of changes in rocks, that contain and fill burrows, during further diagenetic transformation. Also the article highlights the most likely producers for *Thalassinoides* burrows of Tanetian time in the West Siberian basin. The study of fossil traces in siliceous rocks of the Paleogene period has not been undertaken before and has not been noted in scientific literature.

### Key words:

Fossil traces, gaizes, Serov Formation, Paleocene, Western Siberia, Transuralian, *Thalassinoides*, *Glossifungites*

The reported study funded by Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation was performed as a part of project FEWZ-2020-0007 “Fundamentals of the natural environment history of the south of Western Siberia and Turgay in the Cenozoic: sequence sedimentology, abiotic geological events and the evolution of the Paleobiosphere”.

The authors thank E.Yu. Baraboshkin, Dr. Sc. (Moscow State University) for his help in determining trace fossils, P.V. Smirnov, Cand. Sc. (University of Tyumen) for discussing the results and valuable professional comments during the project, and A.E. Olokhova (Industrial University of Tyumen) for taking photos to illustrate the paper.

### REFERENCES

- Gurari F.G., Volkova V.S., Babushkin A.E., Golovina A.G., Nikitin V.P., Nekrasov A.I., Kriventsov A.V., Dolya Zh.A., Kolykhalov Yu.M., Gnibidenko Z.N. *Unifitsirovannyye regionalnyye stratigraficheskie skhemy neogenovykh i paleogenovykh otlozheniy Zapadno-Sibirskoy ravniny* [Unified regional stratigraphic schemes of the Neogene and Paleogene deposits of the West Siberian Plain]. Novosibirsk, SNIIGGiMS Publ., 2001. 81 p.
- Akhmetev M.A. Problems of stratigraphy and paleogeography of the Paleogene of middle latitudes of central Eurasia. *Russian Geology and Geophysics*, 2011, vol. 52, no. 8, pp. 1367–1387. In Rus.
- Akhmetev M.A., Aleksandrova G.N., Benyamovskiy V.N., Vitukhin D.I., Glezer Z.I., Gnibidenko Z.N., Dergachev V.D., Dola G.A., Zaporozhets N.I., Kozlova G.E., Kulkova I.A., Nikolaeva I.A., Ovechkina M.N., Radionova E.P., Strelnikova N.I. *Novyye dannyye po morskomu paleogenu yuga Zapadno-Sibirskoy plity. Statya 1* [New data on the marine Paleogene of the south of the West Siberian Plate. Article 1]. *Stratigraphy and Geological Correlation*, 2004, vol. 12, no. 1, pp. 67–93.
- Akhmetev M.A., Aleksandrova G.N., Benyamovskiy V.N., Vitukhin D.I., Glezer Z.I., Gnibidenko Z.N., Dergachev V.D., Dola G.A., Zaporozhets N.I., Kozlova G.E., Kulkova I.A., Nikolaeva I.A., Ovechkina M.N., Radionova E.P., Strelnikova N.I. *Novyye dannyye po morskomu paleogenu yuga Zapadno-Sibirskoy plity. Statya 2* [New data on the marine Paleogene of the south of the West Siberian Plate. Article 2]. *Stratigraphy and Geological Correlation*, 2004, vol. 12, no. 3, pp. 65–86.
- Amon E.O., Hollis K.J. Some features of radiobarium paleobiogeography in mid-high-latitude of Paleogene marine basins (Western Siberia, New Zealand). *Lithosphere*, 2008, no. 2, pp. 25–45. In Rus.
- Aleksandrova G.N., Oreshkina T.V., Yakovleva A.I., Radionova E.P. Diatomei i dinotsisty v intervale pozdnego paleotsena – rannego eotsena v biokremnistykh fatsiyakh srednego Zauralya [Diatoms and dinocysts in the Late Paleocene – Early Eocene interval in the bio-silicon facies of the Middle Trans-Urals]. *Stratigraphy and Geological Correlation*, 2012, vol. 20, no. 4, pp. 68–94.
- Smirnov P.V., Konstantinov A.O. Biogenic silica-accumulation in the West Siberian Sea Basin in the Paleocene–Eocene: factors and stages. *Lithosphere*, 2017, vol. 17, no. 4, pp. 26–47. In Rus.
- Amon E.O. Factors and conditions for the accumulation of biogenic silicites in the Paleogene Basin of Western Siberia. *Bulletin of Moscow Society of Naturalists. Geological series*, 2018, vol. 93, no. 4, pp. 51–67. In Rus.
- Distanov U.G. Osobennosti kremnenakopleniya v morskikh platformnykh basseynakh [Features of silica accumulation in sea platform basins]. *Syryevaya baza kremnistykh porod SSSR* [Russian Raw material base of siliceous rocks of the USSR]. Moscow, Nauka Publ., 1974. pp. 13–17.
- 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.
- Martynov V.A., Sigov A.P., Chirva S.A. Zapadno-Sibirskaya plita [West Siberian plate]. *Stratigrafiya SSSR. Paleogenovaya sistema*

- [Stratigraphy of the USSR. Paleogene system]. Ed. by D.V. Nalivkin. Moscow, Nedra Publ., 1975. pp. 315–329.
12. Smirnov P.V. Silica phase transitions in opal-cristobalite rocks as a factor of quality of siliceous raw material. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 9, pp. 6–15. In Rus.
  13. Bakieva L.B. *Palinologiya i stratigrafiya paleogena zauralskogo i tsentralnogo litologofatsialnykh rayonov Zapadnoi Sibiri* [Palynology and Stratigraphy of the Paleogene in the Trans-Uralian and Central Lithological-Facies Regions of Western Siberia]. Tyumen, Tyumen Oil and Gas University Publ., 2005. 190 p.
  14. Krotov A.I., Shibkova K.G. Kompleksy diatomovykh i kremnevyykh zhgutikovyykh vodorosley v verkhnelovyykh paleogenovykh i neogenovykh otlozheniyakh vostochnogo sklona Urala i Zauralya [Complexes of diatom and flint flagellated algae in Upper Cretaceous Paleogene and Neogene sediments on the eastern slope of the Urals and Trans-Urals]. *Materialy po geologii i poleznym iskopyemym Urala*, 1961, no. 9, pp. 191–249.
  15. Smirnov P.V., Konstantinov A.O. Comparative studies of Eocene and Paleocene diatomite from Trans-Urals (on the example of Kamyshlov deposit and section Brusyana). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 11, pp. 96–104. In Rus.
  16. Akhmetev M.A., Zaporozhets N.I. Klimatobrazuyushchaya rol morskikh techeniy v rannem paleogene v vysokikh shirotakh Evrazii [Climate-forming role of sea currents in the early Paleogene in high latitudes of Eurasia]. *Stratigraphy and Geological Correlation*, 2017, vol. 25, no. 2, pp. 115–126.
  17. Bockelie J.F. Ichnofabric mapping and interpretation of Jurassic reservoir rocks of the Norwegian North Sea. *Palaaios*, 1991, no. 6, pp. 206–215.
  18. Bromley R.G. *Trace fossils. Biology, taphonomy and applications*. London, Chapman and Hall, 1996. 361 p.
  19. Buatois L.A., Mángano M.G. *Ichnology: organism-substrate interactions in space and time*. New York, Cambridge university press, 2011. 358 p.
  20. Vyalov O.S. Sledy zhiznedeyatelnosti organizmov i ikh klassifikatsiya [Traces of vital activity of organisms and their classification]. *Sledy zhiznedeyatelnosti drevnikh organizmov* [Russian Traces fossils of ancient organisms]. Moscow, Nauka Publ., 1993. pp. 5–11.
  21. Mikulas R., Dronov A. *Paleoikhnologiya – vvedenie v izuchenie sledov iskopaemykh organizmov* [Paleoichnology – introduction to the study of traces of fossil organisms]. Prague, Geological Institute of the Academy of Sciences of the Czech Republic, 2006. 122 p.
  22. Seilacher A. *Trace fossil analysis*. Berlin, Springer, 2007. 226 p.
  23. Frey R.W., Pemberton S.G. Trace fossils facies models. *Facies models. Geoscience Canada*, 1984, vol. 2, no. 1, pp. 189–207.
  24. Smirnov P.V. Preliminary results of revision of mineral-raw material base of opal-cristobalite rocks in middle Trans-Urals. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 4, pp. 28–37.
  25. Vyalov O.S. *Sledy zhiznedeyatelnosti organizmov i ikh paleontologicheskoe znachenie* [Traces of vital activity of organisms and their paleontological significance]. Kiev, Academy of Sciences Publ., 1966. 219 p.
  26. Vyalov O.S. Paleoikhnologicheskiy etyud [Paleoichnological etude]. *Paleontologicheskii sbornik*, 1989, no. 26, pp. 72–78.
  27. Bromley R.G., Ekdale A.A. Fossil preservation in flint in the European chalk. *Journal of Paleontology*, 1984, vol. 48, no. 2, pp. 298–311.
  28. Villegas-Martín J., Netto R.G., Lavina E.C. Rojas-Consuegra R. Ichnofabrics of the Capdevila Formation (early Eocene) in the Los Palacios Basin (western Cuba): Paleoenvironmental and paleoecological implications. *Journal of South American Earth Sciences*, 2014, vol. 56, pp. 214–227.
  29. Yanin B.T., Baraboshkin E.Yu. Nory Thalassinoides (strukturny zaryvaniya desyatinogikh rakoobraznykh) iz nizhnemelovykh otlozheniy yugo-zapadnogo i tsentralnogo Kryma [Burrows of Thalassinoides (structures of decapod crustaceans burying) from the Lower Cretaceous sediments of the southwestern and central Crimea]. *Stratigraphy and Geological Correlation*, 2013, vol. 21, no. 3, pp. 39–49.
  30. Frey R.W., Howard J.D. Upper Cretaceous trace fossils, Book cliffs of Utah: a field guide. *Society of Economic Paleontologists and Mineralogists. Rocky Mountain Section*, 1985, no. 10, pp. 115–152.
  31. Frey R.W., Howard J.D. Trace fossils and depositional sequences in a clastic shelf setting, Upper Cretaceous of Utah. *Journal of Paleontology*, 1990, vol. 64, pp. 803–820.
  32. Dworschak P.C. The pumping rates of the burrowing shrimp Upogebia Pusilla (Petagna) (Decapoda: Thalassinidea). *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 1981, vol. 52, pp. 25–35.
  33. Dworschak P.C. The Biology of Upogebia pusilla (Petagna) (Decapoda, Thalassinidea). *P.S.Z.N.I: Marine Ecology*, 1983, vol. 4, no. 1, pp. 19–43.
  34. Myrow P.M. Thalassinoides and the Enigma of Early Paleozoic open-framework burrow system. *Palaaios*, 1995, vol. 10, no. 1, pp. 58–74.
  35. Urash R.G., Savrda C.E. Ichnology of an Eocene shallow marine passive margin condensed section, eastern Gulf coastal plain, Alabama, U.S.A. *Palaogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2017, vol. 471, pp. 58–70.
  36. Kim J.Y., Pickerill R.K. Cretaceous Nonmarine Trace Fossils from the Hasandong and Jinju formations of the Namhae Area, Kyongsangnamdo, Southeast Korea. *Ichnos*, 2002, vol. 9, pp. 41–60.
  37. Bromley R.G., Frey R.W. Redescription of the trace fossil Gyrolithes and taxonomic evaluation of Thalassinoides, Ophiomorpha and Spongeliomorpha. *Bulletin of the Geological Society of Denmark*, 1974, vol. 23, pp. 311–335.
  38. Ekdale A.A., Bromley R.G. Paleothologic interpretation of complex Thalassinoides in shallow-marine limestones, Lower Ordovician, southern Sweden. *Palaogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2003, vol. 192, pp. 221–227.
  39. Dashtgard S.E., Gingras M.K. Facies architecture and ichnology of recent salt-marsh deposits: Waterside Marsh, New Brunswick, Canada. *Journal of Sedimentary Research*, 2005, vol. 75, pp. 596–607.
  40. Tsekhovskiy Yu.G. Role of volcanism and hydrotherms in the platform sedimentation process of the boundary Cretaceous-Paleogene epoch of destructive tectogenesis in Central Eurasia. Article 1. Paleogeography, products of volcanism and hydrothermal activity. *Bulletin of Moscow Society of Naturalists. Geological series*, 2017, vol. 92, no. 4, pp. 34–48. In Rus.
  41. Tsekhovskiy Yu.G. Role of volcanism and hydrotherms in the platform sedimentation process of the boundary Cretaceous-Paleogene epoch of destructive tectogenesis in Central Eurasia. Article 2. Features of platform sedimentation. *Bulletin of Moscow Society of Naturalists. Geological series*, 2017, vol. 92, no. 6, pp. 3–13. In Rus.
  42. Zorina S.O., Afanasyeva N.I., Khayrtdinova L.R. Sobytiynaya model obrazovaniya paleotsen-eotsenovoy peschano-glinisto-silitsitovoy tolschi Russkoy plity [Event model of the formation of the Paleocene-Eocene sand-clay-silicite strata of the Russian Plate]. *Reports of the Academy of Sciences*, 2018, vol. 480, no. 1, pp. 60–63.

Received: 29 January 2020.

#### Information about the authors

**Yaroslav S. Trubin**, expert, Industrial University of Tyumen.

**Peter A. Yan**, Cand. Sc., associate professor, head of the laboratory, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.



УДК 553.98

## О ЗАКОНЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УГЛЕВОДОРОДОВ ПО МАССЕ

Лившиц Валерий Рафаилович,

livshic.vr@mail.ru

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

**Актуальность** исследования обусловлена той, исключительно важной ролью, которую играет вероятностное распределение скоплений углеводородов по массе (усеченное распределение Парето) при количественном прогнозе нефтегазоносности в слабоизученных и зрелых нефтегазоносных бассейнах. Знание этого распределения позволяет осуществлять прогноз количества и суммарных ресурсов углеводородов в любых заданных интервалах крупности, прогноз величины запасов не выявленных скоплений и последовательности их открытий.

**Цель:** для закона распределения залежей углеводородов по массе – усеченного распределения Парето, получить соответствующее вероятностное распределение для месторождений по массе углеводородов.

**Методы:** аналитические методы теории вероятностей, метод статистических испытаний, статистическая обработка эмпирических данных.

**Объект:** нефтегазоносные бассейны, запасы нефти и газа залежей, месторождений, количество залежей в месторождениях, законы распределения скоплений углеводородов по массе.

**Результаты.** Показано, что степенное распределение вероятностей (классическое распределение Парето, усеченное распределение Парето) не может играть роль распределения скоплений углеводородов по массе одновременно и для залежей, и для месторождений. Применение метода статистических испытаний позволило получить условные вероятностные распределения месторождений углеводородов по массе при фиксированном числе залежей в них. На основе обработки эмпирических данных по четырем крупнейшим нефтегазоносным провинциям России (Волго-Уральской, Западно-Сибирской, Тимано-Печорской и Северо-Кавказской) были найдены оценки распределений месторождений углеводородов по количеству залежей в них. Исходя из закона распределения залежей углеводородов по их крупности – усеченного распределения Парето, найден закон распределения углеводородов по массе для месторождений. Показано, что полученное вероятностное распределение, не являясь, строго говоря, степенным, оказывается весьма близким к нему.

### Ключевые слова:

Нефтегазоносная провинция, скопления, залежи, месторождения углеводородов, вероятностное распределение месторождений и залежей углеводородов по массе, классическое распределение Парето, усеченное распределение Парето.

### Введение

Современные представления о преобразовании углеводородистого вещества в земной коре [1, 2] позволяют утверждать, что процессы генерации, миграции, аккумуляции и рассеяния углеводородов (УВ) носят стохастический характер. Как следствие, стохастическим оказывается и результат процесса формирования скоплений УВ в ловушках, так, что масса скопления представляет собой случайную величину, математическое описание которой дается ее вероятностным распределением.

Закон распределения скоплений УВ по массе играет исключительно важную роль как для теории нефтегенеза, так и для практики количественной оценки перспектив нефтегазоносности. В теоретическом плане этот закон должен логически входить в общую теорию нефтегенеза [1, 2], а в практическом плане такой закон позволяет оценивать количество и суммарные ресурсы УВ в любых заданных интервалах крупности, осуществлять прогноз вероятных запасов неоткрытых месторождений и последовательность их выявления [3–5].

Первые попытки эмпирически установить закон распределения скоплений УВ по массе на основе обработки величин запасов открытых месторождений в хорошо изученных нефтегазоносных бассейнах (НГБ) привел к ошибочному заключению о логарифмически

нормальном законе их распределения [6]. Ошибочность этого результата заключается в том, что в силу действия геологоразведочного фильтра [7] совокупность величин запасов открытых скоплений не является репрезентативной выборкой для величин запасов всех скоплений бассейна.

Последующая статистическая обработка данных по Волго-Уральскому НГБ с учетом действия геологоразведочного фильтра позволил В.И. Шпильману установить степенной характер распределения месторождений по запасам, названный им законом «обратных квадратов» [6].

Дальнейшие исследования по множеству хорошо изученных НГБ мира, выполненные А.Э. Конторовичем и В.И. Деминим, привели их к более общему выражению для распределения месторождений нефти и газа по величине запасов – усеченному распределению Парето [4, 5]. Распределение Парето, усеченное на отрезке  $[x_0, x_m]$ , имеет вид

$$\varphi(x) = C \left( \frac{1}{x^\lambda} - \frac{1}{x_m^\lambda} \right),$$

где  $1 < \lambda < 3$  – параметр распределения,  
 $C = \frac{(\lambda-1)x_m^\lambda}{x_0 \left[ \lambda - 1 + \left( \frac{x_m}{x_0} \right)^\lambda \right] - \lambda x_m}$  – нормирующий множитель.

Наконец, более поздние исследования Н.А. Крылова, А.Г. Алексина, Ю.Н. Батурина [8], а также Ю.А. Арсирия,

Б.П. Кобышева, Д.И. Чупрынина [9] подтвердили справедливость результатов В.И. Шпильмана, А.Э. Конторовича, В.И. Демина. К аналогичному заключению о характере распределения скоплений УВ по величине запасов пришли и зарубежные исследователи [10–14].

Поскольку степенной характер этого распределения оказывается справедливым независимо от геологического строения и истории развития НГБ, естественно предположить, что этот закон носит универсальный, фундаментальный характер [1, 2].

В настоящее время степенной характер распределения скоплений УВ по массе не вызывает возражений у подавляющего большинства исследователей, однако остается открытым вопрос о генезисе этого распределения, а также о том, распределение каких именно скоплений описывает этот закон: залежей или месторождений, поскольку статистическая обработка величин запасов открытых скоплений может относиться как к залежам, так и к месторождениям УВ. В результате возникла ситуация, когда неявно предполагается справедливость степенного закона как для залежей, так и для месторождений УВ. Однако распределение Парето не может одновременно играть роль вероятностного распределения по массе УВ и для залежей, и для месторождений.

Действительно, залежь, определяемая как единичное скопление нефти и газа, заполняющее ловушку полностью или частично, представляет собой единый физический объект, в котором протекают процессы аккумуляции и рассеяния нефти. Для таких объектов был разработан целый ряд схем, приводящих к степенному характеру распределения залежей УВ по массе. В основе этих схем лежат процессы аккумуляции-диссипации УВ в ловушках [15], процессы латеральной миграции УВ [16, 17], процессы в неравновесных динамических системах [18] и, наконец, несомненная связь степенного распределения с фрактальными объектами [19]. Какая бы из этих схем не реализовывалась в действительности, в любом случае, с большой долей уверенности можно утверждать, что распределение УВ в залежах подчиняется степенному распределению.

Месторождение же (если оно не однозалежное) – группа залежей, имеющих в проекции на земную поверхность полное или частичное перекрытие своих контуров нефтегазоносности или же группа залежей, разобщенных в плане, но контролируемых одной локальной структурой. Таким образом, месторождение является объектом не столько физическим, сколько геометрическим, объединяющим несколько залежей по принципу их геометрического расположения, тогда как характер процессов аккумуляции и рассеяния в различных залежах одного месторождения может быть существенно различным. При этом масса месторождения есть просто сумма масс УВ залежей, составляющих это месторождение.

Закон распределения суммы случайных величин может совпадать (с точностью до параметров сдвига и масштаба) с законом распределения слагаемых только в том случае, если эти законы являются устойчивыми [20]. Сами устойчивые распределения относятся к классу так называемых безгранично делимых распре-

делений, а такие распределения не могут быть сосредоточены на конечном интервале [20]. Из этого следует, что усеченное распределение Парето, не являясь безгранично делимым, не является и устойчивым. Таким образом, если принять, что распределение залежей нефти и газа по массе подчиняется усеченному распределению Парето, то распределение месторождений не может подчиняться этому распределению.

Заметим также, что классическое распределение Парето является безгранично делимым [20] и поэтому может играть роль вероятностного распределения для суммы случайных величин, т. е. выступать в качестве распределения для массы месторождений УВ, но в этом случае оно не будет распределением залежей, поскольку не является устойчивым распределением.

Найдем распределение месторождений УВ по массе в предположении, что распределение залежей в НГБ подчиняется усеченному распределению Парето. Очевидно, что задача сводится к нахождению распределения суммы случайных величин с известной плотностью.

Пусть  $z$  – масса УВ месторождения, т. е. сумма масс залежей. Очевидно, что распределение величины  $z$  зависит от количества залежей в месторождении, т. е. описывается условной плотностью распределения месторождений с  $k$  залежами  $f(z|k)$ .

Тогда безусловная плотность распределения месторождений по величине запасов в НГБ может быть найдена по формуле полной вероятности

$$f(z) = \sum_{k=1}^m P_k f(z|k), \quad (*)$$

где  $P_k$  – вероятность месторождения с  $k$  залежами,  $m$  – максимально возможное количество залежей в месторождении.

#### Условные плотности распределения месторождений УВ по массе с фиксированным количеством залежей

Очевидно, что условная плотность распределения месторождений с одной залежью совпадает с плотностью распределения залежей  $\varphi(x)$  так, что  $f(z|1) = \varphi(z)$ .

Найдем плотность распределения по массе месторождений, состоящих из двух залежей  $f(z|2)$ , при условии, что распределение этих залежей подчиняется усеченному распределению Парето  $\varphi(x)$ . Запасы такого месторождения  $z$  равны сумме двух случайных величин – масс УВ залежей, распределенных как  $\varphi(x)$ , а их плотность распределения (в предположении независимости масс залежей) выражается интегралом свертки [20]

$$f(z|2) = \int_0^z \varphi(x) \varphi(z-x) dx.$$

Для случая, когда функция  $\varphi(x)$  задана на положительном отрезке  $x_0 \leq x \leq x_m$ , свертка примет вид

$$f(z|2) = \begin{cases} \int_0^{z-x_0} f(x)f(z-x)dx, & 2x_0 \leq z \leq x_0 + x_m \\ \int_{x_0}^{x_m} f(x)f(z-x)dx, & x_0 + x_m \leq z \leq 2x_m \end{cases}$$

Подставляя в это выражение плотность усеченно-го распределения Парето  $\varphi(x)$ , получим

$$f(z|2) = \begin{cases} C^2 \left[ \int_{x_0}^{z-x_0} \frac{dx}{x^\lambda(z-x)^\lambda} + \frac{2}{x_m^\lambda(\lambda-1)} \left( \frac{1}{(z-x_0)^{\lambda-1}} - \frac{1}{x_0^{\lambda-1}} \right) + \frac{z-2x_0}{x_m^{2\lambda}} \right] & \text{при } 2x_0 \leq z \leq x_0 + x_m \\ C^2 \left[ \int_{z-x_m}^{x_m} \frac{dx}{x^\lambda(z-x)^\lambda} + \frac{2}{x_m^\lambda(\lambda-1)} \left( \frac{1}{x_m^{\lambda-1}} - \frac{1}{(z-x_m)^{\lambda-1}} \right) + \frac{2x_m-z}{x_m^{2\lambda}} \right] & \text{при } x_0 + x_m \leq z \leq 2x_m \end{cases}$$

Здесь первое слагаемое соответствует случаю классического Парето, для перехода к которому следует положить  $x_m \rightarrow \infty$ . Поскольку правая граница усеченного распределения Парето, как правило, – величина достаточно большая, то разница между усеченным и классическим Парето оказывается весьма незначительной. При больших  $z$  распределение имеет степенную асимптотику, так что его правый «хвост» ведет себя так же, как и распределение Парето.

Интеграл  $\int \frac{dx}{x^\lambda(z-x)^\lambda}$  в общем случае не выражается через элементарные функции. Однако при  $\lambda = 2$  подынтегральная функция оказывается рациональной и интеграл может быть записан в конечном виде

$$\int \frac{dx}{x^2(z-x)^2} = \frac{1}{z^2(z-x)} - \frac{1}{z^2x} + \frac{2}{z^3} \ln \frac{x}{z-x},$$

так что для случая  $\lambda = 2$  плотность распределения месторождения с двумя залежами будет иметь вид

$$f(z|2) = \begin{cases} C^2 \left[ \frac{2}{z^2} \left( \frac{1}{x_0} - \frac{1}{z-x_0} + \frac{2}{z} \ln \frac{z-x_0}{x_0} \right) + \frac{2}{x_m^2} \left( \frac{1}{z-x_0} - \frac{1}{x_0} \right) + \frac{z-2x_0}{x_m^4} \right] & \text{при } 2x_0 \leq z \leq x_0 + x_m \\ C^2 \left[ \frac{2}{z^2} \left( \frac{1}{x_m} - \frac{1}{z-x_m} + \frac{2}{z} \ln \frac{x_m}{z-x_m} \right) + \frac{2}{x_m^2} \left( \frac{1}{x_m} - \frac{1}{z-x_m} \right) + \frac{2x_m-z}{x_m^4} \right] & \text{при } x_0 + x_m \leq z \leq 2x_m \end{cases}$$

При  $\lambda \neq 2$  значение этого интеграла может быть найдено численным интегрированием.

Для нахождения условных плотностей распределения по запасам месторождений с числом залежей больше двух  $f(z|k), k > 2$  можно воспользоваться методом Монте-Карло, генерируя  $k$  случайных чисел, распределенных в соответствии с усеченным распределением Парето и имитирующих массы залежей. Сумма этих чисел будет имитировать массу место-

рождения, составленного из  $k$  залежей. Метод генерации таких чисел подробно рассмотрен в [4]. Многократное повторение этой процедуры позволяет получить статистическое распределение месторождений по массе с заданным количеством залежей.

На рис. 1 приведены условные плотности распределения вероятности массы месторождения при различных значениях числа залежей в нем  $k$  и параметра  $\lambda$  усеченного распределения Парето. Как видно из рисунка, плотности распределения месторождений имеют моду и это наиболее вероятное значение массы увеличивается с ростом числа залежей.

Если бы в НГБ отсутствовали однозалежные месторождения, распределение месторождений УВ по величине запасов в таком бассейне имело бы моду. Однако, как показано ниже, большая часть месторождений бассейна являются именно однозалежными.

### Безусловное распределение месторождений УВ по массе в НГБ

Как видно из формулы полной вероятности (\*), для нахождения безусловного распределения месторождений УВ по массе необходимо знание априорных вероятностей  $P_k, k = 1, \dots, m$ . Для получения статистических оценок этих величин можно воспользоваться информацией по хорошо изученным нефтегазоносным провинциям. На рис. 2 приведены оценки этих вероятностей для Волго-Уральской, Западно-Сибирской, Тимано-Печорской и Северо-Кавказской провинций, для  $m = 10$  (месторождения с количеством залежей до 10 составляют более 80 % от общего числа месторождений провинции, для месторождений с  $m > 10$ , в силу малого их количества, выборочные флуктуации не позволяют получить оценку приемлемой точности). Интересно отметить, что все четыре зависимости практически совпадают и хорошо аппроксимируются степенной кривой.

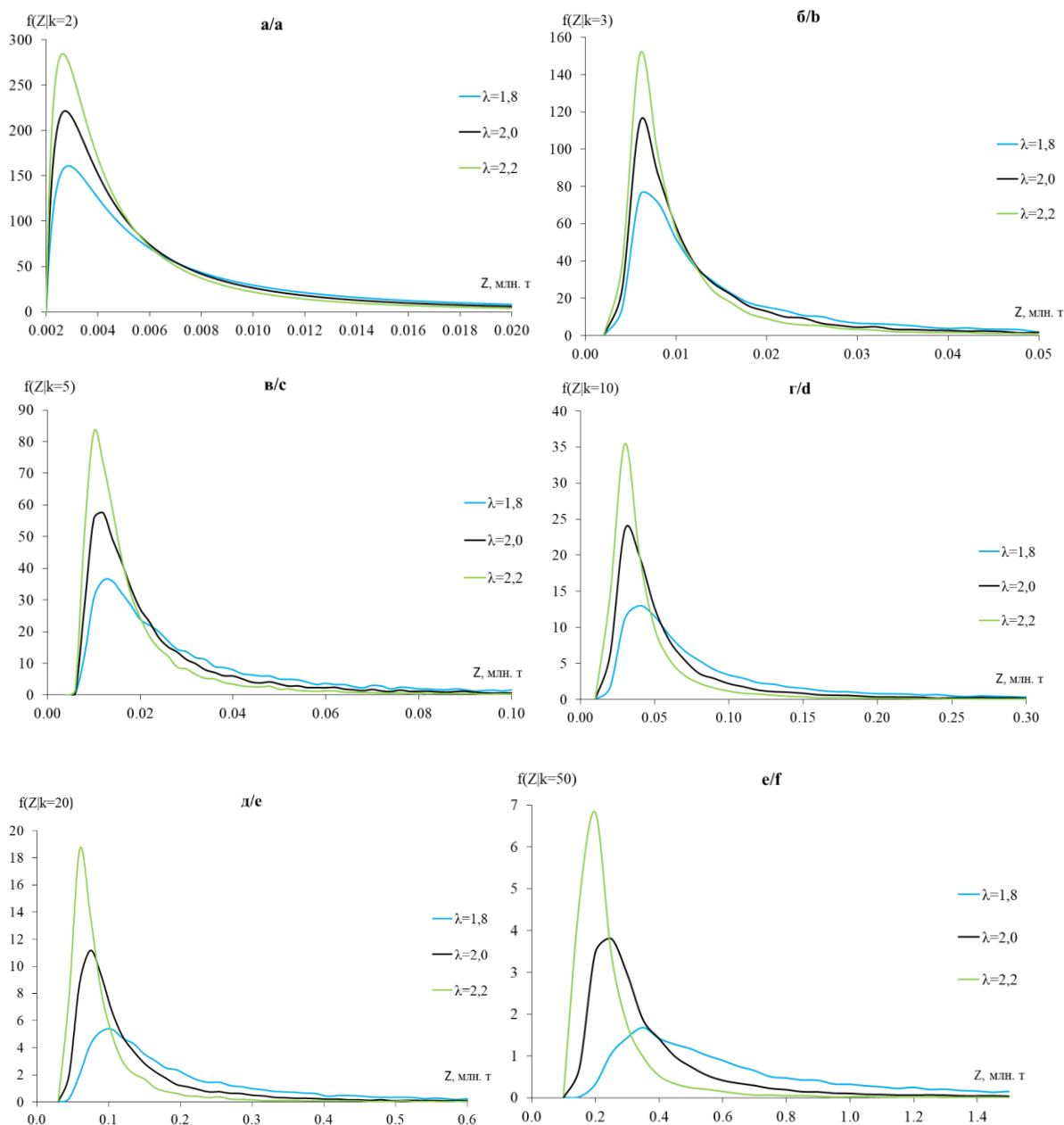
На рис. 3 показаны безусловные плотности распределения месторождений для различных значений параметра  $\lambda$  усеченного распределения Парето, в соответствии с которым распределены массы залежей, и при оценках априорных вероятностей, полученных для Волго-Уральской провинции.

Как видно из рисунка, полученные плотности представляют собой амодальные, асимметричные распределения, которые хорошо аппроксимируются степенной зависимостью. Тем не менее эти плотности не являются степенным распределением, и их проверка по статистическим критериям с очень высокой степенью достоверности отклоняет эту гипотезу.

Внешнее сходство со степенным распределением обусловлено тем, что влияние на сумму (\*) слагаемых с  $k > 1$  оказывается слабым по сравнению со слагаемым  $k = 1$ . Это связано, во-первых, со значительной долей однозалежных месторождений, которые распределены в соответствии с усеченным распределением Парето, и, во-вторых, с тем, что модальные значения условных плотностей наиболее значительны для малых  $k$ , т. е. приходится на те значения массы, для которых плотность распределения однозалежных

месторождений велика. Сказанное иллюстрируется на рис. 4, где для  $\lambda = 2$  показаны произведения услов-

ных плотностей на соответствующие веса  $P_k$  для  $k = 1, 2, 3, 4$  и их сумма.



**Рис. 1.** Условная плотность распределения месторождений  $УВ$  по массе при фиксированном числе залежей  $k$  и различном  $\lambda$ : а)  $k=2$ , б)  $k=3$ , в)  $k=5$ , г)  $k=10$ , д)  $k=20$ , е)  $k=50$

**Fig. 1.** Conditional density of size distribution of oil and gas fields for a fixed number of pools  $k$  and different  $\lambda$ : а)  $k=2$ , б)  $k=3$ , в)  $k=5$ , г)  $k=10$ , д)  $k=20$ , е)  $k=20$ , ф)  $k=50$

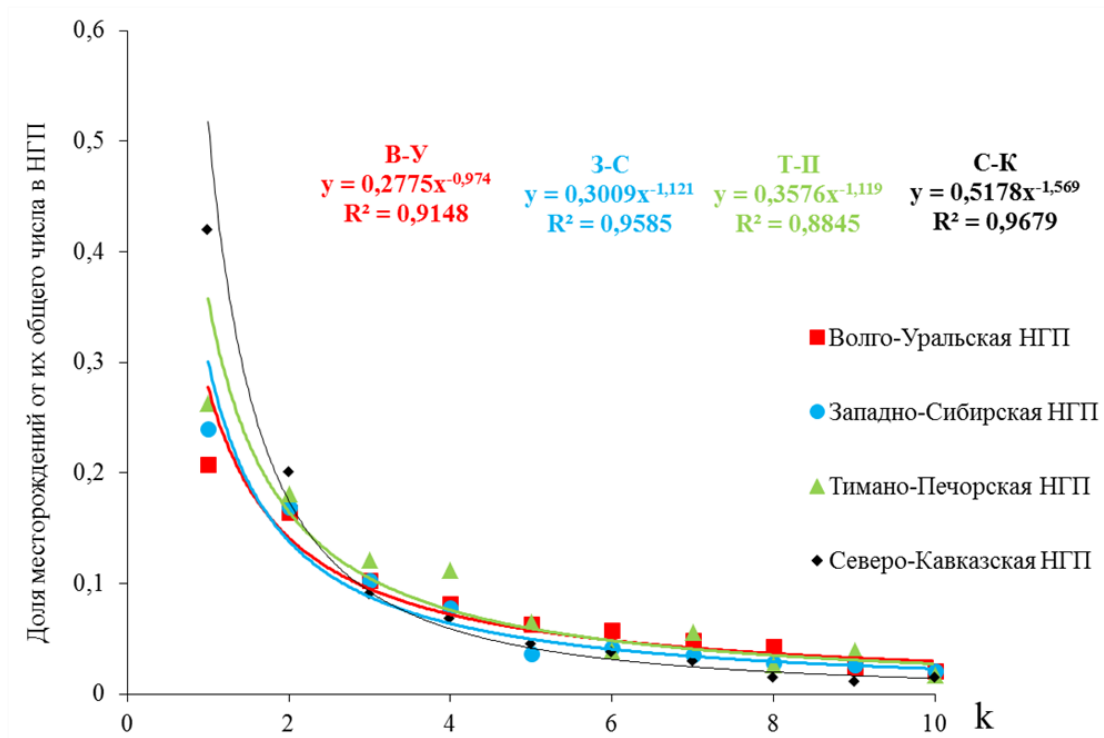
### Заключение

Выполненное исследование позволило сделать следующие заключения:

1. Хотя распределение залежей нефти и газа по величине запасов в нефтегазоносном бассейне подчиняется усеченному распределению Парето, это распределение не может быть распределением по массе для месторождений бассейна.
2. Распределение числа месторождений по количеству залежей в них практически одинаково для

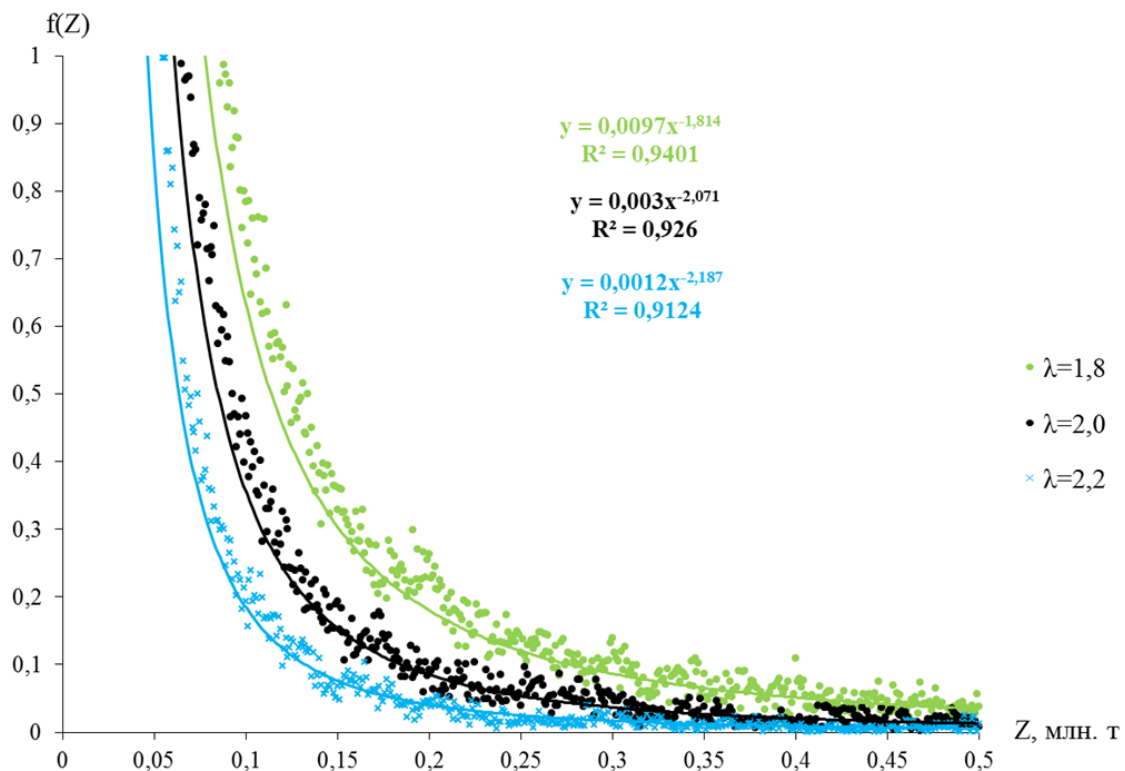
четырёх крупнейших нефтегазоносных провинций России и хорошо аппроксимируется степенным распределением.

3. Распределение месторождений углеводородов в нефтегазоносном бассейне по величине их запасов, не являясь, строго говоря, степенным распределением, оказывается весьма близким к нему, причем основное отличие лежит в области мелких и мельчайших скоплений.



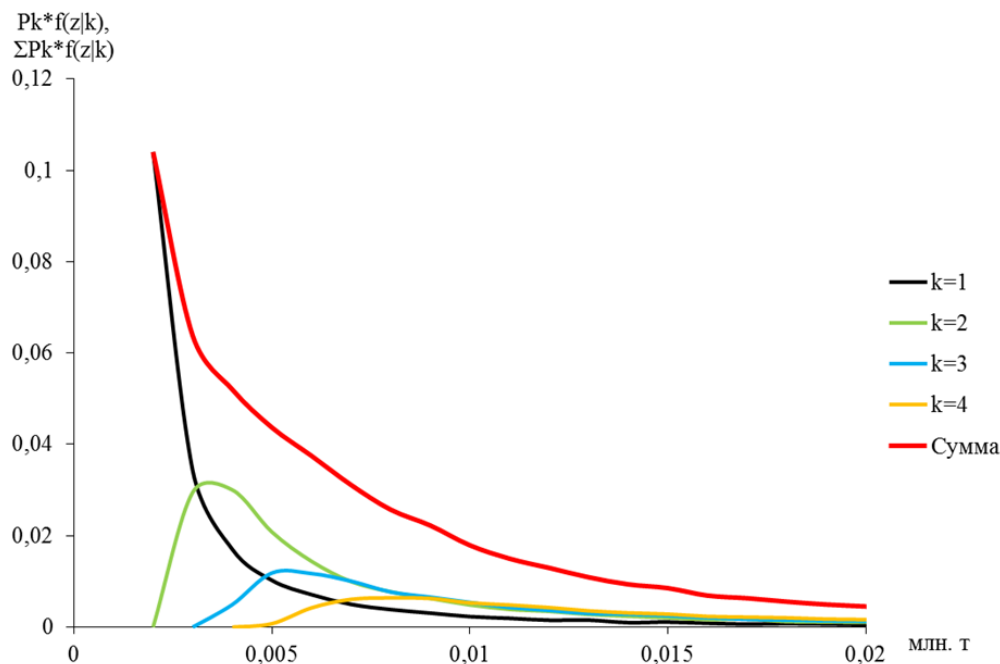
**Рис. 2.** Зависимость доли месторождений (от их общего числа) для Волго-Уральской, Западно-Сибирской, Тимано-Печорской и Северо-Кавказской НПП от количества залежей в месторождении

**Fig. 2.** Proportion of oil and gas fields (of their total number) for the Volga-Ural, West Siberian, Timan-Pechora and North-Caucasian petroleum provinces as a function of the number of pools in each field



**Рис. 3.** Безусловные плотности распределения месторождений по массе для различных значений параметра λ

**Fig. 3.** Unconditional densities of the distribution of sizes of oil and gas fields for different values of the parameter λ



**Рис. 4.** Иллюстрация возникновения амодального характера распределения месторождений УВ по запасам  
**Fig. 4.** Illustration of the amodal nature of distribution of oil and gas fields by their reserves sizes

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kontorovich A.Eh. Formation of oil and gas in the Earth's crust // Petroleum geology handbook / Ed. by N.A. Eremenko. – Los Angeles, California, U.S.A.: OSI Publications, 1991. – P. 548–569.
2. Конторович А.Э. Осадочно-миграционная теория нефтидогенеза: состояние на рубеже XX и XXI вв., пути дальнейшего развития // Геология нефти и газа. – 1998. – № 10. – С. 8–16.
3. Конторович А.Э., Лившиц В.Р. Новые методы оценки, особенности структуры и пути освоения прогнозных ресурсов нефти зрелых нефтегазоносных провинций (на примере Волго-Уральской провинции) // Геология и геофизика. – 2017. – № 12. – С. 1835–1852.
4. Kontorovich A., Domain V., Livshits V. Size distribution and dynamics of oil and gas field discoveries in petroleum basins // American Association of Petroleum Geologists Bulletin. – 2001. – V. 85 (9). – P. 1609–1622.
5. Конторович А.Э., Демин В.И. Прогноз количества и распределения по запасам месторождений нефти и газа // Геология и геофизика. – 1979. – № 3. – С. 26–46.
6. Kaufman G.M., Balcer Y., Kruit D.A. Probabilistic model of oil and gas discovery // American Association of Petroleum Geologists. – 1975. – № 1. – P. 113–142.
7. Шпильман В.И. Количественный прогноз нефтегазоносности. – М.: Недра, 1982. – 215 с.
8. Крылов Н.А., Алексин А.Г., Батурин Ю.Н. Задачи и пути ускорения научно-технического прогресса при поисках нефти в районах с высокой разведанностью недр // Геология нефти и газа. – 1986. – № 7. – С. 1–7.
9. Прогноз размеров и числа неоткрытых залежей УВ и методика их поисков в ДДВ / Ю.А. Арсирый, Б.П. Кабышев, Д.И. Чупрынин, А.Ф. Шевченко, З.П. Шевякова // Геология нефти и газа. – 1986. – № 10. – С. 42–46.
10. Schuenemeyer J.H., Lawrence J., Drew A. Procedure to estimate the parent population of the size of oil and gas fields as revealed by a study of economic truncation // Mathematical Geology. – 1983. – V. 15 (1). – P. 145–160.
11. Houghton J.C. Use of the truncated shifted Pareto distribution in assessing size distribution of oil and gas fields // Mathematical Geology. – 1988. – № 8. – P. 907–937.
12. Merriam D.F., Drew L.J., Schuenemeyer J.H. Zipf's law: a viable geological paradigm? // Natural Resources Research. – 2004. – № 13. – P. 265–271.
13. Laherrere J. Distribution of field sizes in a petroleum system: parabolic fractal, lognormal or stretched exponential? // Marine and Petroleum Geology. – 2000. – V. 17 (4). – P. 539–546.
14. Smith J.L., Ward G.L. Maximum likelihood estimates of the size distribution of North Sea Oil Fields // Mathematical Geology. – 1981. – V. 13 (5). – P. 399–413.
15. Бурштейн Л.М. Возможный механизм формирования распределения скоплений углеводородов по крупности // Геология и геофизика. – 2004. – Т. 45. – № 7. – С. 815–825.
16. Лившиц В.Р. Латеральная миграция углеводородов как возможный механизм формирования степенного распределения их скоплений по массе // Геология и геофизика. – 2017. – № 3–4. – С. 372–383.
17. Лившиц В. Р. Имитационная стохастическая модель латеральной миграции углеводородов // Геология и геофизика. – 2014. – Т. 55. – № 5–6. – С. 906–917.
18. Родкин М.В., Рундквист Д.В. Геофлюидодинамика. Приложение к сейсмологии, тектонике, процессам рудо и нефтегенеза. – Долгопрудный: ИД «Интеллект», 2017. – 282 с.
19. Деменок С.Л. Фрактал: между мифом и ремеслом. – СПб.: ООО «Страта», 2018. – 87 с.
20. Феллер В. Введение в теорию вероятностей и ее приложения. – М.: Мир, 1984. – Т. 2. – 751 с.

Поступила 22.02.2020 г.

#### Информация об авторах

**Лившиц В.Р.**, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН.

UDC 553.98

## LAW OF SIZE DISTRIBUTION OF OIL AND GAS FIELDS

Valery R. Livshits,  
livshic.vr@mail.ru

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch Russian Academy of Sciences,  
3, Akademician Koptuyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

**Relevance** of the study is related to the extremely important role played by the probabilistic distribution of the sizes of oil and gas fields (truncated Pareto distribution) in the quantitative prediction of petroleum potential in both mature and immature basins. Using this distribution it is easy to forecast the quantity and total hydrocarbon resources in any given size interval as well as the forecast of the sizes of undiscovered oil and gas pools and the succession of their discoveries.

**The aim** of the study is to obtain the respective probability distribution of oil and gas fields using the law of the size distribution of oil and gas pools (truncated Pareto distribution).

**Methods:** analytical methods of probability theory, statistical test method, statistical processing of empirical data.

**Object:** petroleum basins, oil and gas reserves of pools and fields, number of pools in each field, laws governing the distribution of the sizes of oil and gas fields.

**Results.** It was shown that the power-law probability distribution (the classical Pareto distribution, the truncated Pareto distribution) cannot be used as the distribution of sizes of both oil and gas fields and pools. By using statistical testing procedures, the conditional probabilistic distributions of the sizes of oil and gas fields were obtained for a fixed number of pools. Based on the processing of empirical data for four largest petroleum provinces of Russia (Volga-Ural, West Siberian, Timan-Pechora and North Caucasian), we obtained estimates of the distribution of the number of oil and gas pools in each field. The law governing the distribution of the sizes of oil and gas fields was obtained using the law of size distribution of oil and gas pools (truncated Pareto distribution). It was shown that this probability distribution, not being, strictly speaking, a power law, turns out to be very close to it.

**Key words:**

Petroleum province, hydrocarbon accumulations, pools, fields, probabilistic distribution of sizes of oil and gas pools and fields, classical Pareto distribution, truncated Pareto distribution.

## REFERENCES

- Kontorovich A. Eh. Formation of oil and gas in the Earth's crust. *Petroleum geology handbook*. Ed. by N.A. Eremenko. Los Angeles, California, U.S.A., OSI Publications, 1991. pp. 548–569.
- Kontorovich A.E. Osadochno-migratsionnaya teoriya naftidogeneza: sostoyanie na rubezhe XX i XXI vv., puti dalneyshego razvitiya [Sedimentary-migration theory of naftidogenesis: state at the turn of the 20<sup>th</sup> and 21<sup>st</sup> centuries, paths of further development]. *Geologiya nefii i gaza*, 1998, no. 10, pp. 8–16.
- Kontorovich A.E., Livshits V.R. New methods of assessment, structure and development of oil and gas resources of mature petroleum provinces (Volga-Ural Province). *Geologiya i geofizika*, 2017, no. 12, pp. 1835–1852. In Rus.
- Kontorovich A., Domain V., Livshits V. Size distribution and dynamics of oil and gas field discoveries in petroleum basins. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 2001, vol. 85 (9), pp. 1609–1622.
- Kontorovich A.E., Demin V.I. Prognoz kolichestva i raspredeleniya po zapasam mestorozhdeniy nefii i gaza [Forecast of the quantity and distribution of oil and gas fields by reserves]. *Geologiya i geofizika*, 1979, no. 3, pp. 26–46.
- Kaufman G.M., Balcer Y., Kruit D.A. Probabilistic model of oil and gas discovery. *American Association of Petroleum Geologists*, 1975, no. 1, pp. 113–142.
- Shpilman V.I. Kolichestvennyy prognos neftegazonosnosti [A quantitative forecast of oil and gas potential]. Moscow, Nedra Publ., 1982. 215 p.
- Krylov N.A., Aleksin A.G., Baturin Yu.N. Zadachi i puti uskoreniya nauchno-tehnicheskogo progressa pri poiskakh nefii v rayonakh s vysokoy razvedannostyu nedr [Tasks and ways to accelerate scientific and technological progress in searching for oil in mature fields]. *Geologiya nefii i gaza*, 1986, no. 7, pp. 1–7.
- Arsiriy Yu.A., Kabyshev B.P., Chuprynin D.I., Shevchenko A.F., Shevyakova Z.P. Prognoz razmerov i chisla neotkrytykh zalezhey UV i metodika ikh poiskov v DDV [Forecast of the size and number of undiscovered hydrocarbon deposits and the method of their exploration]. *Geologiya nefii i gaza*, 1986, no. 10, pp. 42–46.
- Schuenemeyer J.H., Drew L.J. A procedure to estimate the parent population of the size of oil and gas fields as revealed by a study of economic truncation. *Mathematical Geology*, 1983, vol. 15 (1), pp. 145–160.
- Houghton J.C. Use of the truncated shifted Pareto distribution in assessing size distribution of oil and gas fields. *Mathematical Geology*, 1988, no. 8, pp. 907–937.
- Merriam D.F., Drew L.J., Schuenemeyer J.H. Zipf's law: a viable geological paradigm? *Natural Resources Research*, 2004, no. 13, pp. 265–271.
- Laherrere J. Distribution of field sizes in a petroleum system: parabolic fractal, lognormal or stretched exponential? *Marine and Petroleum Geology*, 2000, vol. 17 (4), pp. 539–546.
- Smith J.L., Ward G.L. Maximum likelihood estimates of the size distribution of North Sea Oil Fields. *Mathematical Geology*, 1981, vol. 13 (5), pp. 399–413.
- Burshteyn L. M. Possible control of size distribution of oil and gas fields. *Geologiya i geofizika*, 2004, vol. 45, no. 7, pp. 815–825. In Rus.
- Livshits V.R. Imitational stochastic model of lateral migration of hydrocarbons. *Geologiya i geofizika*, 2014, no. 5, pp. 906–917. In Rus.
- Livshits V.R. Lateral migration of hydrocarbons as a possible mechanism for the formation of the power distribution of their clusters by mass. *Geologiya i geofizika*, 2017, no. 3–4, pp. 372–383. In Rus.
- Rodkin M.V., Rundkvist D.V. *Geoflyuidodinamika. Prilozhenie k seysmologii, tektonike, protsessam rudo i neftegeneza* [Geofluidodynamics. Application to seismology, tectonics, ore processes and oil and gas]. Dolgoprudny, Intellect Publ., 2017. 282 p.
- Demenok S.L. *Fraktal: mezhdru mifom i remeslom* [Fractal: between myth and craft]. St-Petersburg, Strata Publ., 2018. 87 p.
- Feller V. *Vvedenie v teoriyu veroyatnostey i ee prilozheniya* [Introduction to probability theory and its applications]. Moscow, Mir Publ., 1984. Vol. 2, 751 p.

Received: 22 February 2020.

## Information about the authors

Valery R. Livshits, Dr. Sc., chief researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch Russian Academy of Sciences.

УДК 551.5: 544.653.22

## ВОЛЬТАМПЕРОМЕТРИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРОКСИДА ВОДОРОДА С ПОМОЩЬЮ СЕНСОРОВ НА ОСНОВЕ НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА В ОБЪЕКТАХ ТЕХНОГЕННОГО И ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

Перевезенцева Дарья Олеговна<sup>1</sup>,  
dop@tpu.ru

Горчаков Эдуард Владимирович<sup>2</sup>,  
gorchakovvedvard@mail.ru

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

<sup>2</sup> Ставропольский государственный аграрный университет, Россия, 355017 г. Ставрополь, пер. Зоотехнический, 12.

**Актуальность** работы связана с необходимостью определения низких содержаний пероксида водорода в объектах техногенного и геологического происхождения.

**Цель:** разработать сенсор с повышенной чувствительностью на основе наночастиц серебра для контроля окружающей среды и определить концентрацию пероксида водорода в водных объектах.

**Объекты:** артезианская и дождевая вода, собранная в черте города и пригорода.

**Методы:** просвечивающая электронная микроскопия, вольтамперометрия.

**Результаты.** Форма и размер наночастиц серебра зависят от природы восстановителя. При использовании двух восстановителей боргидрида и цитрата натрия получают частицы сферической формы наименьшего размера – от 0,5 до 17,5 нм. При использовании цитрата натрия получают наночастицы серебра большего диаметра – от 10 до 55 нм, различной формы: сферические, призматические и треугольные. Наночастицы серебра, полученные с использованием боргидрида натрия, агрегированы в цепочки размером до 65 нм. Особенностью электровосстановления наночастиц серебра, полученных в присутствии цитрата натрия, на поверхности графитового электрода в 0,1 М NaOH является восстановление ионов серебра из комплексных соединений  $[Ag(OH)_2]^-$ . Предложен механизм электрохимических процессов перехода наночастиц серебра, полученных с использованием различных восстановителей. Этот механизм не зависит от природы восстановителя. Установлено, что катодный максимум при  $E_k=0,08$  В соответствует процессу восстановления пероксида водорода. Зависимость катодного максимума от концентрации пероксида водорода, полученного с использованием сенсора на основе наночастиц серебра в присутствии цитрата натрия, была линейной в диапазоне от 0,1 до 1 нМ, предел обнаружения составил 0,087 нМ. Определена концентрация пероксида водорода в дождевой и артезианской воде. Предложен простой чувствительный сенсор на основе наночастиц серебра, полученный с использованием восстановителя цитрата натрия. Этот сенсор имеет широкий диапазон концентраций для определения пероксида водорода.

**Ключевые слова:**

Пероксид водорода, наночастицы серебра, циклическая вольтамперометрия, электрохимический сенсор, объекты техногенного и геологического происхождения, экология.

### Введение

Пероксид водорода обладает сильными окислительными и дезинфицирующими свойствами [1]. В небольших количествах пероксид водорода выполняет роль фунгицида [2], бактерицида [1], стимулятора прорастания семян [3], накопления питательных веществ и защиты растений на всех стадиях роста от вредного воздействия бактерий и насекомых [1, 4], повышает аэрационные свойства почвы [5]. Выбросы фармацевтической промышленности [6], косметического производства [7], пищевой промышленности [8], производства бумаги [9], детоксикационной обработки против токсических, канцерогенных и мутагенных веществ (формальдегид, фенол, амин, гербициды) грунтовых водах [9–11], в овощах и фруктах приводит к разрушению белковых и клеточных структур, торможению ключевых метаболических процессов в организме за счет образования гидроксильных свободных радикалов.

В условиях повышенной влажности и перепадов климатических температур, в морской воде, в почве и других объектах бактерии-органотрофы биотрансформируют кислород в пероксид водорода, продуцируют серную кислоту из серы, окисляют ионы аммония до азотистой, а затем в азотную кислоту [12]. В связи с этим необходимо проводить постоянный мониторинг и контролировать содержание пероксида водорода в объектах окружающей среды. Традиционно для определения этого токсиканта используют титриметрию [13], колориметрию [14], спектрофотометрию [15], хемиллюминесценцию [16], флуориметрию [17], хроматографию [18]. Недостатками определения содержания пероксида водорода являются: длительная процедура определения, высокая стоимость реактивов и оборудования, низкая воспроизводимость и чувствительность методик. Вольтамперометрия характеризуется следующими преимуществами по сравнению с другими методами: экспрессность, низ-



кая стоимость оборудования, удовлетворительная воспроизводимость и высокая чувствительность. В то же время применение стандартных графитовых электродов не позволяет определять пероксид водорода с заданной чувствительностью. В настоящее время используют электроды, модифицированные наночасти-

цами различных элементов, полученными при соответствующих условиях для определения пероксида водорода (табл. 1).

Сравнительные характеристики электрохимических сенсоров на основе наночастиц металлов для определения пероксида водорода представлены в табл. 1.

**Таблица 1.** Эффективность некоторых электродов для определения концентрации пероксида водорода

**Table 1.** Efficiency of certain electrodes for hydrogen peroxide detection

Электрод Electrode	Модификатор Modifier	pH	Предел обнаружения, (µM), Detection limit, (µM)	Диапазон определяемых концентраций, (µM) Range of detectable concentrations, (µM)	Ссылки References
Стекло-графитовый Glassy carbon	Оксид графена, нафийон и наночастицы серебра Graphene oxide, nafion and silver nanoparticles	7,4 фосфатный буфер 7,4 phosphate buffer	0,46	1,72–10,79 10,79–231	[19]
	Наночастицы палладия Palladium nanoparticles		0,33 6,79	1–7 1–14	[20]
Графит-восковый композитный Graphite wax composite	Прусская голубая пленка, модифицированная наночастицами золота Prussian blue film, modified with gold nanoparticles	pH 7,38 фосфатный буфер pH 7,38 phosphate buffer	0,014	$4,8 \cdot 10^{-2}$ – $7,4 \cdot 10^{-2}$	[21]
Золотой/Gold	Наночастицы золота Gold nanoparticles	pH 7,4 фосфатный буфер pH 7,4 phosphate buffer	0,5	1–8	[22]
Угльно-пастовый на основе нанокompозита кремния и серебра Carbon-paste based on silicon-silver nanocomposite	Нанокompозит на основе кремния и серебра Nanocomposite based on silicon and silver	pH 7,38 фосфатный буфер pH 7,38 phosphate buffer	0,45	1,65–5	[23]
Стекло-графитовый Glassy carbon	Многослойные графитовые нанотрубки на основе наночастиц серебра Multiwalled carbon nanotubes based on silver nanoparticles	pH 7,38 фосфорный буфер pH 7,38 phosphate buffer	2	100–10000	[24]

Как видно из табл. 1, применение электрохимических сенсоров на основе наночастиц металлов для определения концентрации пероксида водорода позволяет понизить предел ее обнаружения по сравнению со стандартными графитовыми электродами. Использование вольтамперометрии с сенсорами на основе наночастиц металлов позволяет устранить недостатки таких методов, как спектрофотометрия и хроматография.

Цель исследования – разработать сенсор с повышенной чувствительностью на основе наночастиц серебра для контроля окружающей среды и определения концентрации пероксида водорода в водных объектах.

#### Методики

Растворы пероксида водорода готовили на бидистиллированной воде непосредственно перед экспериментальными определениями. Его массовую концентрацию определяли с использованием титриметрического метода перманганатометрии по стандартной методике [25]. Получение золь серебра осуществляли согласно [26, 27]. Форму частиц и их размер определяли с помощью просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) с использованием электронного микроскопа «JSM-5500» (Япония). Для

электрохимических исследований использовали вольтамперометрический анализатор ТА-2 (Томск) с трехэлектродной ячейкой. В качестве индикаторного электрода использовали графитовый электрод (ГЭ), графитовые электроды, модифицированные наночастицами серебра в отсутствие высокомолекулярных стабилизаторов с использованием различных восстановителей: цитрата натрия (ГЭAgNPsCit), боргидрида натрия (ГЭAgNPsBg) и смеси боргидрида и цитрата натрия (ГЭAgNPsCitBg) (сенсоры на основе наночастиц серебра). В качестве электрода сравнения и вспомогательного электрода использовали хлоридсеребряные электроды (Ag/AgCl/KCl). Подготовку поверхности графитового электрода осуществляли по методике [26]. Методика определения концентрации пероксида водорода заключается в следующем. Сначала в электрохимическую ячейку, заполненную 10 мл 0,1 М NaOH, помещали три электрода. Вольтамперную зависимость фонового электролита регистрировали в режиме циклической вольтамперометрии на сенсоре, полученном на основе наночастиц серебра в области развертки потенциалов от –1,0 до +1,5 В при скорости развертки потенциалов 40 мВ·с<sup>-1</sup>. Затем в электрохимическую ячейку добавляли раствора 50 мкл 10<sup>-10</sup> М пероксида водорода (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), перемешивали раствор и регистрировали вольтампер-

ную зависимость  $H_2O_2$  в тех же условиях. Далее еще 50 мкл раствора  $10^{-10}$  М  $H_2O_2$  добавляли в электрохимическую ячейку, перемешивали раствор и регистрировали вольтамперную зависимость концентрации  $H_2O_2$  в тех же условиях. По высоте его максимума вычисляли концентрацию  $H_2O_2$  в растворе по методу «введено–найдено». Результаты эксперимента приведены на рис. 2.

### Результаты эксперимента

Наночастицы серебра, полученные с использованием цитратной методики (рис. 1, а), имеют различную форму: палочкообразные, призматические, треугольные с размерами частиц в диапазоне 10–55 нм с их средним размером 30–35 нм. Как видно из микрофотографии (рис. 1, б), наночастицы серебра, полученные по боргидридцитратной методике, имеют сферическую форму. Диапазон их распределения по

размерам составляет 0,5–17,5 нм с характерным размером частиц 10,0–12,5 нм. Наночастицы серебра, полученные по боргидридной методике (рис. 1, в), имеют призматическую и палочкообразную форму, соединены в цепочки, т. е. агрегированы. Диапазон их распределения по размерам составляет 5–65 нм с характерным размером 30–45 нм.

При изменении потенциала в диапазоне от –0,8 до 1,4 В на анодных ветвях циклических зависимостей 1'–3' (рис. 2) наночастиц серебра независимо от природы восстановителя наблюдались неразрешенные сигналы ( $A_1, A_2$ ) и три основных максимума ( $A_3, A_4, A_5$ ). Потенциал анодного максимума AgNPs-Bg-Citr ( $A_3$ ) (зависимость 1') смещен на 110 мВ в положительную область по сравнению с потенциалами максимумов ( $A_3$ ) AgNPs-Citr (зависимость 2') и AgNPs-Bg (зависимость 3') из-за их совместного присутствия [28].

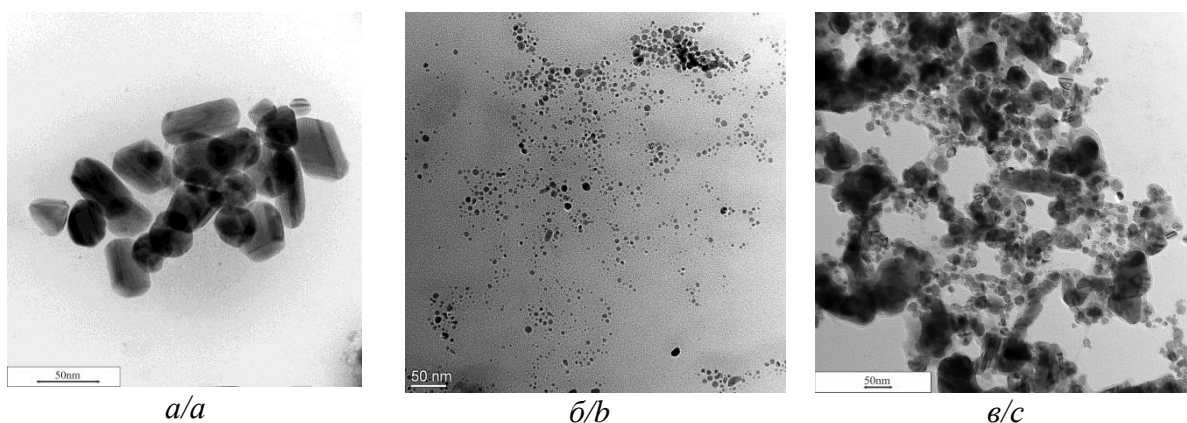


Рис. 1. Микрофотографии наночастиц серебра, полученные с использованием цитрата натрия (а), боргидрида и цитрата натрия (б), боргидрида натрия (в)

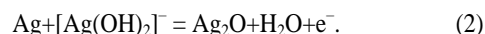
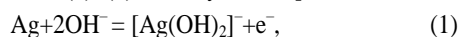
Fig. 1. Micrographs of silver nanoparticles obtained using sodium citrate (a), sodium borohydride and sodium citrate (b), sodium borohydride (c)

Это смещение потенциала максимума AgNPs-Bg-Citr подтверждает образование более мелких частиц и коррелирует с результатами, полученными с помощью ПЭМ, характерный размер которых составляет 10,0–12,5 нм.

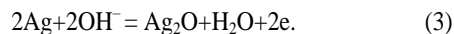
При изменении потенциала в диапазоне от 1,4 до –0,8 В на катодной ветви циклической зависимости 2" AgNPs-Citr присутствуют основная широкая волна ( $C_1$ ) и два перекрывающихся максимума ( $C_2, C_3$ ).

На катодных ветвях циклических зависимостей 1" AgNPs-Bg-Citr и 3" AgNPs-Bg наблюдаются две перекрывающиеся волны ( $C_1, C_2$ ) и максимум ( $C_3$ ). Потенциалы катодных максимумов и волн AgNPs-Bg-Citr смещены в область отрицательных потенциалов по сравнению с AgNPs-Citr и AgNPs-Bg вследствие улучшения процесса восстановления AgNPs [28].

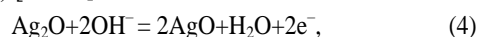
Согласно литературным данным [28, 29], два небольших максимума ( $A_1, A_2$ ) на анодных ветвях циклических зависимостей 1'–3' соответствуют процессам окисления серебра из состава наночастиц. Схемы реакций их окисления (1), (2) согласуются с [27, 29–31]:



Основной максимум ( $A_3$ ) на анодных ветвях циклических зависимостей 1'–3' связан с растворением основного количества серебра и соответствует схеме реакции (3) и коррелирует с данными [27, 31]:

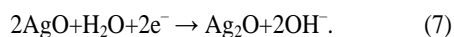


Основные максимумы ( $A_4, A_5$ ) на анодных ветвях циклических зависимостей 1'–3' обусловлены фазовыми переходами серебра в соответствующих степенях окисления +1, 0, +2, +3. Схемы реакций, описывающие эти переходы, представлены схемами реакций (4), (5) [29–31]:

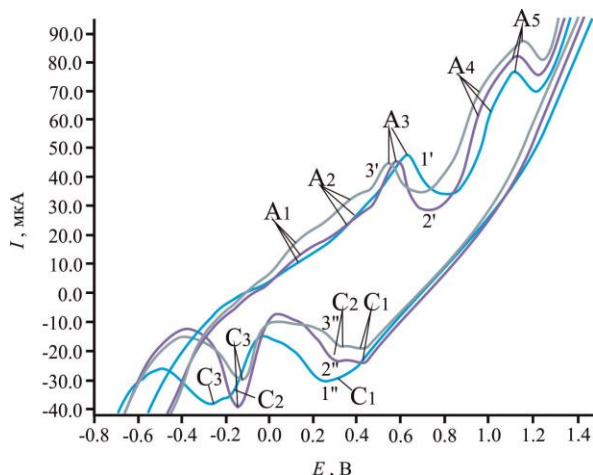
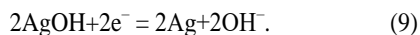
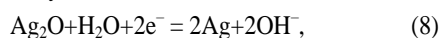


Основная широкая волна ( $C_1$ ) наблюдается на катодной ветви циклической зависимости 1" AgNPs-Citr. Уширение волны обусловлено двумя процессами. Реакционные схемы описанных фазовых переходов представлены уравнениями (6), (7), которые согласуются с [29, 30]:





Две перекрывающиеся волны ( $C_2$ ,  $C_3$ ) наблюдаются на катодной ветви циклической кривой 1'' AgNPs-Citr. Эти максимумы описываются схемами реакций (8), (9), что согласуется с [29, 31]:



**Рис. 2.** Вольтамперные зависимости наночастиц серебра в 0,1 М NaOH,  $\nu=100 \text{ мВ}\cdot\text{с}^{-1}$  на графитовом сенсоре на основе наночастиц серебра, полученных с использованием восстановителей боргидрида и цитрата натрия – 1', 1''; цитрата натрия – 2', 2''; боргидрида натрия – 3', 3''.

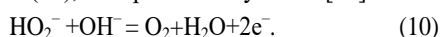
**Fig. 2.** Current-voltage dependencies of silver nanoparticles obtained in the presence of borohydride and sodium citrate – 1', 1''; sodium citrate – 2', 2''; sodium borohydride – 3', 3'' in 0,1 M NaOH,  $\nu=100 \text{ mV}\cdot\text{s}^{-1}$

Две перекрывающиеся волны ( $C_1$ ,  $C_2$ ) наблюдаются на катодных ветвях циклических зависимостей 2'' и 3'' AgNPs-Bg-Citr и AgNPs-Bg, они описываются схемами реакций (6), (7).

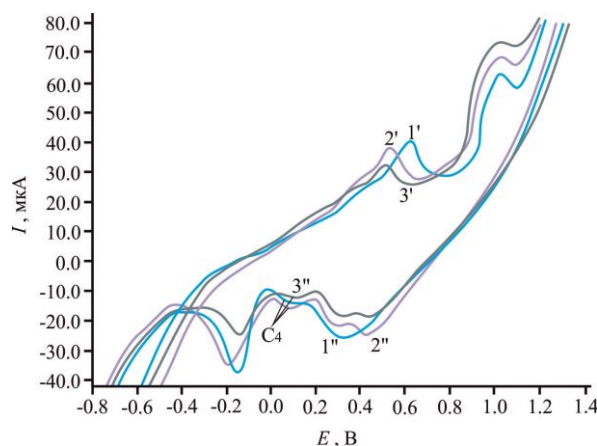
Максимум ( $C_3$ ) соответствует восстановлению оксида серебра (I) до элементного серебра, что описывается схемой реакции (8) и согласуется с [29–31].

Добавление  $\text{H}_2\text{O}_2$  не приводит к значительным смещениям потенциалов как анодного, так и катодного максимумов AgNPs на циклических зависимостях 1''–3'' (рис. 3). Добавление  $\text{H}_2\text{O}_2$  приводит к появлению дополнительных максимумов ( $C_4$ ) при  $E=0,08 \text{ В}$  на катодных ветвях всех зависимостей.

Этот дополнительный максимум описывается схемой реакции (10), которая согласуется с [32]:



При внесении в систему второй добавки высота максимумов  $\text{H}_2\text{O}_2$  на ГЭ-AgNPs-Citr увеличивается в 2 раза, тогда как высота на ГЭ-AgNPs-Bg-Citr увеличивается в 2,5 раза, а высота максимума  $\text{H}_2\text{O}_2$  на ГЭ-AgNPs-Bg не увеличивается. Таким образом, AgNPs-Bg-Citr обладают наибольшей электрокаталитической активностью в отношении  $\text{H}_2\text{O}_2$ , высота катодного максимума увеличивается более чем в 2,5 раза.

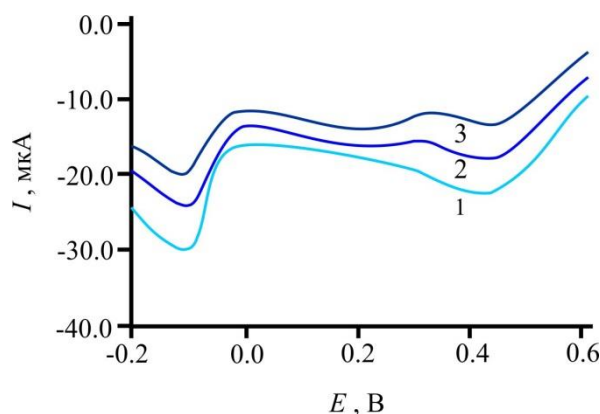


**Рис. 3.** Вольтамперные зависимости пероксида водорода в 0,1 М NaOH,  $\nu=100 \text{ мВ}\cdot\text{с}^{-1}$  на графитовом сенсоре на основе наночастиц серебра, полученных с использованием восстановителей боргидрида и цитрата натрия – 1', 1''; цитрата натрия – 2', 2''; боргидрида натрия – 3', 3''

**Fig. 3.** Current-voltage dependences of hydrogen peroxide in 0,1 M NaOH,  $\nu=100 \text{ mV}\cdot\text{s}^{-1}$  at a graphite sensor based on silver nanoparticles using sodium borohydride and citrate – 1', 1''; sodium citrate – 2', 2''; sodium borohydride – 3', 3''

Дальнейшее добавление  $\text{H}_2\text{O}_2$  приводит к увеличению сигнала на ГЭ-AgNPs-Citr и ГЭ-AgNPs-Bg-Citr. Для сравнения аналитических характеристик количественного определения  $\text{H}_2\text{O}_2$  использовали данные электроды.

На рис. 4 показаны вольтамперные зависимости на сенсоре на основе наночастиц серебра, полученные с использованием восстановителя цитрата натрия: 1 – фоновая; 1 – добавка  $\text{H}_2\text{O}_2$  с концентрацией  $2 \cdot 10^{-10} \text{ М}$ ; 3 – добавка  $\text{H}_2\text{O}_2$  с концентрацией  $4 \cdot 10^{-10} \text{ М}$ .



**Рис. 4.** Вольтамперные зависимости пероксида водорода от его концентрации в 0,1 М NaOH при  $\nu=0,04 \text{ В}\cdot\text{с}^{-1}$  на сенсоре на основе наночастиц серебра с использованием восстановителя цитрата натрия: 0 М (1),  $2 \cdot 10^{-10} \text{ М}$  (2),  $4 \cdot 10^{-10} \text{ М}$  (3)

**Fig. 4.** Voltammeter dependences of hydrogen peroxide based on its concentration in 0,1 M NaOH (1) at  $\nu=0,04 \text{ V}\cdot\text{s}^{-1}$  at sensor based on silver nanoparticles obtained using sodium citrate: 0 M (1),  $2 \cdot 10^{-10} \text{ M}$  (2),  $4 \cdot 10^{-10} \text{ M}$  (3)

Установлено, что при  $E_k=+0,18$  В наблюдается пропорциональное увеличение высоты максимума в присутствии  $2 \cdot 10^{-10}$  М (зависимость 2) и  $4 \cdot 10^{-10}$  М  $H_2O_2$  в ГЭ-AgNPs-Citr (зависимость 3). Дальнейшее увеличение концентрации  $H_2O_2$  с  $2 \cdot 10^{-10}$  до  $1 \cdot 10^{-9}$  М приводит к линейной зависимости высоты максимума от его концентрации на ГЭ-AgNPs-Citr.

Для ГЭ-AgNPs-Bg-Citr установлено, что первая добавка пероксида водорода приводит к увеличению максимума в 2,5 раза. Последующее увеличение концентрации пероксида водорода приводило к пропорциональному росту высоты максимума в интервале половины порядка. В то же время дальнейшее увеличение концентрации не способствовало пропорциональному росту высоты максимума, и концентрационная зависимость быстро достигала предельных значений.

Линейность и предел обнаружения  $H_2O_2$  для ГЭ-AgNPs-Citr и ГЭ-AgNPs-Bg-Citr представлены в табл. 2.

**Таблица 2.** Пределы обнаружения пероксида водорода на сенсоре, полученном на основе наночастиц серебра в модельных растворах

**Table 2.** Detection limits of hydrogen peroxide at sensor based on silver nanoparticles in model solutions

Золь Sol	Предел обнаружения, (М), Detection limit, (M)	Интервал концентраций, лежащий в линейной области градуировочного графика, (М) Range of concentrations lying in the linear region of the calibration graph (M)
Цитратный/Citrate	$8,7 \cdot 10^{-11}$	$1 \cdot 10^{-10} - 10 \cdot 10^{-10}$
Боргидридцитратный Borohydridecitrate	$5,3 \cdot 10^{-11}$	$0,8 \cdot 10^{-10} - 3 \cdot 10^{-10}$

Как видно из табл. 2, предложенный сенсор на основе наночастиц серебра, полученных с использованием восстановителей цитрата и боргидрида натрия, более чувствительный по отношению к  $H_2O_2$  в модельных растворах. Предел ее обнаружения равен  $5,3 \cdot 10^{-11}$  М. Вместе с тем недостатком данного сенсора является узкий диапазон определяемых концентраций  $H_2O_2$ , в интервале  $0,8 \cdot 10^{-10} - 3 \cdot 10^{-10}$  М. Сенсор на основе наночастиц серебра, полученный с использованием восстановителя цитрата натрия, имеет широкий диапазон определяемых концентраций (концентрация пероксида водорода на графике лежит в пределах  $1 \cdot 10^{-10} - 10 \cdot 10^{-10}$  М), но менее чувствителен, предел обнаружения  $H_2O_2$  составляет  $8,7 \cdot 10^{-11}$  М. ГЭ-AgNPs-Bg-Citr является более чувствительным, чем ГЭ-AgNPs-Citr, хотя линейный диапазон измеряемых концентраций  $H_2O_2$  в ГЭ-AgNPs-Bg-Citr меньше, чем диапазон в ГЭ-AgNPs-Citr. Он составляет примерно половину порядка определяемой концентрации. Для дальнейшего определения  $H_2O_2$  в водных объектах был использован сенсор на основе наночастиц серебра, полученных с использованием цитрата натрия.

В табл. 3 представлены результаты определения пероксида водорода в водных объектах: вода из артезианской скважины, дождевая вода, собранная в черте города Томска и за его пределами, вдали от населенных пунктов.

**Таблица 3.** Определение концентрации пероксида водорода в водных объектах

**Table 3.** Determination of hydrogen peroxide in aqueous objects

Объект исследования Object of investigation	Введено, $C_{H_2O_2}$ , моль·л <sup>-1</sup> Introduced $C_{H_2O_2}$ , mol·l <sup>-1</sup>	Найдено, $C_{H_2O_2}$ , моль·л <sup>-1</sup> Found, $C_{H_2O_2}$ , mol·l <sup>-1</sup>	$S_{r,(t_{0,95})}$ n=6
Питьевая вода из артезианской скважины Drinking water from an artesian hole	$1 \cdot 10^{-10}$	$(0,98 \pm 0,30) \cdot 10^{-10}$	0,306
Дождевая вода (в черте города) Rainwater (within the city)	–	$(2,35 \pm 0,45) \cdot 10^{-6}$	0,191
Дождевая вода (вдали от города) Rainwater (away from the city)	–	$(5,88 \pm 1,57) \cdot 10^{-7}$	0,267

Из представленных табличных данных видно, что в городской черте экологическая обстановка по пероксиду водорода благоприятна и не превышает предельно допустимые значения ( $5,9 \cdot 10^{-6}$  М).

### Выводы

1. Показано, что форма и размер наночастиц серебра зависят от природы восстановителя. При использовании двух восстановителей – боргидрида и цитрата натрия – получают частицы сферической формы наименьшего размера – от 0,5 до 17,5 нм. Вместе с тем больший размер – от 10 до 55 нм – и различную форму имеют наночастицы серебра, полученные с использованием цитрата натрия. Наночастицы серебра, полученные с использованием боргидрида натрия, агломерированы в цепочки размером до 65 нм.
2. Предложен механизм электрохимического окисления и восстановления нанофаз серебра на поверхности графитового электрода в 0,1 М NaOH. Механизм электроокисления нанофаз серебра не зависит от природы восстановителя. Особенностью электровосстановления нанофаз серебра, полученных в присутствии цитрата натрия, является восстановление ионов серебра из комплексных ионов  $[Ag(OH)_2]^-$ .
3. Показано, что для наночастиц серебра, полученных в присутствии двух восстановителей, наблюдается сдвиг потенциала на 100 мВ для анодного и катодного максимумов как в положительную, так и в отрицательную область, соответственно, относительно наночастиц серебра, полученных с использованием одного восстановителя. Этот результат подтверждает образование более мелких частиц, полученных в присутствии двух восстановителей, и коррелирует с результатами исследова-

- ний, полученными с использованием просвечивающей электронной микроскопии.
- Предложен сенсор на основе наночастиц серебра, полученных с использованием цитрата натрия, для определения пероксида водорода в модельных растворах с широким диапазоном определяемых концентраций ( $1 \cdot 10^{-10}$ – $10 \cdot 10^{-10}$  М). Данный сенсор обладает следующими преимуществами: увеличением времени эксплуатации, быстротой передачи электрона, пониженным перенапряжением электрохимической реакции, увеличением чувствительности сенсора и снижением предела обнаружения пероксида водорода ( $8,7 \cdot 10^{-11}$  М).
  - Вольтамперометрически определено содержание пероксида водорода в водных объектах – дождевой воде в черте города, составило  $(2,35 \pm 0,45) \cdot 10^{-6}$  М, дождевой воде за городом  $(5,88 \pm 1,57) \cdot 10^{-7}$  М и артезианской воде  $(0,98 \pm 0,30) \cdot 10^{-10}$  М. Данный сенсор позволяет определить пероксид водорода в артезианской воде в концентрации, ниже предела обнаружения стандартных спектрофотометрических и хроматографических методик его определения.

*Работа выполнена в рамках повышения конкурентоспособности Томского политехнического университета и при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ №19-03-00160a2019.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Hydrogen peroxide and sodium hypochlorite disinfectants are more effective against *Staphylococcus aureus* and *Pseudomonas aeruginosa* biofilms than quaternary ammonium compounds / C.B. Lineback, C.A. Nkemngong, S.T. Wu, P.J. Teska, H.F. Oliver // *Antimicrobial Resistance and Infection Control*. – 2018. – V. 7. – Article number: 154. DOI: doi.org/10.1186/s13756-018-0447-5
- Cho P., Reyes S., Boost M.V. Microbiocidal characterization of a novel povidone-iodine based rigid contact lens disinfecting solution // *Contact Lens and Anterior Eye*. – 2018. – V. 41. – № 6. – P. 542–546.
- Cembrowska-Lech D., Koprowski M., Kepczyński J. Germination induction of dormant *Avena fatua* caryopses by KAR1 and GA3 involving the control of reactive oxygen species ( $H_2O_2$  and  $O_2^{\cdot -}$ ) and enzymatic antioxidants (superoxide dismutase and catalase) both in the embryo and the aleurone layers // *Journal of Plant Physiology*. – 2015. – V. 176. – P. 169–179.
- The commonly used bactericide bismethiazol promotes rice defenses against herbivores / P. Zhou, X. Mo, W. Wang, X. Chen, Y. Lou // *International Journal of Molecular Sciences*. – 2018. – V. 19. – № 5. – Article number 1271.
- Advancement in research on soil aeration and oxygation / H. Lei, S. Hu, H. Pan, X. Liu, K. Li // *Acta Pedologica Sinica*. – 2017. – V. 54 (2). – P. 297–308.
- Wang Y., Lin Y., Chen L. Organic-phase biosensors for monitoring phenol and hydrogen peroxide in pharmaceutical antibacterial products // *Analyst*. – 1993. – V. 118. – P. 277–280.
- Hydrogen peroxide determination in pharmaceutical formulations and cosmetics using a new catalase biosensor / L. Campanella, R. Roversi, M.P. Sammartino, M. Tomassetti // *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*. – 1998. – V. 18. – № 1–2. – P. 105–116.
- A summary on cutting edge advancements in sterilization and cleaning technologies in medical, food, and drug industries, and its applicability to spacecraft hardware / R. Gradini, F. Chen, R. Tan, L. Newlin // *Life Sciences in Space Research*. – 2019. – V. 23. – P. 31–49.
- Contribution of free radicals to chlorophenols decomposition by several advanced oxidation processes / F.J. Benitez, J.B. Heredia, J.L. Acero, F.J. Rubio // *Chemosphere*. – 2000. – V. 41. – № 8. – P. 1271–1277.
- Chen J., Rulkens W.H., Bruning H. Photochemical elimination of phenols and cod in industrial wastewaters // *Water Science and Technology*. – 1997. – V. 35. – № 4. – P. 231–238.
- Advanced oxidation of trace organics in water by hydrogen peroxide solar photolysis / M.R. Rojas, C. Leung, D. Whitley, Y. Zhu, R.G. Arnold, A.E. Saez // *Industrial and Engineering Chemistry Research*. – 2011. – V. 50. – № 22. – P. 12479–12487.
- Моделирование условий биотрансформации кислорода бактериями-органотрофами в пероксид водорода, стимулирующий коррозию цинка / А.А. Калинина, С.Ю. Радостин, А.С. Македошин, Т.Н. Соколова, В.Ф. Смирнов, В.Р. Карташов // *Известия ВУЗов. Прикладная химия и биотехнология*. – 2017. – Т. 7. – № 2. – С. 80–88.
- Liang C.H., He B. A titration method for determining individual oxidant concentration in the dual sodium persulfate and hydrogen peroxide oxidation system // *Chemosphere*. – 2018. – V. 198. – P. 297–302.
- Determination of hydrogen peroxide and triacetone triperoxide (TATP) with a silver – nanoparticles based turn-on colorimetric sensor / A. Üzer, S. Durmazel, E. Ercag, R. Apak // *Sensors and Actuators B: Chemical*. – 2017. – V. 247. – P. 98–107.
- Pettas I.A., Karayannis M.I. Simultaneous spectra-kinetic determination of peracetic acid and hydrogen peroxide in a brewery cleaning in place disinfection process // *Analytica Chimica Acta*. – 2004. – V. 522. – P. 275–280.
- Akio Makishima. *Biochemistry for materials science. Catalysts, complexes and proteins. (chapter five topics of bioluminescence and chemoluminescence)*. – England: Elsevier, 2019. – 329 p.
- Amouroux D., Donard O.F.X. Hydrogen peroxide determination in estuarine and marine waters by flow injection with fluorescence detection // *Oceanologica Acta*. – 1995. – V. 18. – P. 353–361.
- Optimization of two methods for the analysis of hydrogen peroxide: high performance liquid chromatography with fluorescence detection and high performance liquid chromatography with electrochemical detection in direct current mode / M. Tarvina, B. McCord, K. Mount, K. Sherlachd, M.L. Miller // *Journal of Chromatography A*. – 2010. – V. 1217. – № 48. – P. 7564–7572.
- Fabrication of a novel electrochemical sensor for determination of hydrogen peroxide in different fruit juice samples / N. Nasirizadeh, Z. Shekari, A. Nazari, M. Tabatabaee // *Journal of food and drug analysis*. – 2016. – V. 24. – № 1. – P. 72–82.
- Kitte S.A., Assresaahegn B.D., Soreta T.R. Electrochemical determination of hydrogen peroxide at a glassy carbon electrode modified with palladium nanoparticles // *Journal of the Serbian Chemical Society*. – 2013. – V. 78. – № 5. – P. 701–711.
- Prabhu P., Babu S., Narayanan S.S. Synergetic effect of Prussian blue film with gold nanoparticle graphite-wax composite electrode for the enzyme-free ultrasensitive hydrogen peroxide sensor // *Journal of Solid State Electrochemistry*. – 2014. – V. 18. – № 4. – P. 883–891.
- Xu S., Peng B., Han X. A third-generation  $H_2O_2$  biosensor based on horseradish peroxidase-labeled Au nanoparticles self-assembled to hollow porous polymeric nanospheres // *Biosensors and Bioelectronics*. – 2007. – V. 22. – P. 1807–1810.
- Ensaifi A.A., Rezaloo F., Rezaei B. Electrochemical sensor based on porous silicon/silver nanocomposite for the determination of hydrogen peroxide // *Sensors and Actuators B*. – 2016. – V. 231. – P. 239–244.
- Afraz A., Rafati A.A., Hajianet A. Analytical sensing of hydrogen peroxide on Ag nanoparticles–multiwalled carbon nanotube-modified glassy carbon electrode // *Journal of Solid State Electrochemistry*. – 2017. – V. 17. – № 7. – P. 2017–2025.
- Klassen N.V., Marchington D., McGowan H.C.E.  $H_2O_2$  determination by the  $I_3^-$ -method and by  $KMnO_4$  titration // *Anal Chem*. – 1994. – V. 66. – P. 2921–2925.
- Influence of silver nanoparticles conditions synthesis on their electrochemical properties / D. Perevezentseva, E. Gorchakov, M. Petrushin, I. Hismutdinov, V. Bimatov // *AIP Conference*

- Proceedings: Prospects of Fundamental Sciences Development (PFSD-2016). – 2016. – V. 1772. – Article number 020005.
27. Electrocatalytic oxidation of hydrogen peroxide on the graphite electrode based on silver nanoparticles / D. Perevezentseva, E. Gorchakov, D. Fedotova, V. Bimatov, E. Triphonova // Key Engineering Materials. – 2017. – V. 743. – P. 287–291.
28. Меретуков М.А. Золото: химия, минералогия, металлургия. – М.: ИД «Руда и металлы», 2008. – 528 с.
29. Giovanni M., Pumera M. Size dependent electrochemical behavior of silver nanoparticles with sizes of 10, 20, 40, 80 and 107 nm // Electroanalysis. – 2012. – V. 24. – № 3. – P. 615–617.
30. Electrochemical behaviour of a silver electrode in NaOH solution / S.S.A. Abdel-Rehim, H.H. Hassan, M.A.M. Ibrahim, M.A. Amin // Monatshefte fur Chemie/Chemical Monthly. – 1998. – V. 129. – № 11. – P. 1103–1117.
31. Droog J.M.M., Huisman F. Electrochemical formation and reduction of silver oxides in alkaline medium // Journal of Electroanalytical Chemistry and Interfacial Electrochemistry. – 1980. – V. 115. – P. 211–224.
32. Electrochemical behaviour of silver in borate buffer solutions / A.M. Zaky, F.H. Assaf, S.A. Sayed, E.L. Rehim, B.M. Mohamed // Applied Surface Science. – 2004. – V. 221. – № 1–4. – P. 349–357.

Поступила 22.02.2020 г.

#### Информация об авторах

**Перевезенцева Д.О.**, кандидат химических наук, доцент отделения естественных наук Школы инженерной базовой подготовки Национальный исследовательский Томский политехнический университет.

**Горчаков Э.В.**, кандидат химических наук, доцент кафедры терапии и фармакологии Ставропольский государственный аграрный университет.

UDK 551.5: 544.653.22

## VOLTAMMETRIC DETERMINATION OF HYDROGEN PEROXIDE USING SENSORS BASED ON SILVER NANOPARTICLES IN OBJECTS OF TECHNOGENIC AND GEOLOGICAL ORIGIN

Darya O. Perevezentseva<sup>1</sup>,  
dop@tpu.ru

Eduard V. Gorchakov<sup>2</sup>,  
gorchakovedvard@mail.ru

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

<sup>2</sup> Stavropol State Agrarian University,  
12, Zootechnicheskiy street, Stavropol, 355017, Russia.

**The research** deals with determination of low levels of hydrogen peroxide in objects of technogenic and geological origins.

**The aim** of the work was to develop a sensitive sensor based on silver nanoparticles to detect hydrogen peroxide in water objects.

**Objects:** artesian and rainwater collected in the city and suburbs.

**Methods:** voltammetry, transmission microscopy.

**Results.** The shape, size and amount of silver nanoparticles depend on the nature of the reducing agent. When using two reducing agents of borohydride and sodium citrate, the smallest spherical particles – from 0,5 to 17,5 nm, are obtained. When using sodium citrate, larger silver nanoparticles – from 10 to 55 nm, in various shapes are obtained. They are as follows: rod-shaped, prismatic, triangular with a particle size from 10 to 55 nm. AgNPs-Bg have a rod-like and prismatic shapes 5–65 nm in size, connected in chains, i. e. agglomerated. The mechanism of electrochemical processes of silver nanophase transition on the surface of graphite electrode to 0,1 M NaOH in the presence of various reducing agents is proposed. This mechanism does not depend on the nature of the reducing agent. A feature of electroreduction of silver nanophase obtained in the presence of citrate potassium is the reduction of silver ions from the complex ions  $[Ag(OH)_2]^-$ . The authors have proposed the mechanism of electrochemical transition processes of silver nanophase in the presence of various reducing agents. It was found that the cathode maxima at  $E_c=0,08$  V corresponds to hydrogen peroxide reduction. Using a sensor based on the silver nanoparticles obtained in the presence of sodium citrate the dependence of the current of the maximum on hydrogen peroxide concentration was linear – in the range from 0,–1 nM, and the detection limit was 0,087 nM. The content of hydrogen peroxide in rain and artesian water was determined. The proposed sensor modified by silver nanoparticles obtained in presence of sodium citrate is simple, rapid, and sensitive. This sensor has a wide range of concentrations for determination of hydrogen peroxide.

### Key words:

Hydrogen peroxide, silver nanoparticles, cyclic voltammetry, electrochemical sensor, objects of technogenic and geological origin, ecology.

The research was carried out within the improving the competitiveness of Tomsk Polytechnic University and at partial financial support of the grant RFBR no. 19-03-00160a2019.

### REFERENCES

- Lineback C.B., Nkemngong C.A., Wu S.T., Teska P.J., Oliver H.F. Hydrogen peroxide and sodium hypochlorite disinfectants are more effective against *Staphylococcus aureus* and *Pseudomonas aeruginosa* biofilms than quaternary ammonium compounds. *Antimicrobial Resistance and Infection Control*, 2018, vol. 7 (1), Article number 154. DOI: doi.org/10.1186/s13756-018-0447-5
- Cho P., Reyes S., Boost M.V. Microbiocidal characterization of a novel povidone-iodine based rigid contact lens disinfecting solution. *Contact Lens and Anterior Eye*, 2018, vol. 41, no. 6, pp. 542–546.
- Cembrowska-Lech D., Koprowski M., Kepczyński J. Germination induction of dormant *Avena fatua* caryopses by KAR1 and GA3 involving the control of reactive oxygen species ( $H_2O_2$  and  $O_2^-$ ) and enzymatic antioxidants (superoxide dismutase and catalase) both in the embryo and the aleurone layers. *Journal of Plant Physiology*, 2015, vol. 176, pp. 169–179.
- Zhou P., Mo X., Wang W., Chen X., Lou Y. The commonly used bactericide bismethiazol promotes rice defenses against herbivores. *International Journal of Molecular Sciences*, 2018, vol. 19, no. 5, article number 1271.
- Lei H., Hu S., Pan H., Liu X., Li K. Advancement in research on soil aeration and oxygation. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, vol. 54 (2), pp. 297–308.
- Wang Y., Lin Y., Chen L. Organic-phase biosensors for monitoring phenol and hydrogen peroxide in pharmaceutical antibacterial products. *Analyst*, 1993, vol. 118, pp. 277–280.
- Campanella L., Roversi R., Sammartino M.P., Tomassetti M. Hydrogen peroxide determination in pharmaceutical formulations and cosmetics using a new catalase biosensor. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 1998, vol. 18, no. 1–2, pp. 105–116.
- Gradini R., Chen F., Tan R., Newlin L.A summary on cutting edge advancements in sterilization and cleaning technologies in medical, food, and drug industries, and its applicability to spacecraft hardware. *Life Sciences in Space Research*, 2019, vol. 23, pp. 31–49.
- Benitez F.J., Heredia J.B., Acero J.L., Rubio F.J. Contribution of free radicals to chlorophenols decomposition by several advanced oxidation processes. *Chemosphere*, 2000, vol. 41, no. 8, pp. 1271–1277.
- Chen J., Rulkens W.H., Bruning H. Photochemical elimination of phenols and cod in industrial wastewaters. *Water Science and Technology*, 1997, vol. 35, no. 4, pp. 231–238.
- Rojas M.R., Leung C., Whitley D., Zhu Y., Arnold R.G., Saez A.E. Advanced oxidation of trace organics in water by hydrogen peroxide solar photolysis. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2011, vol. 50, no. 22, pp. 12479–12487.
- Kalinina A.A., Radostin S.Yu., Makedoshin A.S., Sokolova T.N., Smimov V.F., Kartashov V.R. Modelirovanie usloviy biotransformatsii kisloroda bakteriyami organotrofami v peroksid vodoroda, stimuliruyushchiy korroziyu tsinka [Modeling the conditions of oxygen biotransformation by organotrophic bacteria into hydrogen peroxide, which stimulates zinc corrosion]. *Izvestiya VUZov. Prikladnaya khimiya i biotekhnologiya*, 2017, vol. 7, no. 2, pp. 80–88.

13. Liang C.H., He B. A titration method for determining individual oxidant concentration in the dual sodium persulfate and hydrogen peroxide oxidation system. *Chemosphere*, 2018, vol. 198, pp. 297–302.
14. Üzer A., Durmazel S., Ercag E., Apak R. Determination of hydrogen peroxide and triacetone triperoxide (TATP) with a silver – nanoparticles based turn-on colorimetric sensor. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2017, vol. 247, pp. 98–107.
15. Pettas I.A., Karayannis M.I. Simultaneous spectra-kinetic determination of peracetic acid and hydrogen peroxide in a brewery cleaning in place disinfection process. *Analytica Chimica Acta*, 2004, vol. 522, pp. 275–280.
16. Akio Makishima. *Biochemistry for materials science. Catalysts, complexes and proteins. (chapter five topics of bioluminescence and chemoluminescence)*. England, Elsevier, 2019. 329 p.
17. Amouroux D., Donard O.F.X. Hydrogen peroxide determination in estuarine and marine waters by flow injection with fluorescence detection. *Oceanologica Acta*, 1995, vol.18, pp. 353–361.
18. Tarvina M., McCord B., Mount K., Sherlachd K., Miller M.L. Optimization of two methods for the analysis of hydrogen peroxide: High performance liquid chromatography with fluorescence detection and high performance liquid chromatography with electrochemical detection in direct current mode. *Journal of Chromatography A*, 2010, vol. 1217, no. 48, pp. 7564–7572.
19. Nasirizadeh N., Shekari Z., Nazari A., Tabatabaee M. Fabrication of a novel electrochemical sensor for determination of hydrogen peroxide in different fruit juice samples. *Journal of food and drug analysis*, 2016, vol. 24, no. 1, pp. 72–82.
20. Kite S.A., Assresaahegn B.D., Soreta T.R. Electrochemical determination of hydrogen peroxide at a glassy carbon electrode modified with palladium nanoparticles. *Journal of the Serbian Chemical Society*, 2013, vol. 78, no. 5, pp. 701–711.
21. Prabhu P., Babu S., Narayanan S.S. Synergetic effect of Prussian blue film with gold nanoparticle graphite–wax composite electrode for the enzyme-free ultrasensitive hydrogen peroxide sensor. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 2014, vol. 18, no. 4, pp. 883–891.
22. Xu S., Peng B., Han X. A third-generation H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> biosensor based on horseradish peroxidase-labeled Au nanoparticles self-assembled to hollow porous polymeric nanospheres. *Biosensors and Bioelectronics*, 2007, vol. 22, pp. 1807–1810.
23. Ensafi A.A., Rezaei F., Rezaei B. Electrochemical sensor based on porous silicon/silver nanocomposite for the determination of hydrogen peroxide. *Sensors and Actuators B*, 2016, vol. 231, pp. 239–244.
24. Afraz A., Rafati A.A., Hajianet A. Analytical sensing of hydrogen peroxide on Ag nanoparticles–multiwalled carbon nanotube-modified glassy carbon electrode. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 2017, vol. 17, no. 7, pp. 2017–2025.
25. Klassen N.V., Marchington D., MCGowan H.C.E. H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> determination by the I<sub>3</sub><sup>-</sup> method and by KMnO<sub>4</sub> titration. *Anal Chem*, 1994, vol. 66, pp. 2921–2925.
26. Perevezentseva D., Gorchakov E., Petrushin M., Hismutdinov I., Bimatov V. Influence of silver nanoparticles conditions synthesis on their electrochemical properties. *AIP Conference Proceedings: Prospects of Fundamental Sciences Development (PFSD-2016)*, 2016, vol. 1772, article number 020005.
27. Perevezentseva D., Gorchakov E., Fedotova D., Bimatov V., Triphonova E. Electrocatalytic oxidation of hydrogen peroxide on the graphite electrode based on silver nanoparticles. *Key Engineering Materials*, 2017, vol. 743, pp. 287–291.
28. Meretukov M.A. *Zoloto: khimiya, mineralogiya, metallurgiya* [Gold: chemistry, mineralogy, metallurgy]. Moscow, Ruda i metally Publ., 2008. 528 p.
29. Giovanni M., Pumera M. Size dependent electrochemical behavior of silver nanoparticles with sizes of 10, 20, 40, 80 and 107 nm. *Electroanalysis*, 2012, vol. 24, no. 3, pp. 615–617.
30. Sayed S.A., Abdel-Rehim, Hassan H.H., Ibrahim M.A.M., Amin M.A. Electrochemical Behaviour of a Silver Electrode in NaOH Solution. *Monatshefte für Chemie/Chemical Monthly*, 1998, vol. 129, no. 11, pp. 1103–1117.
31. Droog J.M.M., Huisman F. Electrochemical formation and reduction of silver oxides in alkaline medium. *Journal of Electroanalytical Chemistry and Interfacial Electrochemistry*, 1980, vol. 115, pp. 211–224.
32. Zaky A.M., Assaf F.H., Sayed S.A., Rehim E.L., Mohamed B.M. Electrochemical behaviour of silver in borate buffer solutions. *Applied Surface Science*, 2004, vol. 221, no. 1–4, pp. 349–357.

Received: 22 February 2020.

#### Information about the authors

**Darya O. Perevezentseva**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Eduard V. Gorchakov**, Cand. Sc., associate professor, Stavropol State Agrarian University.



УДК552.113

## ПЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СОВРЕМЕННОГО ОСТРОВОДУЖНОГО ВУЛКАНИЗМА НА ПРИМЕРЕ ЛАВ ВУЛКАНА БАТУР (О. БАЛИ, ИНДОНЕЗИЯ)

Якич Тамара Юрьевна<sup>1</sup>,  
cherkasovatu@tpu.ru

Савинова Олеся Вячеславовна<sup>1</sup>,  
logvinenkoov@tpu.ru

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

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

**Актуальность** изучения современного вулканизма заключается в понимании сложных процессов дифференциации, ассимиляции и смешения магм, зафиксированных в минералого-петрогеохимических и текстурно-структурных особенностях строения современных вулканитов. С другой стороны, с базитовым вулканизмом повышенной щелочности современных островодужных систем зачастую связано экономически значимое оруденение цветных и благородных металлов. **Целью** настоящей работы является изучение и интерпретация минералогических и петрохимических особенностей лав действующего вулкана Батур (о. Бали, Индонезия). **Объектами** исследования являются вулканиты, отобранные из лавовых потоков 1964 г. извержения действующего вулкана Батур. Породы современного островодужного магматизма и встречающиеся в них минералы изучены методами оптической и электронной микроскопии с применением энергодисперсионной спектроскопии. Химический состав основных петрогенных компонентов получен с помощью силикатного анализа, микроэлементный состав – с помощью масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой. В результате проведенных исследований было установлено, что все образцы изученных вулканитов имеют порфировую структуру и содержат вкрапленники плагиоклаза (17...23 об. %), оливина (3 об. %) и пироксена (2 об. %), расположенных в мелкозернистой массе мезостазиса, содержащего плагиоклазы, титаномагнетит, пироксен и вулканическое стекло. Для порфировых вкрапленников плагиоклаза характерна «ячеистая» структура, которая проявлена в виде ориентированных расплавных включений (~0,05 мм), содержащих первичный силикатный и сульфидный расплавы. По петрохимическим показателям породы относятся к высокоглиноземистым базальтам ( $Al_2O_3 \geq 18,0$ ). Сложный характер зональности порфировых вкрапленников плагиоклазов согласуется с быстрым охлаждением исходных расплавов, когда выделяющийся плагиоклаз не может прийти в равновесие с оставшейся еще жидкой магмой, по средневзвешенному составу он относится к лабрадор-битовниту. Оливин сочетает несколько вариантов перераспределения железа в своем составе. Отмечается прямая зональность с накоплением железа в краевых частях зерен, специфичные «структуры распада» с фазой «окси-оливина» и однородные кристаллы оливина с магнезиальностью  $Mg\#(Fo) [=Mg/(Fe^{2+}+Mg)*100\%]$  ~ 66. Повышенная железистость оливина и примесь в нем MnO служат свидетельством того, что изучаемые породы являются производными базальтовых расплавов с щелочным уклоном. По представлению авторов механизм формирования изучаемой серии андезитобазальтов имеет следующий сценарий формирования. В период интенсивного вулканизма 1964 г. извержения вулкана Батур магматическая камера периодически обогащалась высокомагнезиальным (оливиновым) базальтом через определенные промежутки времени. Далее этот расплав поднимался в верхнюю часть камеры с последующим фракционированием оливина и клинопироксена при кристаллизации плагиоклаза и накоплением его в верхней части магматической камеры. В период поступления новой порции родоначального расплава существующая смесь не успевала прийти в равновесие с поступившей порцией расплава, изливаясь на поверхность и формируя лавы высокоглиноземистого базальта. Включения глобул ковеллина и халькопирита в расплавных включениях порфировых вкрапленников плагиоклаза свидетельствуют о существовании высокофракционированного сульфидного расплава на более глубинном уровне.

### Ключевые слова:

Современный островодужный вулканизм, высокоглиноземистые базальты, плагиоклаз, оливин, расплавные включения, сульфидные глобулы.

### Введение

Островная дуга Сунда-Банда является классическим примером процессов активного вулканизма, происходящего в условиях конвергентных границ или зоны субдукции [1–4]. Известно, что излившиеся вулканиты питаются магмами, генерируемыми в мантии, но при этом связь между мантией и изверженными на поверхность породами практически стерта из-за различных процессов кристаллизации, смешения, ассимиляции, происходящих в Земной коре до того момента, как исходная магма достигнет земной поверхности [5, 6]. Несмотря на то, что изменение состава

первичных расплавов значительно затрудняет петрогенетические реконструкции, композиционный состав первичных минералов и, в некоторой степени, текстурно-структурные особенности изверженных пород способны сохранить в себе важную петрогенетическую информацию [7]. Так, по изучению поведения никеля в оливинах из лавового потока последнего (1963–1965 гг.) извержения действующего вулкана Иразу (Коста-Рика) P. Ruprecht и T. Plank [8] установили, что современные андезитобазальты зарождаются на границе мантии и земной коры (граница Мохоравича 30...35 км) и, поднимаясь на поверхность, испы-

тывают различные процессы дифференциации, гибридации и смешения за очень короткий промежуток времени – от нескольких месяцев до нескольких лет. Эта же гипотеза подтверждается изучением диффузионного перераспределения железа во вкрапленниках оливина не только на примере вулкана Иразу [9], но и в других вулканах подобных островодужных систем [10, 11].

С другой стороны, островная дуга Сунда-Банда, как и другие вулканические провинции, связанные с зонами субдукции, является областью локализации экономически значимых медно-порфировых и эпitherмальных Au-Ag месторождений [12–16]. Известно, что эволюция большинства мантийных и коровых силикатных магм неизбежно приводит к несмесимости силикатного и несиликатного расплавов [17]. Такая несмесимость двух или более жидких и паровых фаз происходит во время непрерывно изменяющихся условий, связанных с декомпрессией магмы, охлаждением, кристаллизацией, гибридацией и т. д. [17]. Однако формирование сульфидного оруденения в условиях, связанных с зоной субдукции, по-прежнему остается дискуссионным. Одним из возможных объяснений накопления руды в связи с несмесимостью силикатных и сульфидных магм является вклад магматических сульфидов, образовавшихся в результате смешения базальтовых расплавов более ранних вулканических циклов [17]. Несмотря на то, что несмесимость силикатных и сульфидных фаз в магмах чрезвычайно трудно документировать, в основном из-за их переходного характера, небольших количеств и реактивных качеств, обильное количество глобул сульфидного расплава, захваченного высокомагнезильным оливином, обнаружено в лавах и шлаках 1941 г. извержения вулкана Толбачик на Камчатской дуге [18–20].

В данной работе были изучены лавы 1964 г. извержения действующего вулкана Батур, расположенного на острове Бали, входящего в структуру более высокого порядка – островную дугу Сунда-Банда. Изучены минералогические, текстурно-структурные и петрохимические особенности пород современного островодужного вулканизма в аспекте интерпретации их петрогенезиса.

#### **Геолого-структурная позиция о. Бали**

Остров Бали расположен в восточной части вулканической островной дуги Сунда-Банда (рис. 1) и сформирован в процессе субдукции движущейся на север океанической Индо-Австралийской плиты под Евразийскую [4]. Толщина Евразийской плиты под Суматрой и Явой составляет около 20...30 км [1–3] и около 18 км недалеко от острова Бали. Субдуцированная плита представляет собой океаническую плиту с возрастом от ~80 до ~130 млн лет [21, 22]. Скорость субдукции Индо-Австралийской плиты под Евразийскую составляет 6...7 см в год [23–25]. Вулканизм на острове Бали возник со времен среднего и позднего четвертичного периода [4, 26–28].

Вулкан Батур (1717 м) является действующим вулканом и относится к группе четвертичных вулканов (Батур, Агунг, Братан, Батукару и Сераджа), располагаю-

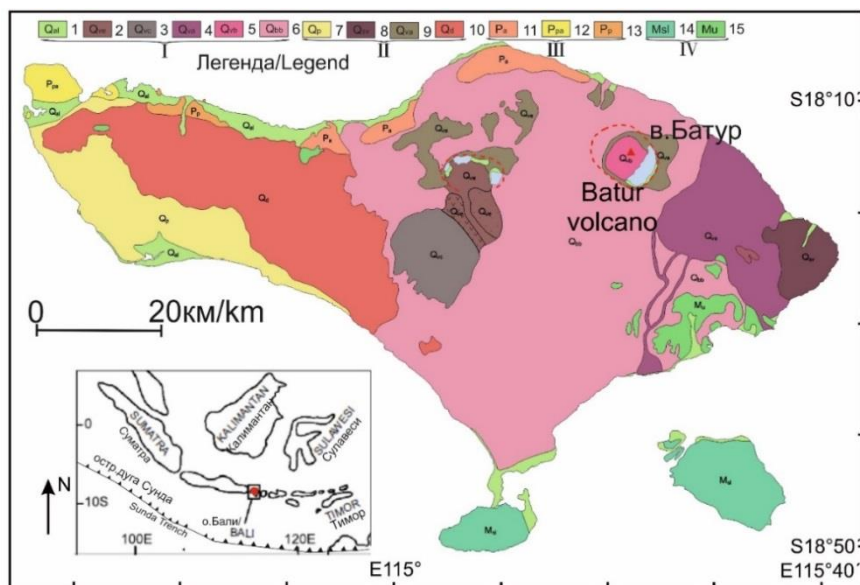
щихся на северо-востоке острова Бали [4]. Кальдера Батур расположена в восточной части острова Бали, с размером около 14×10 км<sup>2</sup>, состоящим из трех периодов образования и двух периодов формирования кальдеры, на что указывает появление двух ободов кальдеры. Вулканическая активность в кальдере Батур началась, по крайней мере, 500 тыс. лет назад, с образованием базальтово-андезитового стратовулкана (вулкан Пенулисан) [29]. Извержение лавы из вулкана Батур имеет широкий диапазон по составу от базальтов до риолитов, что указывает на зрелую ее эволюцию и прогрессивное развитие магматической системы, что привело к катастрофическим кальдерообразующим извержениям.

#### **Методы исследования**

Для изучения минералогических и петрохимических особенностей современных лав вулкана Батур было отобрано 6 образцов из лавового покрова извержения 1964 г. вблизи кальдеры вулкана. Из образцов были изготовлены шлифы и двуполированные пластины. Микроструктурный и элементный анализ проводился на оптическом микроскопе Carl Zeiss и на сканирующем электронном микроскопе Tescan Vega 3 SBU (Чехия, TESCAN), оснащенный приставкой для рентгенофлуоресцентного энергодисперсионного анализа (ЭДС) Oxford X-Max 50 с Si/Li кристаллическим детектором. Ускоряющее напряжение для СЭМ съемки и анализа было 20 кВ с интенсивностью тока зонда в пределах 4...11,5 нА. Локальный рентгено-спектральный анализ выполнялся с предварительной калибровкой интенсивности зонда (11,4...11,5 нА) по кобальтовому стандарту при рабочем (фокусном) расстоянии 15 мм. СЭМ фотографии накапливались для двух основных детекторов: вторичных электронов (SE – secondary electrons) и обратно-рассеянных электронов (BSE – backscattered electrons) в лаборатории отделения геологии (НИ ТПУ, г. Томск).

Для количественного анализа содержания элементов из образцов изготовлены навески фракцией 0,1 мм. Содержания микроэлементов в образцах получены методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ЦКП «Аналитический центр геохимии природных систем», г. Томск). Предварительно обожженную при 800 °С навеску, около 0,1000 г, разлагали с использованием смеси плавиковой и азотной кислоты в герметичных автоклавах в микроволновой печи при 200 °С. После чего путём выпаривания и растворения сухого остатка отгоняли фториды азеотропом соляной кислоты и переводили соли в нитратную форму. После разбавления раствор пробы анализировали с использованием масс-спектрометра с индуктивно-связанной плазмой Agilent 7500сх. Концентрация элементов в растворе пробы определялась по градуировочным графикам на основе градуировочных растворов производства фирмы Agilent. Расчёт концентраций элементов непосредственно в навеске пробы проводился с учётом потерь при прокаливании, разбавления, внутреннего и внешнего стандарта.

Содержания основных оксидов в породе определены силикатным анализом в ОАО «Западно-Сибирский испытательный центр», г. Новокузнецк.



**Рис. 1.** Схематическая геологическая карта о. Бали с изображением местоположения кальдеры вулкана Батур по данным [29]. Легенда: I – Четвертичные отложения (Голоцен): 1 – аллювиальные отложения; 2 – продукты вулканического извержения; 3 – вулканические продукты извержения вулкана Батукао; 4 – вулканические продукты извержения вулкана Агунг; 5 – современный вулканогенный материал вулкана Батур; II – средние и нижнечетвертичные отложения (Плейстоцен и Эоплейстоцен): 6 – туфовые отложения и вулканические селевые потоки вулканов Байан-Братан и Батур; 7 – формация Паласари, состоящая из конгломератов, песчаников, рифовых известняков; 8 – вулканический материал вулкана Серай; 9 – ранние вулканические отложения вулканов Байан-Братан и Батур; III – неогеновые отложения (Плиоцен): 10 – вулканические отложения вулканов Келатакан, Мербук, Патас и ассоциирующими с другими породными группами; 11 – формация Асаи, представленная лавами, брекчиями, пемзами и туфами с известковыми трещинами заполнения; 12 – формация Прапатагунг: известняки, песчаники с карбонатным цементом, мергели; IV – неогеновые отложения (Миоцен): 13 – вулканические отложения вулкана Пулаки: лавы и брекчи; 14 – формация Селатан, представленная преимущественно известняками; 15 – формация Сорга: туфы, мергели, песчаники; 16 – формация Улакан, состоящая из вулканических брекчий, лавовых потоков и туфов с прослоями известкового материала

**Fig. 1.** Schematic geological map of the Bali Island showing the Batur Caldera location after [29]. Legend: I – Quaternary: 1 – Alluvial deposit; 2 – volcanic products; 3 – volcanic products of Batukao volcano; 4 – volcanic products of Agung volcano; 5 – volcanics of Batur volcano; II – Lower Quaternary: 6 – Bajan-Bratan and Batur tuffs and volcanic mudflows; 7 – Palasari Formation: conglomerates, sandstones, reef limestones; 8 – Seraja volcanics; 9 – volcanics of old Bajan-Bratan volcano and old Batur volcano; III – Pliocene: 10 – Djembrana volcanics: lavas, breccias, tuffs of the volcanoes Kelatakan, Merbuk, Patas, and associated rocks; 11 – Asah Formation: lavas, breccias, pumiceous, tuffs with calcareous crack fillin; 12 – Prapatagung Formation: limestones, calcareous sandstones, marls; IV – Miocene: 13 – Pulaki volcanics: lavas and breccias; 14 – Selatan Formation: predominantly limestone; 15 – Sorga Formation: tuffs, marls, sandstones; 16 – Ulakan formation: volcanic breccias, lavas, tuffs with intercalations of calcareous material

## Результаты и их обсуждение

### Особенности минерального состава

Основные породообразующие минералы представлены *плаггиоклазом*, *пироксеном* и в меньшей степени *оливином*.

*Плаггиоклаз* – наиболее распространенный минерал порфирировых вкрапленников изучаемой андезибазальтовой серии вулканитов. Размер кристаллов различен – от 0,01 мм в виде вкрапленников в мезостазице и до 1,5 мм в порфирировых вкрапленниках. Порфирировые вкрапленники плаггиоклаза характеризуются наличием сложного двойникования, сочетающего различные виды блоковой зональности и резкие переходы между отдельными слоями. Присутствуют как округлые (оплавленные) очертания внутренних ядерных частей, так и прямая зональность. Сложный характер зональ-

ности порфирировых вкрапленников плаггиоклазов согласуется с быстрым охлаждением исходных расплавов, когда выделяющийся плаггиоклаз не может прийти в равновесие с оставшейся еще жидкой магмой. Другим объяснением сложного строения плаггиоклазовых вкрапленников с округлыми внутренними зонами могут являться процессы дегазации магмы при извержении, что связано со вскипанием и повышением температур, приводящих к оплавлению границ кристаллов, которые затем обрастают внешними каймами.

По химическому составу порфирировые вкрапленники плаггиоклаза соответствует лабрадору-битовниту с широкой вариацией содержания анортитовой молекулы в диапазоне (An 57...80 %). При этом плаггиоклазы, захваченные в расплавных включениях пор-

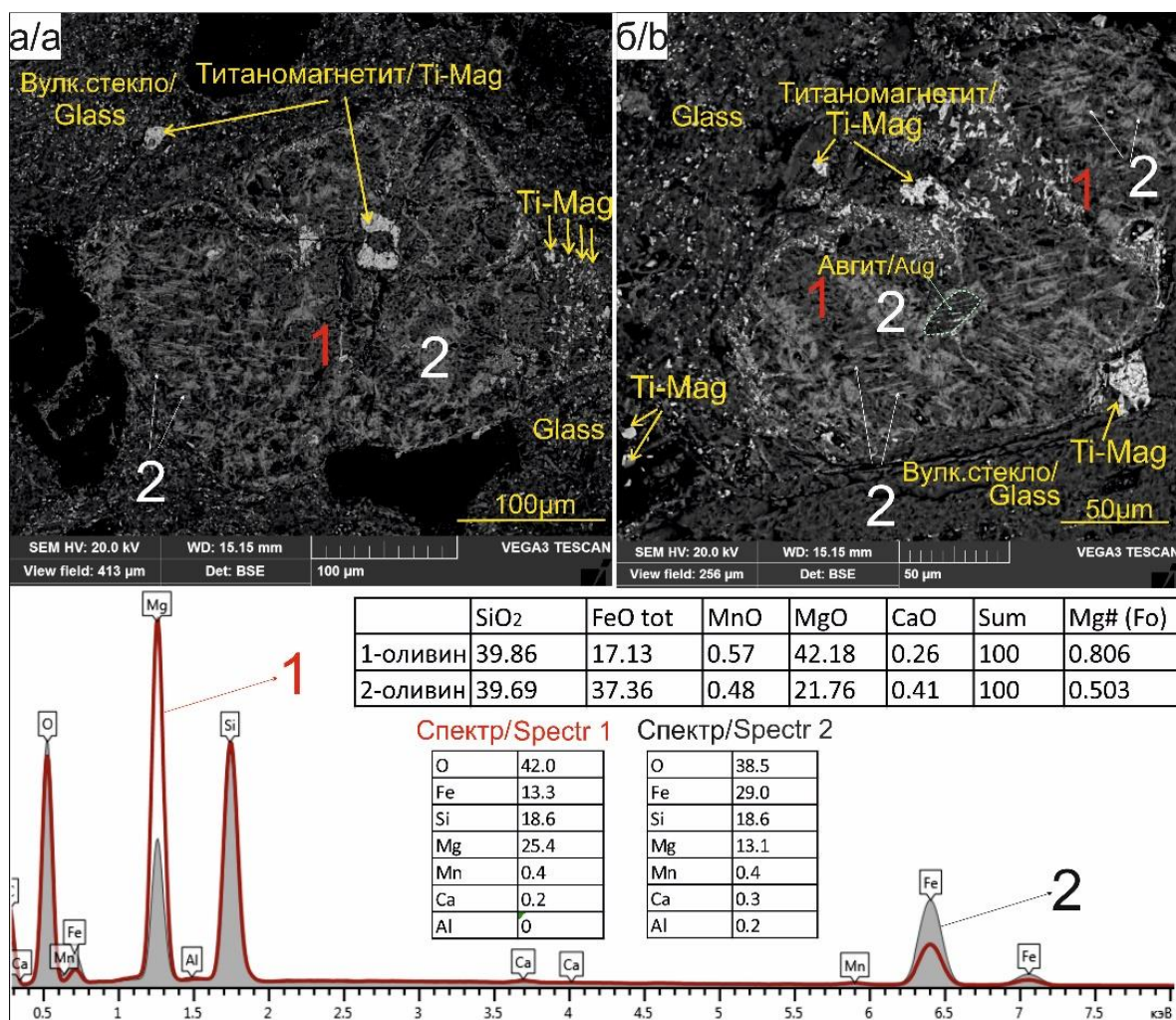
фировых вкрапленников плагиоклаза, имеют еще более разнообразный состав, от среднего (An 48...56 %) до основного, соответствующего битовниту с содержанием анортитовой молекулы (An 80...85 %).

**Пироксен** представлен главным образом клинопироксеном, который по составу в большинстве случаев отвечает авгиту. Фенокристы пироксена имеют размер зерен ~0,1...1,3 мм. Однако в качестве захваченных включений в титаномагнетите отмечаются и ортопироксены, а также ортопироксены, содержащие ламели клинопироксена.

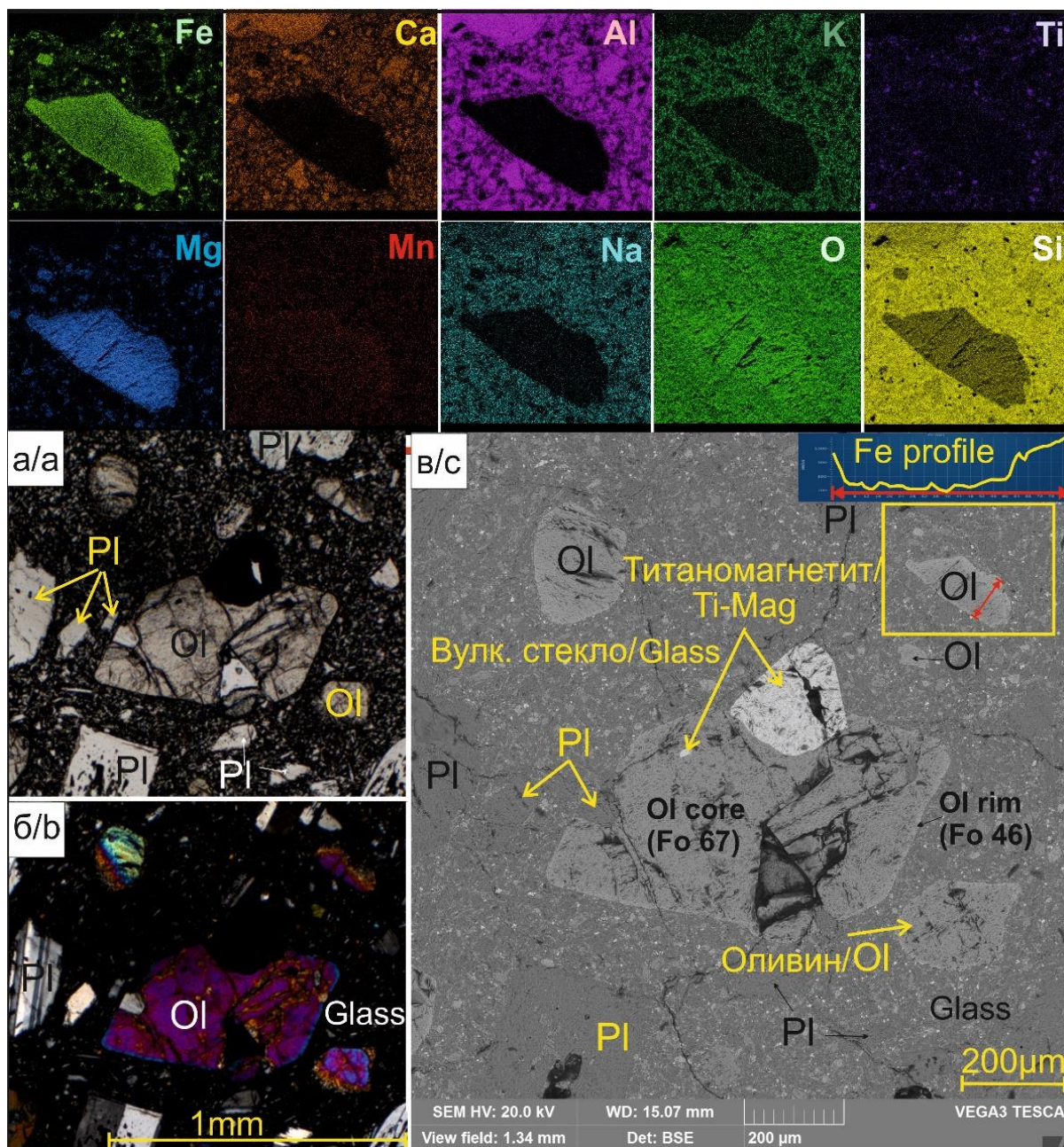
**Оливин** характеризуется широкими вариациями своего химического состава. Размерность его зерен колеблется в пределах 0,1...0,6 мм. Максимальное различие в содержании форстеритовой минала (Fo) =  $(Mg\# = [Mg / (Fe^{2+} + Mg) \times 100 \%])$  в пределах одного образца наблюдается в образце базальта № 1084\_2, где оливин характеризуется переменным составом с колебанием форстеритовой молекулы от 86...46 % и образует специфичные «структуры распада». По всей видимости, подобные структуры представляют собой раннюю стадию окислительного распада оливина в виде фазы «окси-оливина». Эта фаза структурно

близка вмещающему оливину и поэтому может образовывать правильно ориентированные пластинки оливиноподобной фазы, обогащенной  $Fe^{3+}$ . Такая сверхструктура может возникать при некоторых процессах упорядочения. На более поздней стадии эти пластинки должны разлагаться на пироксен и магнетит. На снимках СЭМ фиксируется тот факт, что в матрице магнезиального оливина с (Fo 78...86 %) (рис. 2) располагаются вроски железистого оливина с (Fo 46...62 %) (рис. 2). Также наблюдаются и зональные зерна оливина с накоплением железа в краевых частях, характерные для трахиандезибазальтового порфирита (обр. 1084\_3) (рис. 3).

В количестве от 1...7 % в изучаемых вулканитах встречается оксид титана и железа – **титаномагнетит**. Его размерность различна и варьирует в широких пределах от 0,01...1,0 мм. В единичных случаях отмечается **магнетит** и **ильменит**. Из сульфидов отмечены преимущественно сульфиды меди: **халькопирит** и **ковеллин**, в виде округлых глобулей, захваченных в расплавных включениях плагиоклазовых порфировых вкрапленников (рис. 4).



**Рис. 2.** Зерно оливина с фазой «окси-оливина» в ассоциации с титаномагнетитом (а) и авгитом (б) в базальте (обр. 1084\_2)  
**Fig. 2.** Olivine grain with «exsolution» in association with titanomagnetite (a) and augite (b) in basaltic porphyry (sam. 1084\_2). Abbreviations: Aug – augite, Ti-mag – titanomagnetite



**Рис. 3.** Элементная карта распределения химических элементов на участке, содержащем зональное зерно оливина; микрофотографии участка, содержащего зональные кристаллы оливина в параллельных (а) и скрещенных (б) николях, а также в обратно-отраженных электронах сканирующего микроскопа (в) в трахиандезибазальте (обр. 1084\_3)

**Fig. 3.** Elemental map illustrating the distribution of elements on the area containing zonal olivine grains. Transmitted-light microphotographs of the area containing zonal olivine grains in plane (a) and cross-polarized (b) light. Backscatter electron images (c) of the same area in the trachyandesibasalt (sam. 1084\_3). Abbreviations: Ol – olivine; Pl – plagioclase; Ti-mag – titanomagnetite

#### Петрографическая характеристика

Основная группа изученных вулканитов представлена базальтами нормального ряда и базальтами с щелочным уклоном.

Трахиандезиобазальт I типа сложен главным образом вкрапленниками плагиоклазов (80...90 %), клинопироксена (10...15 %) и оливина (5...7 %).

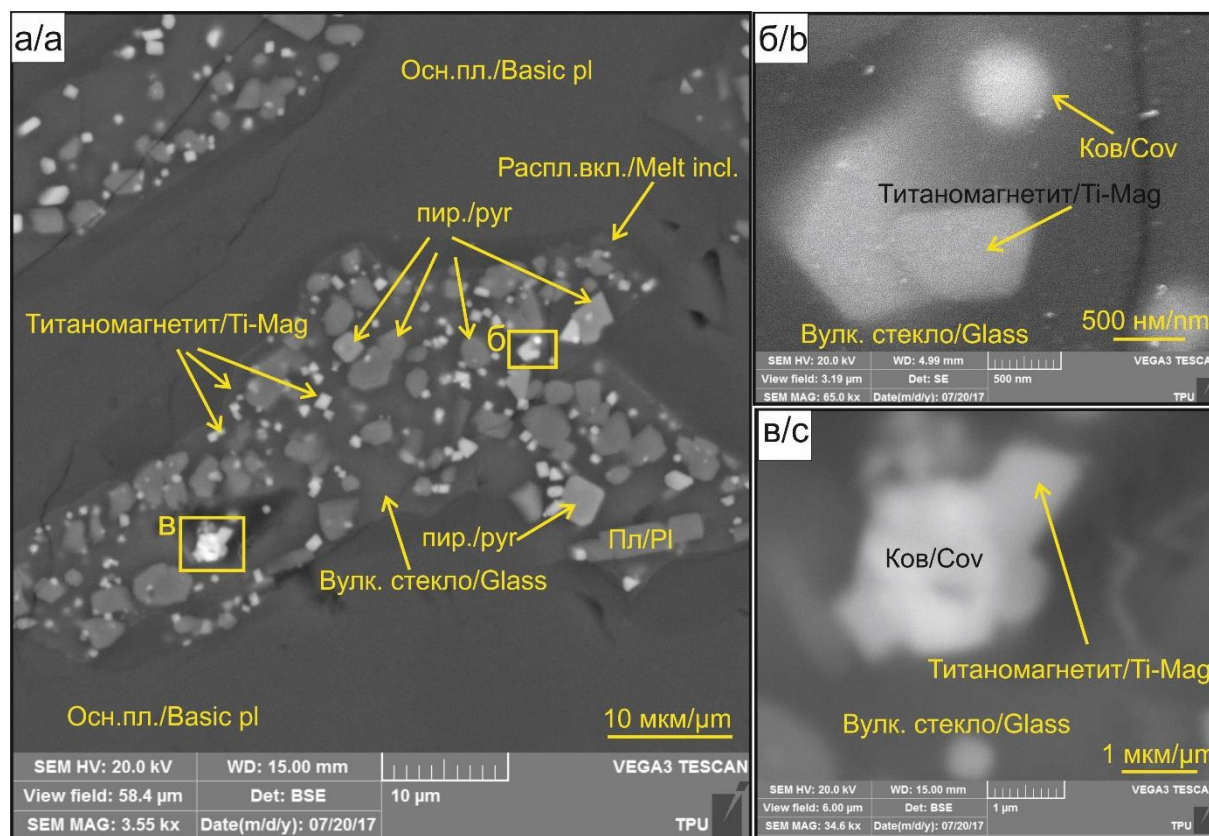
Количество порфировых вкрапленников колеблется в пределах 35...40 % от общего объема породы. В

основной массе встречаются как крупные фенокристы (вкрапленники) плагиоклазов (до 1,5 мм), так и мелкие кристаллы (до 0,02 мм), формирующие интерсертальную структуру основной массы порфирита (рис. 5, а, б). По составу порфировые вкрапленники плагиоклаза соответствует лабрадору – битовниту с содержанием анортитовой молекулы (An 67...73 %). Фенокристы пироксена имеют размер зерен ~0,1...1,0 мм. В подавляющем большинстве случаев они представ-

лены авгитом. Оливин встречается спорадически и представляет собой высокожелезистую разновидность с (Fo 60...67 %). Размерность зерен оливина до 0,1 мм, повсеместно по краям он замещается иддигситом ярко буро-оранжевого цвета, что подчеркивает его высокую железистость.

В количестве 1...3 % встречается оксид железа с примесью титана – титаномагнетит.

Базальт сложен в свою очередь вкрапленниками плагиоклазов (80...85 %), оливином (10...15%) и, в меньшей степени, клинопироксеном (5...7 %). Количество порфириковых вкрапленников от общего объема составляет 40...50 %.

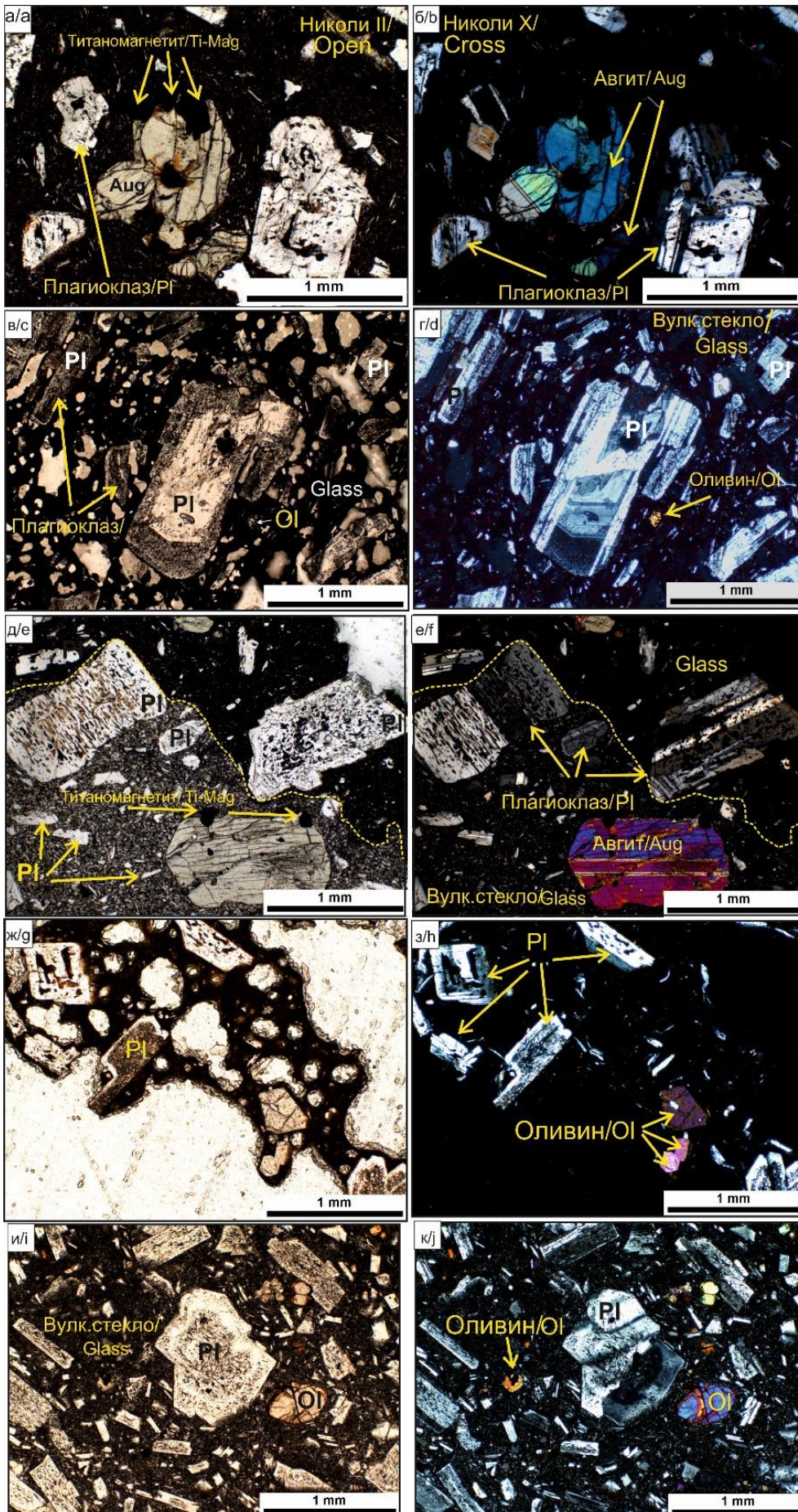


**Рис. 4.** Вид расплавных включений в порфириковых вкрапленниках плагиоклаза (а), содержащих сульфидные глобулы (б) и зерна (в), отвечающие по составу ковеллину (Cov). Снимки со сканирующего электронного микроскопа в детекторе обратно-отраженных электронов

**Fig. 4.** Shape of melt inclusions hosted in plagioclase phenocrysts (a) containing sulfide globules (b) and grains (c), corresponding in composition to covellite (Cov). Images from scanning electron microscope in backscatter electron detector

**Рис. 5.** Фотографии шлифов изучаемых лав вулкана Батур: трахиандезибазальт с вкрапленниками клинопироксена и плагиоклаза в параллельных (а) и скрещенных (б) николях; базальт с зональными вкрапленниками кристаллов плагиоклаза и единичными зернами оливина в параллельных (в) и скрещённых (г) николях; контакт различных по цвету стекол, отражающий смешение различных расплавов (желтая пунктирная линия показывает границу между различными по цвету расплавами) с крупными вкрапленниками плагиоклазов с «ячеистой структурой» захвата расплавных включений и кристаллов авгита на фоне микролитовой основной массы в параллельных (д) и скрещенных (е) николях; базальты с вкрапленниками плагиоклаза и оливина в параллельном (ж, и) и отраженном (з, к) свете

**Рис. 5.** Transmitted-light microphotographs of the studied lavas from the Batur volcano: basaltic trachyandesite with clinopyroxene and plagioclase phenocrysts in plane (a) and cross-polarized (b) light; basalt comprises large prisms of plagioclase with minor amount of olivine grains in plane (c) and cross-polarized (d) light; contact zone of various-colored melts reflected a possible melts mixing (yellow dotted line separated different color melts) comprises the large plagioclase phenocrysts with a «sieve-textured domains» and augite crystals in the groundmass of plagioclase microlites in plane (e) and cross-polarized (f) light; basalts with plagioclase and olivine phenocrysts in plane (g, i) and cross-polarized (h, j) light. Abbreviations: Pl – plagioclase; Ol – olivine; Cpx – clinopyroxene; Ti-mag – titanomagnetite



Крупные фенокристы плагиоклазов (размером до 1,5 мм) имеют весьма сложное зональное строение (рис. 5, в, з). По составу они соответствуют лабрадору – битовниту с содержанием анортитовой молекулы (An 57...72 %). Крупные кристаллы плагиоклазов захватывают по зонам роста вулканическое стекло, титаномагнетит и сульфиды меди, содержание Cu в отдельных случаях доходит до 75 вес. %, что соответствует по составу анилиту. В большинстве случаев медный сульфид представлен ковелином. Мелкие кристаллы плагиоклазов спорадически встречаются в стекле основной массы. Их состав более основной по сравнению с крупными вкрапленниками и соответствуют битовниту с содержанием анортитовой молекулы (An 80...85 %). Единичные фенокристы клинопироксена имеют размер зерен ~0,3...1,0 мм и по составу отвечают авгиту. Оливин характеризуется переменным составом с колебанием форстеритовой молекулы Fo 86...46 % и образует специфичные структуры с сегрегацией железа по зонам роста кристаллов оливина (рис. 2). Подавляющее большинство зерен оливина имеют именно такой структурный рисунок. Размерность зерен оливина до 0,6 мм, по трещинам и по краям он замещается иддингситом и титаномагнетитом.

Титаномагнетит – главный окисный минерал. Его морфология различна. Он образует как хорошо ограниченные идиоморфные кристаллы изометричного и пластинчатого габитуса, так и тонко распыленную мелкую вкрапленность в вулканическом стекле основной массы. Содержание его в породе достигает 5...7 об. %. В качестве минеральных включений в крупных зернах (~1 мм) титаномагнетита встречается вулканическое стекло, пироксены (энстатит). Титаномагнетит содержит  $Al_2O_3$  и  $V_2O_5$  около 1 вес. %. Помимо титаномагнетита встречается магнетит с примесью  $V_2O_5$  до 0,4 вес. % и  $TiO_2$  до 0,3 вес. % и ильменит.

*Трахиандезиобазальт II типа* характеризуется наличием вкрапленников плагиоклаза (80...85 %), оливина (10...12 %) и клинопироксена (5...10 %). Количество порфирировых вкрапленников от общего объема порфирита составляет не более 40 %. В образце фиксируются различные по цвету стекла, что, возможно, отражает различную степень окисленности либо результат смешения расплавов (рис. 5, д, е). При исследовании характера зональности оливина была установлена химическая зональность с накоплением железа в краевых частях (рис. 3). Совместно с железом по краям зерен оливина накапливается и марганец (рис. 3). Размерность зерен оливина варьирует от 0,2...1,5 мм с переменным содержанием форстеритовой молекулы (Fo 68...46 %) от центра к краям. Клинопироксен по химическому составу отвечает авгиту. Размерность его вкрапленников варьирует в пределах 0,1...1,3 мм. В отдельных фенокристаллах авгита также отмечается прямая химическая зональность с накоплением Fe, Mn, Na и K в краевых частях. Крупные вкрапленники плагиоклазов (до 2,0 мм) аналогично другим породообразующим минералам имеют сложное зональное строение. По составу фенокристы

соответствуют лабрадору-битовниту с содержанием анортитовой молекулы (An 66...80 %). В них фиксируется как прямая химическая зональность с понижением номера плагиоклаза от центра к краю, так и обратная. В ядерных частях таких зерен содержание анортитовой молекулы колеблется в пределах (An 73...80 %), в то время как в краевых частях (An 66...68 %) соответственно. Также наблюдается обратная зональность, когда в ядерных частях вкрапленников плагиоклаза содержание анортитовой молекулы (An 65...68 %), а в краевой части (An 68...74 %). Мелкие вкрапленники плагиоклазов, встречающиеся в основной массе вулканического стекла, имеют разнообразный состав – от андезина-лабрадора (An 48...56 %) до битовнита (с An ~80 %). Плагиоклазы, захваченные в качестве включений в оливине, также по составу отвечают битовниту. Во многих случаях для плагиоклазов характерна своеобразная «ячеистая» структура, которая проявлена в виде ориентированных вдоль удлинения кристаллов расплавленных включений, содержащих первичный силикатный и сульфидный расплав (рис. 5, ж, з). В качестве захваченных включений в фенокристаллах плагиоклазов наиболее распространены титаномагнетит и авгит, сульфидные включения представлены преимущественно ковелином (рис. 4).

#### Петрохимические особенности

Согласно данным силикатного анализа изученная серия вулканических пород представлена базальтами, андезибазальтами и трахиандезибазальтами (таблица, рис. 6, а) с вариацией содержания  $SiO_2$  в пределах 49,62 ...54,77 вес. %.

Для главных петрогенных компонентов отмечается отрицательная корреляция между  $TiO_2$  и MgO и положительная с  $Na_2O$  и  $K_2O$ . Для всех образцов характерно повышенное содержание  $Al_2O_3$  (17,2...18,8 вес. %) и пониженное MgO (<4,9 вес. %).

Спектры распределения редкоземельных элементов (РЗЭ), нормированные по примитивной мантии (рис. 6, б), образуют отрицательный уровень наклона кривой, что говорит об обогащении легкими редкоземельными элементами (LREE), относительно тяжелых РЗЭ (HREE) и имеет типичные признаки островодужного магматизма: выражены тантал-ниобиевый минимумы и высокие концентрации крупноионных несовместимых элементов LILE (Ba, U, Rb, Sr). Европиевый минимум на спектрах отсутствует, что указывает на незначительное фракционирование плагиоклазов в расплаве. Присутствие Tm-Yb минимума во всех образцах, вероятно, указывает на фракционирование оливина и пироксена из основной массы.

По данным нашего исследования высокоглиноземистые базальты вулкана Батур сформировали лавовые потоки в период интенсивного вулканизма 1964 г. извержения путем периодического обогащения новых порций высокомагнезиального (оливинового) базальта, поступающего в магматическую камеру под вулканом. Далее этот расплав поднимался в верхнюю часть камеры с последующим фракционированием оливина и клинопироксена при кристаллизации пла-



гиоклаза и накоплением его в верхней части магматической камеры. В период поступления новой порции родоначального расплава существующая смесь не успевала прийти в равновесие с поступившей порцией расплава, изливаясь на поверхность и формируя лавовые покровы.

**Таблица.** Главные компоненты и редкие элементы-примеси в составе лав в. Батур извержения 1964 г.

**Table.** Major and trace elements composition of rocks from the 1964 Batur volcano eruption

Образец Sample	1084_1	1084_2	1084_3	1084_4	1084_5	1084_6
Основные компоненты (вес. %)/Major elements (wt. %)						
SiO <sub>2</sub>	54,77	51,39	53,46	49,62	51,31	52,24
TiO <sub>2</sub>	1,01	0,95	1,04	0,97	0,99	0,99
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18,58	18,29	18,79	17,20	18,00	18,03
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,76	8,34	3,00	4,13	1,54	5,69
FeO	2,34	3,12	6,54	9,85	9,81	5,45
MnO	0,17	0,19	0,17	0,20	0,20	0,19
CaO	6,76	7,90	7,64	7,80	8,17	7,44
MgO	2,39	4,95	3,09	4,40	4,50	2,85
Na <sub>2</sub> O	4,19	2,99	3,99	3,38	3,40	3,60
K <sub>2</sub> O	1,37	0,72	1,14	0,96	0,93	1,05
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,24	0,20	0,24	0,26	0,21	0,26
Total	98,58	99,04	99,10	98,77	99,06	97,79
Редкие элементы-примеси (г/т)/Trace elements (ppm)						
Sc	20,94	23,24	20,96	23,44	24,22	22,70
V	151,38	218,90	176,81	214,75	222,35	192,41
Cr	33,39	86,78	43,03	223,11	134,09	196,48
Co	15,81	25,43	16,30	26,81	27,53	19,54
Ni	7,73	24,24	9,77	51,53	48,12	57,19
Cu	75,39	49,33	63,94	96,56	78,71	47,85
Zn	71,92	68,37	63,21	75,87	70,68	71,94
Ga	12,86	10,56	10,93	11,62	11,25	12,16
Rb	27,95	13,79	18,93	18,68	17,51	20,16
Sr	381,59	367,80	361,64	969,17	383,51	544,62
Y	21,94	14,09	17,14	19,33	16,68	19,89
Zr	91,23	53,32	67,38	66,06	63,25	75,43
Nb	5,67	3,14	3,74	3,58	3,42	4,26
Mo	1,34	1,04	1,42	2,96	3,22	5,98
Cs	0,87	0,34	0,56	0,56	0,53	0,62
Ba	262,81	177,01	199,85	232,31	205,96	231,11
La	15,03	10,08	25,08	42,41	17,38	26,07
Ce	30,59	19,73	46,03	81,94	29,93	48,15
Pr	3,71	2,35	5,00	8,19	3,36	5,29
Nd	16,05	10,04	18,87	31,86	13,53	20,34
Sm	3,93	2,51	3,54	5,17	3,07	4,13
Eu	1,30	0,93	1,15	1,46	1,02	1,26
Gd	4,09	2,64	3,43	4,40	3,18	3,97
Tb	0,66	0,42	0,54	0,66	0,51	0,62
Dy	4,12	2,70	3,28	3,72	3,13	3,76
Ho	0,88	0,56	0,68	0,77	0,67	0,78
Er	2,46	1,55	1,92	2,09	1,87	2,21
Tm	0,36	0,23	0,28	0,31	0,28	0,32
Yb	2,32	1,48	1,82	1,96	1,75	2,06
Lu	0,35	0,23	0,28	0,30	0,27	0,31
Hf	2,49	1,48	1,85	1,81	1,74	2,08
Ta	0,39	0,21	0,26	0,24	0,23	0,28
Pb	5,10	6,06	14,51	11,61	4,08	7,04
Th	2,81	1,61	2,70	3,59	1,86	2,86
U	0,68	0,41	1,05	1,07	0,47	0,78

Примечание: 1084\_1 – Трахиандезибаза́лт/Basaltic trachyandesite; 1084\_2 – База́лт/Basalt; 1084\_3 – Трахиандезибаза́лт/Basaltic trachyandesite; 1084\_4 – База́лт/Basalt; 1084\_5 – База́лт/Basalt; 1084\_6 – Андезибаза́лт/Basalticandesite.

## Выводы

1. Все образцы изученных вулкаников имеют порфировую структуру и содержат вкрапленники плагиоклаза (17...23 об. %), оливина (3 об. %) и пироксена (2 об. %), расположенные в мелкозернистой массе мезостазиса, содержащего плагиоклаз, титаномагнетит, пироксен и вулканическое стекло. Для порфировых вкрапленников плагиоклаза характерна «ячеистая» структура, которая проявлена в виде ориентированных расплавных включений (~0,05 мм), содержащих первичный силикатный и сульфидный расплавы. В большинстве случаев плагиоклазы соответствуют по составу лабрадорбитовниту, что согласуется с принадлежностью пород к базальтовой и базальто-андезитовой серии.
2. Изучение андезибазальтов палеокальдеры действующего вулкана Батур свидетельствует об активном участии в образовании исследуемых пород сложных процессов дифференциации, ассимиляции и смешения, оказывающих непосредственное влияние на состав породообразующих минералов и конечный состав пород. По петрохимическим показателям породы относятся к высокоглиноземистым базальтам ( $Al_2O_3 \geq 18,0$ ), характерным для современного островодужного магматизма, главным минералом-концентратором алюминия в которых выступает плагиоклаз.
3. Сложный характер зональности порфировых вкрапленников плагиоклазов согласуется с быстрым охлаждением исходных расплавов, когда выделяющийся плагиоклаз не успевает прийти в равновесие с оставшейся еще жидкой магмой. Другим объяснением сложного строения плагиоклазовых вкрапленников с округлыми внутренними зонами могут являться процессы дегазацией магмы при извержении, что связано со вскипанием и повышением температур, приводящих к оплавлению границ кристаллов, которые впоследствии обрастают внешними каймами.
4. В изучаемых лавах наблюдается несколько вариантов перераспределения железа в оливине: накопление его в краевой части зерен, специфичные «структуры распада» с фазой «окси-оливина» и незональные кристаллы оливина с магниезальностью ~66. Повышенная железистость оливина и примесь в нем MnO (до 2,23 вес. %) подтверждают тот факт, что породы являются производными базальтовых расплавов с щелочным уклоном.
5. Включения глобулей ковеллина и халькопирита в расплавных включениях свидетельствуют о наличии высокофракционированного высокомедистого по составу расплава на более глубинном уровне.

Работа выполнена в рамках программы повышения конкурентоспособности ТПУ.

Выражаем благодарность Гаврилову Роману Юрьевичу за помощь в проведении аналитических исследований по определению основных оксидов с помощью силикатного анализа и редких элементов методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой. Выражаем признательность Краснощековой Любови Афанасьевне за помощь в проведении фотосъемки прозрачных шлифов, а также благодарим Мазурова Алексея Карповича за написание рецензии.

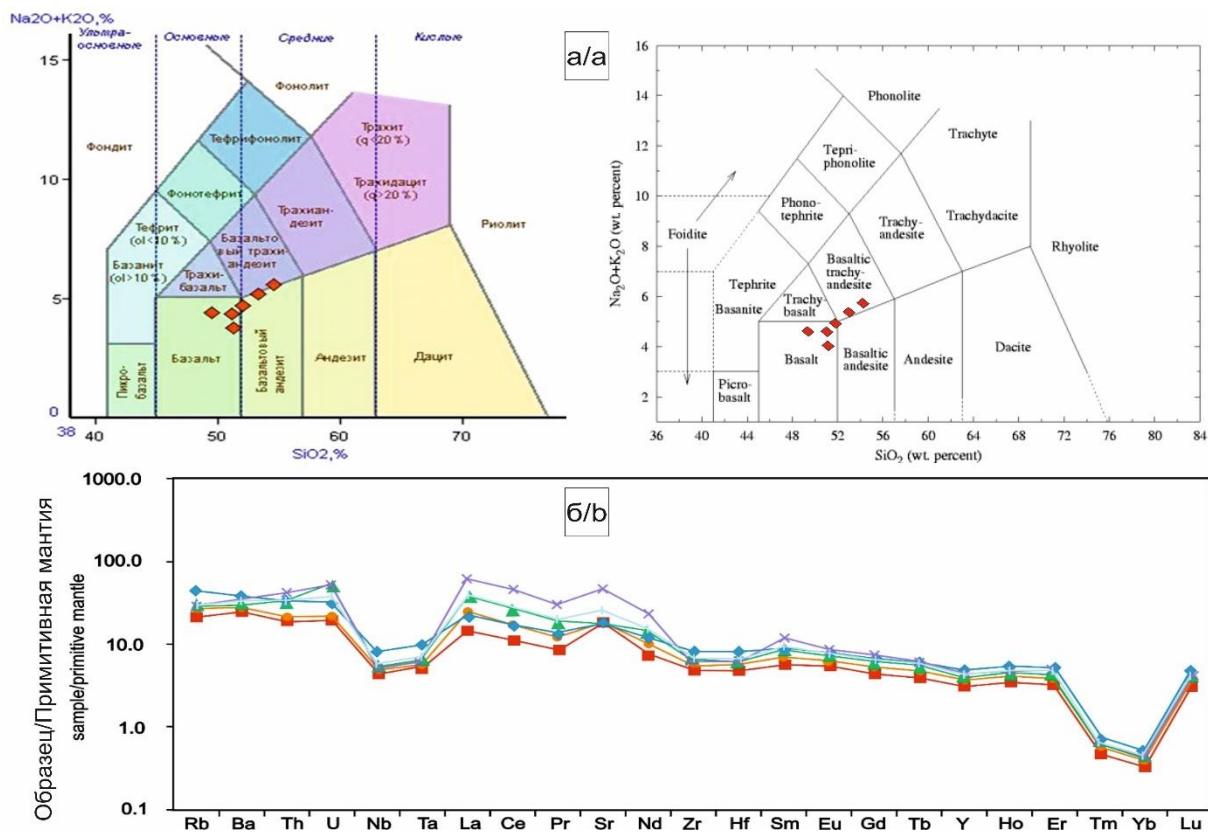


Рис. 6. Составы изучаемых пород на диаграмме общей кислотности-щелочности пород [30] (а); нормализованные на примитивную мантию по [31] литофильные редкие элементы изучаемых лав 1964 г. извержения вулкана Батур (б)

Fig. 6. Total alkali-silica diagram showing the location of the studied lavas from the Batur volcano [30] (a); primitive mantle-normalized after [31] lithophile trace element compositions of lavas from the 1964 Batur eruption (b)

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENSES

- Ben-Avraham Z., Emery K. O. Structural framework of the Sunda Shelf. *Bulletin of American Association of Petroleum Geologists*, 1973, vol. 57, pp. 2823–2366.
- Whitford D.J. Strontium isotopic studies of the volcanic rocks of the Sunda arc, Indonesia, and their petrogenesis. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1975, vol. 39, pp. 1287–1302.
- Curray J.R., Shor G.G., Raitt R.W., Henry M. Seismic refraction and reflection studies of crustal structure of the eastern Sunda and western Banda arcs. *Journal of Geophysical Research*, 1977, vol. 82, pp. 2479–2489.
- Hamilton W.B. *Tectonics of the Indonesian Region*. Washington, US Geological Survey Professional Papers 1078, 1979. 345 p.
- Kent A.J.R., Darr C., Koleszar A.M., Salisbury M.J., Cooper K.M. Preferential eruption of andesitic magmas through recharge filtering. *Nature Geoscience*, 2010, vol. 3, pp. 631–636.
- Dungan M.A., Wulfe A., Thompson R. Eruptive stratigraphy of the Tatar-San Pedro complex, 36 °C, Southern Volcanic Zone, Chilean Andes: reconstruction method and implications for magma evolution at long-lived arc volcanic centers. *Journal of Petrology*, 2001, vol. 42, pp. 555–626.
- Yakich T., Brzozowski M., Chernishov A., Grieco G., Savinova O., Timkin T., Marfin A. Petrological Features of the Burlakski and Nizhne-Derbinsk Mafic-Ultramafic Plutons (East Sayan Mountains, Siberia, Russia). *Minerals*, 2020, vol. 10 (119), pp. 1–22.
- Ruprecht P., Plank T. Feeding andesitic eruptions with a high-speed connection from the mantle. *Nature*, 2013, vol. 500, pp. 68–72.
- Oeser M., Ruprecht P., Weyer S. Combined Fe-Mg chemical and isotopic zoning in olivine constraining magma mixing-to-eruption timescales for the continental arc volcano Irazú (Costa Rica) and Cr diffusion in olivine. *American Mineralogist*, 2018, vol. 103, Iss. 4, pp. 95–105.
- Shea T., Costa F., Krimer D., Hammer J.E. Accuracy of timescales retrieved from diffusion modeling in olivine: A 3D perspective. *American Mineralogist*, 2015, vol. 100, pp. 2026–2042.
- Portnyagin M., Mironov N., Botcharnikov R., Gurenko A., Almeev R.R., Luft C., Holtz F. Dehydration of melt inclusions in olivine and implications for the origin of silica-undersaturated island-arc melts. *Earth and Planetary Science Letters*, 2019, vol. 517, pp. 95–105.
- Arif J., Baker T. Gold paragenesis and chemistry at Batu Hijau, Indonesia: implications for gold-rich porphyry copper deposits. *Mineralium Deposita*, 2004, vol. 39, Iss. 5–6, pp. 523–535.
- Cooke D.R., Hollings P., Walshe J.L. Giant porphyry deposits: characteristics, distribution, and tectonic controls. *Economic Geology*, 2005, vol. 100, Iss. 5, pp. 801–818.
- Richards J.P. Giant ore deposits formed by optimal alignments and combinations of geological processes. *Nature Geoscience*, 2013, vol. 6, Iss. 13, pp. 911–916.
- Yuningsih E.T., Matsueda, H.R., Mega F. Epithermal gold-silver deposits in western Java, Indonesia: Gold-silver Selenide-Telluride mineralization. *Indonesian Journal on Geoscience*, 2014, vol. 1, Iss. 2, pp. 71–81.
- Ziaii M., Safari S., Timkin T., Voroshilov V., Yakich T. Identification of geochemical anomalies of the porphyry-Cu deposits using concentration gradient modelling: a case study, Jebel-Barez area, Iran. *Journal of Geochemical Exploration*, 2019, vol. 199, pp. 16–30.
- Kamenetsky V.S., Kamenetsky M.B. Magmatic fluids immiscible with silicate melts: examples from inclusions in phenocrysts and glasses, and implications for magma evolution and metal transport. *Geofluids*, 2010, vol. 10, pp. 293–311.

18. Zelenski M., Kamenetsky V.S., Mavrogenes J.A., Gurenko A.A., Danyushevsky L.V. Silicate-sulfide liquid immiscibility in modern arc basalt (Tolbachik volcano, Kamchatka). P. I. Occurrence and compositions of sulfide melts. *Chemical Geology*, 2017, vol. 478, pp. 102–111.
19. Kamenetsky V.S., Zelenski M., Gurenko A., Portnyagin M., Ehrig K., Kamenetsky M., Churikova T., Feig S. Reprint of silicate-sulfide liquid immiscibility in modern arc basalt (Tolbachik volcano, Kamchatka). P. II. Composition, liquids assemblage and fractionation of the silicate melt. *Chemical Geology*, 2017, vol. 472, pp. 313–345.
20. Zelenski M., Kamenetsky V.S., Mavrogenes J.A., Danyushevsky L.V., Matveev D., Gurenko A.A. Platinum-group elements and gold in sulfide melts from modern arc basalt (Tolbachik volcano, Kamchatka). *Lithos*, 2017, vol. 290, pp. 172–188.
21. Plank T., Langmuir C.H. The chemical composition of subducting sediment and its consequences for the crust and mantle. *Chemical Geology*, 1998, vol. 145, pp. 325–394.
22. Widiyantoro S., Van der Hilst R. Structure and evolution of lithospheric slab beneath the Sunda Arc, Indonesia. *Science*, 1996, vol. 271, pp. 1566–1570.
23. De Mets C., Gordon R.G., Argus D.F., Stein S. Current plate motions. *Geophysical Journal International*, 1990, vol. 101, pp. 425–478.
24. Tregoning P., Brunner F.K., Bock Y., Puntodewo S.S.O., McCaffrey R., Genrich J.F., Calais E., Rais J., Subarya C. First geodetic measurement of convergence across the Java Trench. *Geophysical Research Letters*, 1994, vol. 21, pp. 2135–2138.
25. Simandjuntak T.O., Barber A.J. Contrasting tectonic styles in the Neogene orogenic belts of Indonesia. *Tectonic Evolution of Southeast Asia. Geological Society Special Publication*, 1996, vol. 106, pp. 185–201.
26. Katili J.A. Volcanism and plate tectonics in the Indonesian island arcs. *Tectonophysics*, 1975, vol. 26, pp. 165–188.
27. Carlile J.C., Mitchell A.H.G. Magmatic arcs and associated gold and copper mineralization in Indonesia. *Journal of Geochemical Exploration*, 1994, vol. 50, pp. 91–142.
28. Metcalfe I. Pre-Cretaceous evolution of SE Asian terranes. *Tectonic Evolution of Southeast Asia. Geological Society Special Publication*, 1996, vol. 106, pp. 97–122.
29. Wheller G.E., Varne R. Genesis of dacitic magmatism at Batur volcano, Bali, Indonesia: implications for the origin of stratovolcano calderas. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 1986, vol. 28, pp. 363–378.
30. Le Bas M.J., Le Maotre R.W., Streckeisen A., Zanettin B. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkalisilica diagram. *Journal of Petrology*, 1986, vol. 27, pp. 745–750.
31. Sun S.S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. *Magmatism in the Oceanic Basins: Geol. Soc. Spec. Publ.*, 1989, vol. 42, pp. 313–345.

Поступила/Received: 03.06.2020.

#### Информация об авторах

**Якич Т.Ю.**, кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Савинова О.В.**, кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Рудмин М.А.**, кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC552.113

## PETROLOGICAL FEATURES OF MODERN ARC VOLCANISM ON THE EXAMPLE OF BATUR VOLCANO LAVAS (BALI ISLAND, INDONESIA)

**Tamara Yu. Yakich**<sup>1</sup>,  
cherkasovatu@tpu.ru

**Olesya V. Savinova**<sup>1</sup>,  
logvinenkoov@tpu.ru

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

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

**The relevance** of the modern volcanism study is to understand the complex processes of the magma differentiation, assimilation and mixing that recorded in the mineralogical, structural and petrochemical features of volcanic rock units. On the other hand, economically significant deposit of non-ferrous and noble metals is often associated with basic volcanism of increased alkalinity in modern island-arc systems.

**The main aim** of this work is to study and interpret the mineralogical and petrochemical features of the lavas from the active Batur volcano (Bali Island, Indonesia).

**Objects:** samples of lava from the 1964 Batur eruption.

**Methods.** The rock units of modern island arc lavas and the minerals found in them have been studied by optical and electron microscopy using energy dispersive spectroscopy analysis. The major elements of the rock units were obtained using silicate analysis, while trace element composition – using inductively coupled plasma mass spectrometry analysis. As a result of the conducted studies it was found that all samples of the lavas from Batur volcano have porphyry structure and contain phenocrysts of plagioclase (17...23 vol. %), olivine (3 vol. %) and pyroxene (2 vol. %) located in the fine-grained ground mass containing plagioclase, titanomagnetite, pyroxene and volcanic glass. The phenocrysts of plagioclase are characterized by a «sieve-textured domains» structure, with oriented melt inclusions (~0,05 mm) containing primary silicate and sulfide melts. The petrochemical parameters of the Batur lavas suggest that they correspond to high-alumina basalts ( $Al_2O_3 \geq 18,0$ ). The complex structure of zonal plagioclase phenocrysts is consistent with the rapid cooling of the initial melts, when the released plagioclase cannot come into equilibrium with the remaining liquid magma. Its bulk chemical composition corresponds to labrador-bytownite. Olivine reveals several variants for iron redistribution in its composition including zonal crystals with iron accumulation in the marginal parts of grains, specific «exclusions structures» and homogeneous olivine crystals with  $Mg\#(Fo) [ = Mg/(Fe^{2+}+Mg) * 100 \text{ \% atomic ratio} ]$  component ~66,0. The increased iron content and manganese oxide alloy ( $Mn^{2+}$ ) in olivine may indicate that the Batur lavas are derivatives from the olivine basalt with an alkaline bias. Presumably, during the period of intense volcanism Batur volcano eruption in 1964, the magma chamber was periodically enriched with olivine basalt at some regularity. Further, this melt rose to the upper part of the chamber, followed by fractionation of olivine and clinopyroxene during crystallization of plagioclase and their accumulation in the upper part of the magma chamber. During the period of the input of a new portion of the initial melt, the existing mixture had not come into equilibrium with the incoming portion of the melt, has erupted to the surface and formed the lavas of high-alumina basalt. The presence of covellite and chalcopyrite globules in melt inclusions in the phenocrysts of plagioclase may be the evidence of the existence of a highly fractionated sulfide melt at a deeper level.

**Key words:**

Modern island-arc volcanism, high-alumina basalts, plagioclase, olivine, melt inclusions, sulfide globules.

*The research was carried out within the frame of the TPU Competitiveness Enhancement Program.*

*The authors express thanks to Roman Yu. Gavrilov for assistance in analytical studies in determining the main oxides by silicate analysis and rare elements by the method of mass-spectrometry with inductively coupled plasma, to Lyubov A. Krasnoshchekova for aid in taking of pictures of thin sections, to Aleksey K. Mazurov for review.*

**Information about the authors**

**Tamara Yu. Yakich**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Olesya V. Savinova**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Maxim A. Rudmin**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 550.834

## ФАЗОЧАСТОТНОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

Кочегуров Александр Иванович<sup>1</sup>,  
kaicss@tpu.ru

Виктор Герингер<sup>2</sup>,  
geringer@dhw-ravensburg.de

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

<sup>2</sup> Баден-Вюртембергский объединенный государственный университет,  
Германия, DNBW-Равенсбург, Marienplatz, 2.

**Актуальность.** В настоящее время при поиске нефтяных и газовых месторождений большое внимание уделяется более активному вовлечению в разведочный процесс слабо исследованных территорий, а также доисследованию природных резервуаров в районах промышленного освоения месторождений. Для этих целей широко применяются методы сейсморазведки, в результате чего формируются огромные массивы данных, подлежащие последующей обработке и интерпретации. Одной из задач, решаемой на этапе обработки, является надежное обнаружение сейсмических сигналов, особенно важное значение эта задача имеет при прослеживании волн, так как от достоверности обнаружения зависит качество построения отражающих границ. Поэтому построение эффективных методов и алгоритмов обнаружения сигналов на основе анализа ФЧХ, обладающих более высокой степенью устойчивости к помехам, является весьма актуальной задачей.

**Цель:** на основе оптимальной и субоптимальной обработки ФЧХ сейсмических волн, получаемых при поиске нефтяных и газовых месторождений, построить методы обнаружения сигналов и исследовать их эффективность на моделях сейсмоимпульсов путем вычисления вероятностных характеристик ошибок обнаружения.

**Методы и средства исследования:** методы статистического анализа и синтеза алгоритмов, теория случайных процессов, дискретное преобразование Фурье, методы обработки и интерпретации сейсмических данных, математическое моделирование и вычислительный эксперимент.

**Результаты.** На основе метода максимального правдоподобия построена оптимальная процедура обнаружения сейсмических сигналов по их фазочастотным характеристикам. Получены аналитические выражения для вероятностей ошибок обнаружения. Показано, что оптимальное фазочастотное обнаружение обеспечивает результаты, близкие к результатам абсолютно оптимального метода обнаружения сигналов. Для практической реализации разработанного метода предложена субоптимальная обработка ФЧХ (равновесная обработка), не требующая информации о распределении энергии сигнала в частотной области. Проведены исследования помехоустойчивости метода обнаружения с равновесной обработкой, и получены оценки потерь в зависимости от числа использованных частотных компонент в спектре сигнала. Показано место применения разработанных методов обнаружения при решении задач прослеживания сейсмических волн.

### Ключевые слова:

Сейсмические волны, оптимальное фазочастотное обнаружение, отношение правдоподобия, равновесная обработка, прослеживание сейсмических волн

### Введение

Обнаружение отраженных сейсмических волн является одной из важнейших задач, решаемых при обработке и интерпретации данных, получаемых при поиске нефтяных и газовых месторождений [1, 2]. Особое место эта задача занимает при построении алгоритмов прослеживании сейсмических волн, так как процесс прослеживания волн в обязательном порядке включает обнаружение фиксированных волн и определение их временного положения [1].

В современных комплексах обработки сейсмической информации при прослеживании волн применяются алгоритмы, разработанные по схеме прослеживания энергетических аномалий сейсмических сигналов [3, 4], поэтому и обнаружение волн, как правило, осуществляется на основе сравнения с порогом суммарной мощности сигнала, выделяемого с помощью амплитудных критериев. При этом наиболее часто применяется корреляционный приемник или согласованная фильтрация [1, 2]. В случае исследования тонкослоистых сред для выделения сиг-

налов в зонах повышенной интерференции в настоящее время широко применяются методы деконволюции [5–8], в которых также в основном используются энергетические параметры сигнала, при этом фазовые спектры не вычисляются, их просто принимают в виде минимально фазовых или нуль-фазовых функций [9–13]. В то же время в сложных сейсмогеологических условиях, например, при обнаружении сигналов, когда отношение сигнала к шуму мало, или наблюдаются зоны интерференции волн, фазочастотные характеристики (ФЧХ) являются более устойчивыми по сравнению с энергетическими параметрами сигналов. Кроме того, в сложный закон изменения ФЧХ заложена информация, на основе которой удается выделять слабые сигналы и производить оценку их временного положения [14]. Также фазовые спектры дают возможность оценить поглощение геологических сред, характер напластования, акустические свойства и толщину слоев, что может служить дополнительными признаками при обнаружении сигналов.

К сожалению, до настоящего времени, использование ФЧХ отраженных волн для обнаружения сигналов не нашло широкого применения на практике, что связано прежде всего с особенностями и неоднозначностью вычисления ФЧХ сейсмических волн, а также недостаточной изученностью их взаимосвязи с конфигурацией границ и параметрами геологического разреза. В то же время существуют примеры весьма успешного и эффективного использования ФЧХ отраженных волн для определения временного положения сигналов при решении задач прослеживания в тонкослоистых средах [14, 15], что позволяет говорить о целесообразности применения ФЧХ для обнаружения фиксированных волн.

Таким образом, методы обнаружения, основанные на оптимальной обработке фазовых спектров сейсмических волн, могут оказаться весьма эффективным инструментом для уменьшения ошибок обнаружения при выделении слабых сигналов. Поэтому разработка, исследование и применение методов фазочастотного обнаружения сейсмических волн, в том числе в алгоритмах прослеживания, имеет важное значение и является весьма актуальной задачей.

#### Постановка задачи

Предположим, что наблюдается участок сейсмической трассы  $x(t)$ , который может содержать аддитивную смесь сигнала  $s(t)$  и помехи  $\xi(t)$  или только помеху  $\xi(t)$ . Примем:  $s(t) = S_d(T)$ , где  $S_d(T)$  – множество сигналов ограниченной длительности, основная энергия которых сосредоточена в полосе от 10 до 100 Гц. Однако, несмотря на относительно узкую полосу частот, данные сигналы относятся к классу широкополосных сигналов.  $\xi(t)$  – стационарная нормально распределенная помеха с корреляционной функцией  $\sigma_\xi^2 R_\xi(\tau)$ .

Задача состоит в том, чтобы построить процедуру обнаружения сигналов, когда оптимальной обработке подвергается только ФЧХ анализируемого участка сейсмотрассы.

#### Оптимальное фазочастотное обнаружение сейсмических сигналов

Пусть функции  $\xi(t)$ ,  $s(t)$  и  $x(t) = s(t) + \xi(t)$  на интервале времени  $T$  могут быть представлены в частотной области  $\Omega$  своими Фурье-образами. Тогда для построения оптимального фазового критерия обнаружения сигнала используем метод максимального правдоподобия на основе анализа ФЧХ. Для реализации данного метода сформируем отношение правдоподобия в виде [16]:

$$L(\Delta\varphi) = \frac{W_m(\Delta\varphi(\omega_1), \Delta\varphi(\omega_2), \dots, \Delta\varphi(\omega_m) | H_1)}{W_m(\varphi_\xi(\omega_1), \varphi_\xi(\omega_2), \dots, \varphi_\xi(\omega_m) | H_0)}, \quad (1)$$

где  $W_m(\Delta\varphi(\omega_1), \Delta\varphi(\omega_2), \dots, \Delta\varphi(\omega_m) | H_1)$  –  $m$ -мерная плотность вероятности отклонения ФЧХ смеси от ФЧХ сигнала в предположении, что верна гипотеза  $H_0$  (сигнал есть);  $W_m(\varphi_\xi(\omega_1), \Delta\varphi(\omega_2), \dots, \Delta\varphi(\omega_m) | H_0)$  –  $m$ -мерная плотность вероятности ФЧХ помехи в предположении, что верна гипотеза  $H_0$  (сигнала нет);

$\varphi_x(\omega)$  – ФЧХ сигнала;  $\varphi_\xi(\omega)$  – ФЧХ помехи;  $\varphi(\omega_k)$  – ФЧХ смеси сигнала с помехой;  $\Delta\varphi(\omega) = \varphi_x(\omega) - \varphi_\xi(\omega)$  – отклонение ФЧХ смеси от ФЧХ сигнала;  $m = \frac{\Omega}{\Delta\omega}$  –

число спектральных компонент;  $\Delta\omega$  – шаг дискретизации по частоте.

Теперь, если принять, что  $|\varphi_x(\omega)| \leq \pi$  и  $|\varphi_\xi(\omega)| \leq \pi$ , одномерная плотность вероятности значений ФЧХ помехи равна  $W(\varphi_\xi(\omega_k)) = \frac{1}{2\pi}$ , а  $\varphi_x(\omega_k)$  совпадает с угловой координатой вектора  $(\rho \cos \varphi_x(\omega_k), \rho \sin \varphi_x(\omega_k))$ . В этом случае отношение правдоподобия (1) для независимых значений  $\Delta\varphi(\omega_k)$  имеет вид [2]:

$$L(\Delta\varphi) = \prod_{k=1}^m \left\{ \exp\left(-\frac{\delta^2(\omega_k)}{2}\right) + \sqrt{2\pi} \delta(\omega_k) \times \cos(\Delta\varphi(\omega_k)) \Phi[\delta(\omega_k) \cos(\Delta\varphi(\omega_k))] \times \exp\left(-\frac{\delta^2(\omega_k)}{2} \sin^2(\Delta\varphi(\omega_k))\right) \right\}, \quad (2)$$

где  $\Phi$  – преобразование Лапласа;  $k$  – номер частотной компоненты,  $k = 1, m$ ;  $\delta^2(\omega_k)$  – отношение энергии сигнала к дисперсии помехи на частоте  $\omega_k$ , которое определяется как:

$$\delta^2(\omega_k) = \frac{A_s^2(\omega_k)}{\sigma^2(\omega_k)},$$

где  $A_s(\omega_k)$  – величина АЧХ сигнала на частоте  $\omega_k$ ;  $\sigma^2(\omega_k)$  – дисперсия, пропорциональная спектральной плотности помехи на частоте  $\omega_k$ .

Тогда по критерию максимального правдоподобия принимается решение о том, что «сигнал есть», если

$$L(\Delta\varphi) > C,$$

и принимается решение о том, что «сигнала нет», если

$$L(\Delta\varphi) < C.$$

Прологарифмируем выражение (2) и получим:

$$\ln L(\Delta\varphi) = \sum_{k=1}^m \ln \left\{ \exp\left(-\frac{\delta^2(\omega_k)}{2}\right) + \sqrt{2\pi} \delta(\omega_k) \times \cos(\Delta\varphi(\omega_k)) \Phi[\delta(\omega_k) \cos(\Delta\varphi(\omega_k))] \times \exp\left(-\frac{\delta^2(\omega_k)}{2} \sin^2(\Delta\varphi(\omega_k))\right) \right\}. \quad (3)$$

Зная монотонный характер логарифмической функции, можно утверждать: принимается решение «сигнал есть», если  $\ln L(\Delta\varphi) > \ln C$ , и принимается решение о том, что «сигнала нет», если  $\ln L(\Delta\varphi) < \ln C$ .

Далее последовательно рассмотрим два частных случая: сигнал сильный и сигнал слабый. При сильном сигнале ( $\delta(\omega_k) > 1$ ), величины  $\Delta\varphi(\omega_k)$  подчиняются нормальному закону распределения:

$$W(\Delta\varphi(\omega_k)) = \frac{1}{2\pi\sigma_{\varphi_x}(\omega_k)} \exp\left(-\frac{\Delta\varphi^2(\omega_k)}{2\sigma_{\varphi_x}^2(\omega_k)}\right).$$

В этом случае, если принять величину порога  $C=1$  (критерий идеального наблюдателя) [16, 17], то, переходя к выборке с объемом  $m = \Omega/\Delta\omega$ , нетрудно показать, что решающее правило (3) имеет вид

$$\sum_{k=1}^m \frac{\Delta\varphi^2(\omega_k)}{2\sigma_{\varphi_x}^2(\omega_k)} \leq \sum_{k=1}^m \ln \frac{\sqrt{2\pi}}{\sigma_{\varphi_x}(\omega_k)}. \quad (4)$$

В случае слабого сигнала ( $\delta(\omega_k) \leq 1$ )  $m$ -мерная плотность вероятности отклонения ФЧХ смеси от ФЧХ сигнала без учета членов с более высокими степенями, чем  $\delta^2(\omega_k)$ , имеет вид:

$$W_m(\Delta\varphi(\omega_k)) = \frac{1}{2\pi} \left[ 1 + \delta(\omega_k) \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cos(\Delta\varphi(\omega_k)) + \frac{\delta^2(\omega_k)}{2} \cos(2\Delta\varphi(\omega_k)) \right].$$

При этом дисперсия флуктуаций значений ФЧХ составляет:

$$\delta^2(\omega_k) = \frac{\pi^2}{3} - \sqrt{2\pi}\delta(\omega_k).$$

Тогда логарифм отношения правдоподобия (3) для слабого сигнала запишется:

$$\ln L(\Delta\varphi) = -\sum_{k=1}^m \frac{\pi}{8} \delta^2(\omega_k) + \sum_{k=1}^m \sqrt{\frac{\pi}{2}} \delta(\omega_k) \cos(\Delta\varphi(\omega_k)).$$

Принимается решение «сигнал есть», если

$$-\sum_{k=1}^m \frac{\pi}{8} \delta^2(\omega_k) + \sum_{k=1}^m \sqrt{\frac{\pi}{2}} \delta(\omega_k) \cos(\Delta\varphi(\omega_k)) \geq C.$$

При  $C=1$  данное выражение переписывается в виде

$$\sum_{k=1}^m \sqrt{\frac{\pi}{2}} \delta(\omega_k) \cos(\Delta\varphi(\omega_k)) \geq \sum_{k=1}^m \frac{\pi}{8} \delta^2(\omega_k). \quad (5)$$

На первый взгляд отличия между выражениями (4) и (5), определяющими фазочастотное обнаружение сильного и слабого сигнала, довольно существенны, однако если учесть, что при сильном сигнале флуктуации ФЧХ незначительны

$$\cos(\Delta\varphi(\omega_k)) \approx 1 - \frac{1}{2} \Delta\varphi^2(\omega_k).$$

В то же время  $\delta^2(\omega_k) = \frac{1}{\sigma_{\varphi_x}^2(\omega_k)}$ . Тогда нетрудно

увидеть, что алгоритм фазочастотного обнаружения слабых сигналов будет оптимальным и для сильных сигналов, но не наоборот.

Таким образом, выражение (5) в принятом смысле определяет структуру алгоритма оптимального фазочастотного обнаружения сейсмических сигналов с

известными параметрами. Для его реализации необходимо:

- 1) вычислить косинусы разности между значениями ФЧХ смеси и ФЧХ сигнала для всех  $\omega \in \Omega$ ;
- 2) просуммировать все полученные величины косинусов, причем каждую с весом, пропорциональным отношению сигнал/шум на данной частоте;
- 3) сравнить полученное значение  $L(\Delta\varphi)$  с порогом, в общем случае зависящим от отношения энергии сигнала к спектральной плотности шума, формы АЧХ сигнала и спектральной плотности шума.

Рассмотрим теперь ошибки, свойственные оптимальному фазочастотному обнаружению слабого сигнала. Для этого найдем вероятности ложного обнаружения  $P(H_1|0)$  и вероятности пропуска сигнала  $P(H_0|C)$ . Принимая, что размер выборки достаточно большой ( $m \gg 1$ ), воспользуемся асимптотической нормальностью левой части выражения (5) и получим:

$$P(H_1|0) = 1 - \Phi\left(\frac{\sqrt{\pi}}{4} \sum_{k=1}^m \delta^2(\omega_k)\right);$$

$$P(H_0|C) = 1 - \Phi\left(\frac{\sqrt{\pi}}{4} \sum_{k=1}^m \delta^2(\omega_k)\right).$$

Тогда величина полной вероятности ошибки составит:

$$P_{\text{ош}} = 0,5 [P(H_1|0) + P(H_0|C)] = 1 - \Phi\left(\frac{\sqrt{\pi}}{4} \sum_{k=1}^m \delta^2(\omega_k)\right). \quad (6)$$

Для сравнения с абсолютно-оптимальным методом обнаружения (т. е. когда оптимально обрабатывается и АЧХ и ФЧХ смеси) приведем полную вероятность ошибки корреляционного приемника [18]:

$$P_{\text{ош}} = 1 - \Phi\left(\frac{\sqrt{\sum_{k=1}^m \delta^2(\omega_k)}}{2}\right). \quad (7)$$

Анализ выражений (6) и (7) показывает, что оптимальное фазочастотное обнаружение дает несколько худшие результаты, чем абсолютно-оптимальное, однако полученная разница невелика. Таким образом, основная информация о слабом сигнале заложена в его ФЧХ.

#### Фазочастотное обнаружение с равновесной обработкой

Реальные условия возбуждения, распространения и регистрации сейсмических сигналов приводят, как правило, к необходимости решения задачи обнаружения в условиях априорной неопределенности. Эта неопределенность обычно выражается в незнании формы сигнала, а следовательно и распределение энергии сигнала по частоте становится неизвестным. Поэтому примем, что все значения ФЧХ в выражении (5) суммируются с одинаковыми весами. При равновесной обработке с порогом сравнивается величина

$$\ln L_1(\Delta\varphi) = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \sum_{k=1}^{m_0} \cos(\Delta\varphi(\omega_k)), \quad (8)$$

где  $m_0 < m$ .

Для оценки качества обнаружения в соответствии с (8) сравним величины суммарного отношения сигнал/помеха  $q_{\Sigma}'$  и  $q_{\Sigma}''$ , рассчитанные соответственно для (5) и (8).

Из (5) следует, что при оптимальном фазочастотном обнаружении

$$q_{\Sigma}' = \frac{\sqrt{\pi}}{4} \sqrt{\sum_{k=1}^m \delta^2(\omega_k)}.$$

Для оценки  $q_{\Sigma}''$  проведем анализ выражения (8) и получим:

$$q_{\Sigma}'' = \frac{\sqrt{\pi}}{4\sqrt{m_0}} \sum_{k=1}^{m_0} \delta(\omega_k).$$

Тогда потери за счет равновесности обработки могут быть охарактеризованы следующим параметром [19]:

$$\eta = \left( \frac{q_{\Sigma}'}{q_{\Sigma}''} \right)^2 - 1. \quad (9)$$

В [19] предложена методика оценки потерь  $\eta$  равновесной обработки многочастотного сигнала при абсолютно-оптимальном (корреляционном) алгоритме обнаружения. Используем эту методику для оценки потерь при фазочастотном обнаружении. Будем считать, что частотный диапазон анализа  $\Omega$  задан так, что  $\delta(\omega_{k+1}) \leq \delta(\omega_k)$ ,  $k = 1, 2, \dots, m-1$ .

Тогда на основании принятой методики нетрудно показать, что максимальные потери в соответствии с выражением (9) составляют:

$$\eta_{\max} = \sum_{k=1}^m (\sqrt{k} - \sqrt{k-1})^2 - 1. \quad (10)$$

Тогда максимальная величина полной вероятности ошибки при равновесной обработке с учетом (10) определяется выражением:

$$P_{\text{ош}} = 1 - \Phi \left( \frac{\sqrt{\pi}}{4} \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^m \delta^2(\omega_k)}{\sum_{k=1}^m (\sqrt{k} - \sqrt{k-1})^2}} \right). \quad (11)$$

Из сравнения (7) и (11) следует, что с ростом  $m$  при равновесной обработке ошибки обнаружения увеличиваются. Так, в предположении, что  $q_{\Sigma}(m) = \text{const}$  при  $m = 2$ ,  $\eta_{\max} = 0,17$ ,  $m = 3$ ,  $\eta_{\max} = 0,27$ ,  $m = 3$ ,  $\eta_{\max} = 0,58$ ,  $m = 20$ ,  $\eta_{\max} = 0,754$ . Однако, несмотря на это, даже при  $m = 20$  надежность обнаружения достаточно высока.

Таким образом, применение равновесного суммирования при реализации алгоритма фазочастотного обнаружения сейсмических сигналов не приводит к существенным потерям. При этом не нужно знать

распределение отношения сигнал/помеха по частотам, а достаточно оценить только суммарное отношение сигнал/помеха на сейсмической трассе. Для практического использования предлагаемого метода можно выбрать одну из методик расчета суммарного отношения сигнал/помеха, применяемых в ряде известных процедур обработки сейсмических данных [20] или, например, методику расчета, предложенную при детектировании изображений в [21].

#### Выбор полосы частот при фазочастотном обнаружении сейсмических сигналов

Принципиальное отличие алгоритма фазочастотного обнаружения широкополосных сигналов от алгоритма фазового обнаружения узкополосных сигналов заключается в том, что здесь результаты обнаружения существенно зависят от ширины спектра  $\Omega$  (числа гармоник  $m$ ), формы АЧХ сигнала и формы спектральной плотности  $N(\omega)$ , а следовательно, появляется дополнительная возможность повышения надежности обнаружения путем рационального выбора полосы частот  $\Omega$ .

Будем считать, что помеха имеет равномерную спектральную плотность в полосе частот  $\Omega$  (белый шум), т. е.  $\sigma^2(\omega) = \sigma^2 = \frac{N_0}{T}$ . Тогда, подставляя  $\sigma^2$  в (6), получим известное выражение полной вероятности ошибки при фазовом обнаружении слабого узкополосного сигнала [16]:

$$P_{\text{ош}} = 1 - \Phi \left( \sqrt{\frac{\pi}{8}} \cdot \frac{\varepsilon_c}{N_0} \right), \quad (12)$$

где  $\varepsilon_c$  – энергия сигнала;  $N_0$  – спектральная плотность белого шума.

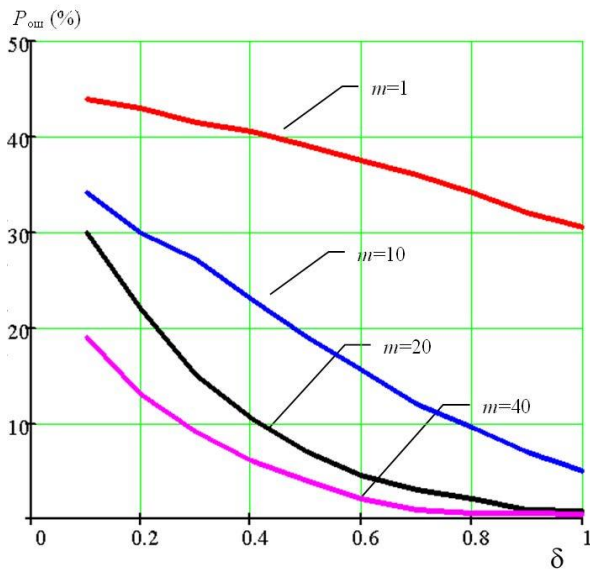
Рассмотрим, как изменяется величина полной вероятности ошибки в зависимости от числа учитываемых гармоник  $m$  в спектре сигнала, формы АЧХ сигнала и вида  $N(\omega)$ . Сначала примем, что сигнал имеет равномерную АЧХ в полосе  $\Omega$  ( $A_s(\omega) = A$  для  $\omega \in \Omega$ ), помеха – белый шум. Тогда (12) запишется

$$P_{\text{ош}} = 1 - \Phi \left( \sqrt{\frac{\pi}{8}} \cdot \frac{A_s^2}{N_0 / m} \right). \quad (13)$$

Считая, что энергия сигнала не меняется, будем увеличивать  $m$  (или, что адекватно, расширять  $\Omega$ ). В этом случае ширина спектра помехи тоже растет и, следовательно, спектральная плотность  $N_0/m$  в выражении (13) уменьшается.

На рис. 1 показаны кривые полной вероятности ошибки в зависимости от отношения сигнал/помеха при различных  $m$ . Из рисунка видно, что расширение полосы частот позволяет существенно понизить ошибки обнаружения, а следовательно, дает возможность выделить слабые сигналы с высокой достоверностью. При этом энергия сигнала не мала, она просто распределена по частотной области так, что в каждой точке этой области мала её мощность.

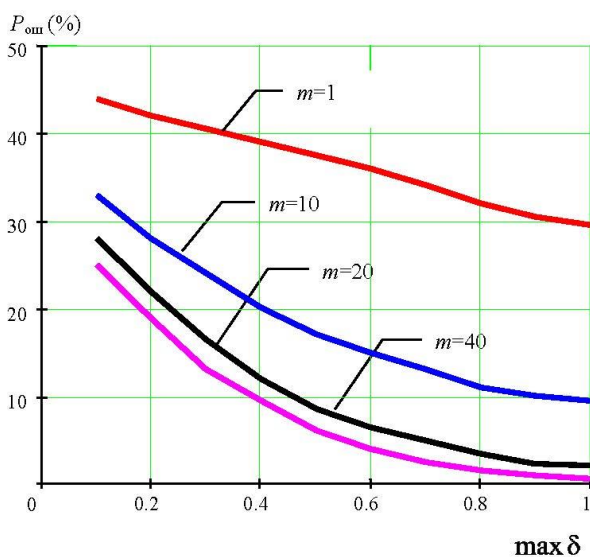




**Рис. 1.** Вероятность ошибок при обнаружении сигналов с равномерной АЧХ по оценке их ФЧХ для различных  $m$

**Fig. 1.** Probability of errors when detecting signals with uniform frequency response according to their phase response for various  $m$

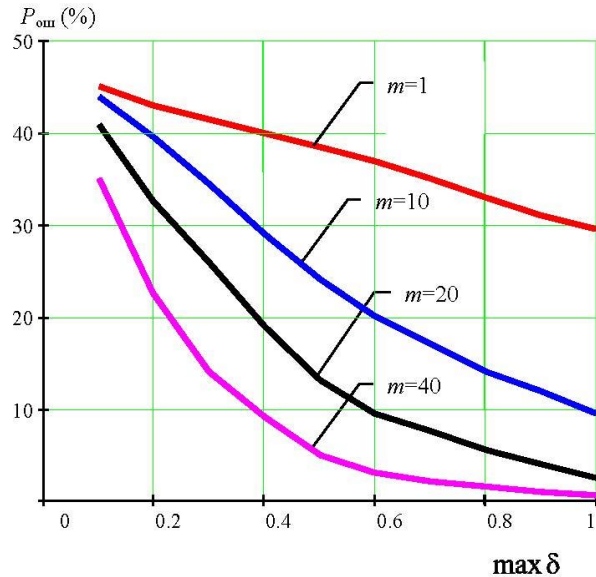
Рассмотрим влияние формы АЧХ сигнала на величину  $P_{\text{ош}}$  на примере импульса с колокольной огибающей. На рис. 2 приведены  $P_{\text{ош}}$  для этого случая. Здесь так же, как и при равномерной АЧХ, расширение  $\Omega$  приводит к уменьшению ошибок обнаружения, однако разница, например, между  $m=40$  и  $m=20$  не такая существенная, как на рис. 1. Это связано с тем, что большая часть энергии сигнала сосредоточена в более узкой области спектра. В то же время использование одной ( $m=1$ ), даже самой информативной, гармоники не обеспечивает высокой надежности обнаружения.



**Рис. 2.** Вероятность ошибок при обнаружении импульса с колокольной огибающей для различных  $m$

**Fig. 2.** Probability of errors in detecting pulse with a bell envelope for various  $m$

На рис. 3 показаны кривые  $P_{\text{ош}}$  при обнаружении сигнала с равномерной АЧХ на фоне помехи с корреляционной функцией:  $R_{\xi}(\tau) = \sigma_{\xi}^2 e^{-\alpha|\tau|} \cos(\omega_0 \tau)$ . Из рис. 3 следует, что при  $\max \delta < 0,3$  расширение  $\Omega$  менее эффективно, чем при белом шуме, т. к. с увеличением  $m$  увеличивается и спектральная плотность помехи.



**Рис. 3.** Вероятность ошибок при обнаружении сигналов с равномерной АЧХ для различных  $m$ , когда  $R_{\xi}(\tau) = \sigma_{\xi}^2 e^{-\alpha|\tau|} \cos(\omega_0 \tau)$

**Fig. 3.** Probability of errors when detecting signals with uniform frequency response for various  $m$ , when  $R_{\xi}(\tau) = \sigma_{\xi}^2 e^{-\alpha|\tau|} \cos(\omega_0 \tau)$

Таким образом, проведенный анализ показал, что выбор частотной полосы анализа оказывает существенное влияние на результаты фазочастотного обнаружения.

### Заключение

На основании вышеизложенного можно говорить о том, что обнаружение сейсмических сигналов на основе оптимальной обработки их ФЧХ позволяет получать результаты, близкие к результатам абсолютно-оптимального метода обнаружения (корреляционный приемник), а в случае слабого сигнала ничем не уступающие корреляционному приему. Однако для реализации оптимального фазочастотного метода обнаружения сейсмических сигналов, как уже отмечалось, необходимо знать распределение энергии сигнала в анализируемом диапазоне частот, что при решении практических задач весьма затруднительно. Поэтому в статье предлагается и исследуется метод фазочастотного обнаружения с равновесной обработкой, который обеспечивает надежно обнаружение слабых сигналов и менее критичен к наличию априорной информации.

В то же время при фазочастотном обнаружении с равновесной обработкой особо важное значение имеет выбор частотной полосы анализа. Так, если при оптимальном фазочастотном обнаружении учет гармоник с довольно низким отношением сигнал/помеха

не влияет в целом на результаты обнаружения, то при равновесной обработке использование этих гармоник в соответствии с (11) снижает качество обнаружения и тем сильнее, чем больше таких гармоник в спектре обнаруживаемого сигнала. Следовательно, равновесная обработка, требующая меньше априорной ин-

формации о свойствах сигналов и помех, накладывает более жесткие ограничения на выбор параметров алгоритма. Чтобы обойти эти трудности, необходимо более детально проводить качественный анализ природы сейсмических волн, регистрируемых на данной площади.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Боганик Г.Н., Гурвич И.И. Сейсморазведка. – Тверь: АИС, 2006. – 744 с.
2. Левянт В.Б., Квасов И.Е., Петров И.Б. Обоснование прямого обнаружения и картирования трещиноватых пластов на основе использования продольных рассеянных волн // Технологии сейсморазведки. – 2017. – № 1. – С. 72–89.
3. Денисов М.С. Алгоритм устойчивой адаптивной сигнатурной деконволюции // Технологии сейсморазведки. – 2017. – № 1. – С. 48–55.
4. Sparse blind deconvolution of seismic data via spectral projected-gradient / Naveed Iqbal, Entao Liu, J.H. McClellan, Abdullatif A. Al-Shuhail // IEEE Access. – 2019. – P. 1–12. URL: <https://arxiv.org/abs/1611.03754> (дата обращения 05.03.2020).
5. Сильвия М.Т., Робинсон Э.А. Обратная фильтрация геофизических временных рядов при разведке на нефть и газ. – М.: Недра, 1983. – 382 с.
6. Mohamed Mhmod, Feng Xuan, Xu Cong. Parameters effects on spiking deconvolution of land seismic data // Global Geology. – 2015. – V. 18 (4). – P. 226–231.
7. Романов В.В. Возможности повышения разрешенности сейсмограмм метода преломленных волн (МПВ) // Технологии сейсморазведки. – 2013. – № 4. – С. 67–73.
8. Станкевич Л.С. Обработка сейсмических разрезов методом динамического сжатия // Геофизика, геофизическое приборостроение. – 2015. – № 1 (21). – С. 78–85.
9. Митрофанов Г.М. Гомоморфная фильтрация и слепая деконволюция // Технологии сейсморазведки. – 2015. – № 1. – С. 46–56.
10. Egbai J.C., Atakpo E., Aigbogun C.O. Predictive deconvolution in seismic data processing in Atala prospect of rivers State, Nigeria // Advances in Applied Science Research. – 2012. – V. 3 (1). – P. 520–529.
11. Lindberg D.V., More H. Blind categorical deconvolution in two-level hidden Markov models // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2014. – V. 52. – P. 7435–7447.
12. Idan Ram, Israel Cohen. Multichannel deconvolution of seismic signals using statistical MCMC methods // IEEE Transactions on signal processing. – 2010. – V. 58. – № 5. – P. 2757–2770.
13. Kazemi N., Bongajum E., Sacchi M. Surface-consistent sparse multichannel blind deconvolution of seismic signals // IEEE Transactions on geoscience and remote sensing. – 2016. – V. 54. – P. 3200–3207.
14. Кочегуров А.И., Иванченков В.П., Орлов О.В. Прогноз геологического разреза на основе детальной обработки сейсмических материалов в программно-алгоритмическом комплексе «Геосейф» // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 6. – С. 134–144.
15. Phase/frequency deconvolution of seismic signals / A.I. Kochegurov, E.A. Kochegurova, A.E. Kozlov, A.S. Mongolin // ISSCS 2019 - International Symposium on Signals, Circuits and Systems, Proceedings. – Iasi, Romania, 2019. – New York: IEEE, 2019. – P. 1–4.
16. Пестряков В.Б. Фазовые радиотехнические системы. – М.: Сов. Радио, 1968. – 468 с.
17. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. – М.: Сов. Радио, 1974. – Кн. 1. – 552 с.
18. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. – М.: Сов. Радио, 1975. – Кн. 2. – 392 с.
19. Поиск, обнаружение и измерение параметров сигналов в радионавигационных системах / под ред. Ю.М. Казаринова. – М.: Сов. Радио, 1975. – 296 с.
20. Кац С.А., Ершова Т.Н., Шубик Б.М. Методика и результаты определения отношения сигнал/шум при регистрации сейсмического поля // Прикладная геофизика. – 1973. – Вып. 72. – С. 59–70.
21. Ein stochastischer Algorithmus zur Bildgenerierung durch einen zweidimensionalen Markoff-Erneuerungsprozess / D. Dubinin, V. Geringer, A. Kochegurov, K. Reif // at- Automatisierungstechnik. – 2014. – V. 62. – № 1. – P. 57–64.

Поступила: 09.04.2020 г.

#### Информация об авторах

**Кочегуров А.И.**, кандидат технических наук, доцент отделения информационных технологий Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Герингер В.**, кандидат технических наук, заведующий лабораторией автомобильной электроники Баден-Вюртембергского объединенного государственного университета.

UDC 550.834

## PHASE-FREQUENCY DETECTION OF SEISMIC SIGNALS

Alexander I. Kochegurov<sup>1</sup>,  
kaicc@tpu.ru

Viktor Geringer<sup>2</sup>,  
geringer@dhbw-ravensburg.de

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

<sup>2</sup> Baden-Wuerttemberg Cooperative State University,  
2, Marienplatz, DHBW-Ravensburg, Germany.

**Relevance.** Currently, in the search for oil and gas fields, much attention is paid to more active involvement of poorly explored territories in exploration, as well as to the study of natural reservoirs in areas of industrial development of deposits. For these purposes, seismic methods are widely used, as a result of which huge data arrays are formed, which are subject to subsequent processing and interpretation. One of the tasks to be solved at the processing stage is reliable detection of seismic signals, this task is especially important when tracking waves, since the quality of construction of reflecting boundaries depends on the reliability of detection. Therefore, the construction of effective methods and algorithms for detecting signals based on the analysis of the phase response, with a higher degree of resistance to interference, is a very urgent task.

**The aim** of the research is to construct methods for detecting signals based on the optimal and suboptimal processing of the phase-frequency characteristic of seismic waves obtained when searching for oil and gas fields and to study these methods effectiveness on models of seismic pulses by calculating the probability characteristics of detection errors.

**Methods and means of research:** methods of statistical analysis and synthesis of algorithms, theory of random processes, discrete Fourier transform, methods of processing and interpretation of seismic data, mathematical modeling and computational experiment.

**Results.** Based on the maximum likelihood method, an optimal procedure for detecting seismic signals by their phase-frequency characteristics is constructed. Analytical expressions are obtained for the probabilities of detection errors. It is shown that optimal phase-frequency detection provides results close to the results of the absolutely optimal signal detection method. For practical implementation of the developed method, suboptimal processing of the phase response (equilibrium processing) is proposed, which does not require information on distribution of signal energy in the frequency domain. The noise immunity of the detection method with equilibrium processing was studied and estimates of losses were obtained depending on the number of used frequency components in the signal spectrum. The place of application of the developed detection methods for solving problems of tracking seismic waves is shown.

**Key words:**

Seismic waves, optimal phase-frequency detection, likelihood ratio, equilibrium processing, seismic wave tracking.

## REFERENCES

1. Boganik G.N., Gurvich I.I. *Seysmorazvedka* [Seismic exploration]. Tver, AIS Publ., 2006. 744 p.
2. Leviant V.B., Kvasov I.E., Petrov I.B. Substantiation for the direct detection and mapping of fractured formations based on using scattered compressional waves. *Technologies of seismic exploration*, 2017, no. 1, pp. 72–89. In Rus.
3. Denisov M.S. Stable adaptive signature deconvolution. *Technologies of seismic exploration*, 2017, no. 1, pp. 48–55. In Rus.
4. Naveed Iqbal, Entao Liu, McClellan J.H., Abdullatif A. Al-Shuhail. Sparse blind deconvolution of seismic data via spectral projected-gradient. *IEEE Access*, 2019, pp. 1–12. Available at: <https://arxiv.org/abs/1611.03754> (accessed 5 March 2020).
5. Silvia M.T., Robinson E.A. *Obratnaya filtratsiya geofizicheskikh bremennykh ryadov pri razvedke na nefi i gaz* [The return filtration of geophysical temporary ranks at investigation on oil and gas]. Moscow, Nedra Publ., 1983. 382 p.
6. Mohamed Mhmod, Feng Xuan, Xu Cong. Parameters effects on spiking deconvolution of land seismic data. *Global Geology*, 2015, vol. 18 (4), pp. 226–231.
7. Romanov V.V. Possibilities of increase in resolution of seismographic records of a method of the refracted waves (MPV). *Technologies of seismic exploration*, 2013, no. 4, pp. 67–73. In Rus.
8. Stankevich L.S. Obrabotka seysmicheskikh razrezov metodom dinameskogo szhatiya [Processing seismic cuts by the method of dynamic compression]. *Geofizika, geofizicheskoe priborostroenie*, 2015, no. 1 (21), pp. 78–85.
9. Mitrofanov G.M. Homomorphic filtering and deconvolution. *Technologies of seismic exploration*, 2015, no. 1, pp. 46–56. In Rus.
10. Egbai J.C., Atakpo E., Aigbogun C.O. Predictive deconvolution in seismic data processing in Atala prospect of rivers State, Nigeria. *Advances in Applied Science Research*, 2012, vol. 3 (1), pp. 520–529.
11. Lindberg D.V., More H. Blind categorical deconvolution in two-level hidden Markov models. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, vol. 52, pp. 7435–7447.
12. Idan Ram, Israel Cohen. Multichannel deconvolution of seismic signals using statistical MCMC methods. *IEEE Transactions on signal processing*, 2010, vol. 58, no. 5, pp. 2757–2770.
13. Kazemi N., Bongajum E., Sacchi M. Surface-consistent sparse multichannel blind deconvolution of seismic signals. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 2016, vol. 54, pp. 3200–3207.
14. Kochegurov A.I., Ivanchenkov V.P., Orlov O.V. Forecast of geological profile based on detailed processing materials in the software algorithmic complex «Geoseif». *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 6, pp. 134–144. In Rus.
15. Kochegurov A.I., Kochegurova E.A., Kozlov A.E., Mongolin A.S. Phase/frequency deconvolution of seismic signals. *ISSCS 2019 – International Symposium on Signals, Circuits and Systems*. Proceedings. Iasi, Romania, 2019. New York, IEEE, 2019. pp. 1–4.
16. Pestryakov V.B. *Fazovye radiotekhnicheskie sistemy* [Phase radio engineering systems]. Moscow, Sov. Radio Publ., 1968. 468 p.
17. Levin B.R. *Teoreticheskie osnovy statisticheskoy radiotekhniki* [Theoretical foundations of statistical radio engineering]. Moscow, Sov. Radio Publ., 1974. B. 1, 552 p.

18. Levin B.R. *Teoreticheskie osnovy statisticheskoy radiotekhniki* [Theoretical foundations of statistical radio engineering]. Moscow, Sov. Radio Publ., 1975. B. 2, 392 p.
19. *Poisk, obnaruzhenie i izmerenie parametrov signalov v radionavigatsionnykh sistemakh* [Search, detection and measurement of signal parameters in radio navigation systems]. Ed. by Yu.M. Kazarinova. Moscow, Sov. Radio Publ., 1975. 296 p.
20. Kats S.A., Ershova T.N., Shubik B.M. Metodika i rezultaty opredeleniya otnosheniya signal/shum pri registratsii seismicheskogo polya [Methodology and results of determining the signal-to-noise ratio during registration of a seismic field]. *Prikladnaya geofizika*, 1973, Iss. 72, pp. 59–70.
21. Dubinin D., Geringer V., Kochegurov A., Reif K. A stochastic algorithm for generating images by a two-dimensional Semi-Markov Model. *at- Automatisierungstechnik*, 2014, vol. 62, no. 1, pp. 57–64. In Germ.

*Received: 9 April 2020.*

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

**Alexander I. Kochegurov**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Viktor Geringer**, Cand. Sc., Head of the Laboratory of Automotive Electronics Baden-Wuerttemberg Cooperative State University.

УДК 536.468

## ОБОСНОВАНИЕ РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЙ СЖИГАНИЯ ВОДОУГОЛЬНЫХ ТОПЛИВ С ДОБАВКАМИ БИОМАССЫ

Мальшев Дмитрий Юрьевич<sup>1</sup>,  
dmitry.mlv@gmail.com

Сыродой Семен Владимирович<sup>1</sup>,  
ssyrodoy@yandex.ru

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

Одной из наиболее актуальных проблем современности является экологическая безопасность. Загрязнение атмосферы Земли в последние десятилетия обусловлено в значительной степени работой тепловых электрических станций, сжигающих уголь, на территориях наиболее развитых государств (США, Китай, Индия и др.). Использование нового класса топлива – био-водоугольного – может позволить существенно снизить выбросы антропогенных газов, образующихся при сжигании угля в топках паровых и водогрейных котлов, в атмосферу Земли, расширить сырьевую базу современных тепловых электрических станций и повысить в целом ресурсоэффективность угольной теплоэнергетики.

**Цель:** исследование влияния концентрации древесной биомассы в жидких композиционных топливах на интегральные характеристики процесса зажигания капель био-водоугольных топлив в условиях высокотемпературного нагрева.

**Объект:** водоугольная суспензия на основе угля марки Т, воды и еловой хвои. Экспериментальные исследования проведены при следующих массовых концентрациях угля и биомассы: 50/0 %, 45/5 %, 40/10 %, 35/15 %, соответственно (50 % – вода).

**Метод:** экспериментальное определение с использованием высокоскоростной видеокамеры Photron FASTCAM SA4 временных характеристик процессов зажигания капель био-водоугольных суспензий в условиях, соответствующих по интенсивности нагрева камерам сгорания паровых и водогрейных котлов; регистрация температуры среды с использованием хромель-алюмелевых термопар.

**Результаты.** Установлено влияние массовой концентрации лесного горючего материала на времена задержки зажигания ( $t_{ign}$ ) водоугольных топлив. Показано, что при содержании в топливной композиции 15 % биомассы времена задержки зажигания уменьшаются более чем в три раза по сравнению с водоугольным топливом без добавления биомассы при относительно низких температурах топочной среды. Результаты выполненных экспериментальных исследований также являются базой для развития моделей горения жидких композиционных топлив.

### Ключевые слова:

Био-водоугольное топливо, биомасса, лесной горючий материал, зажигание, время задержки зажигания, эксперимент, энергоэффективность.

### Введение

С промышленным развитием растет потребление электрической и тепловой энергии, основным источником которой являются ископаемые ресурсы [1–3]. Наибольшая доля приходится на уголь (при его сжигании вырабатывается около 38 % всей электрической энергии в мире [4]). Но в то же время негативное воздействие на окружающую среду антропогенных и парниковых газов (оксидов серы ( $SO_x$ ), азота ( $NO_x$ ) и углекислого газа ( $CO_2$ )) [5], образующихся при сжигании углей, создают предпосылки для поиска новых, менее загрязняющих атмосферу Земли топлив для тепловых электростанций. Примером такого топлива является смесь угля и биомассы. Последняя имеет низкое содержание серы и азота [6]. По результатам многочисленных исследований (например, [7–9]) установлено, что при совместном сжигании биомассы с углем существенно снижаются выбросы  $SO_x$  и  $NO_x$  [10–12].

Другими перспективными топливами, по экологическим критериям, являются смеси на основе воды и угля. Такую смесь в настоящее время называют водоугольным топливом (ВУТ). В работе [13] показано, что при сжигании ВУТ оксиды азота и серы снижаются практически в 2 и 4 раза, соответственно. Из

теории формирования оксидов азота [14] известно, что основным источником  $NO_x$  является атомарный азот, содержащийся в воздухе (окислителе). При относительно высоких температурах среды в зоне горения протекает ряд реакций [15], основные из которых:  $N_2 + O_2 \rightarrow 2N + 2O \rightarrow 2NO$ . При сжигании водосодержащих топлив большое количество тепла затрачивается на парообразование, по этой причине температура в зоне горения факела существенно уменьшается по сравнению с горением пылевидного угля. В результате значительно снижается интенсивность образования  $NO_x$ . Кроме того, при взаимодействии водяного пара и углерода кокса ( $C + H_2O \rightarrow CO + H_2$ ) образуются оксид углерода и водород, которые выступают в качестве восстановителя  $NO_x$  и  $SO_x$  при термохимическом взаимодействии  $(NO_x + H_2/CO \rightarrow N_2 + H_2O/CO_2; SO_x + H_2/CO \rightarrow S + H_2O/CO_2)$  [15].

В связи с вышеизложенным исследования водоугольных топлив, как экспериментальные [16, 17], так и теоретические [18], в последние годы проводятся достаточно интенсивно во многих государствах (особенно в России). Но водоугольные суспензии пока не нашли широкого применения в энергетике в связи с тем, что в таких топливах содержание воды должно составлять от 50 до 60 % по массе [15]. Поэтому зна-

чительная теплота затрачивается на термическую подготовку топлива (прогрев и выход паров воды из топливной частицы) и времена задержки зажигания столь обводнённых топлив могут достигать 30 с [19]. Одним из путей снижения значений  $t_{\text{ign}}$  водоугольных суспензий является добавление различного рода добавок, ускоряющих процесс зажигания. В [20] с целью увеличения реакционной способности топлива в фильтр-КЕК добавлялись отходы нефтепереработки. Как известно [21], при сжигании нефтепродуктов образуется достаточно много антропогенных газов. По результатам экспериментов [20] установлено, что добавление в состав топлива отходов лесопиления приводит к снижению антропогенных выбросов.

В то же время на лесопокрываемых территориях многих государств есть большие запасы отходов жизнедеятельности леса (опавшая листва, хвоя, ветки, сухостой и т. п.), так называемый лесной горючий материал (ЛГМ). Последний, с одной стороны, является источником повышенной опасности в лесах (в сухую погоду возможно возникновение лесных пожаров вследствие природных или техногенных процессов), с другой стороны – это горючие вещества, которые могут в определенной степени заменить (или дополнить) природные ресурсы (газ и уголь), использующиеся в качестве топлива тепловых электростанций. Известны примеры (достаточно многочисленные) использования различных видов биомассы в качестве добавки к углям (например, [22]). Соответственно, внедрение лесного горючего материала в энергетику позволит решить ряд проблем. Совместное сжигание биомассы и угля позволит снизить вероятность возникновения лесных пожаров путем использования отходов жизнедеятельности леса в энергетике. Также сжигание ЛГМ совместно с углем позволит решить и экологические проблемы. Но возможность использования лесных горючих материалов в качестве значимой добавки к топливам угольных ТЭС ранее не изучалась, хотя достаточно очевидно, что времена задержки зажигания ЛГМ в обычном состоянии (даже без измельчения) малы, а теплотворная способность достаточно велика. Поэтому становится актуальным использование лесного горючего материала в качестве ускоряющей процесс зажигания добавки к водоугольным топливам.

#### Методики проведения экспериментов и подготовки топлива

С целью подготовки топлива для экспериментальных исследований проводился ряд технологических операций. В качестве лесного горючего материала использовалась хвоя ели, которая высушивалась в сушильном шкафу в течении 120 минут при температуре 373 К. Затем лесной горючий материал измельчался в дисковой мельнице и просеивался через вибросито с размером ячеек 100 мкм. Крупнокусковой каменный уголь (размером 80...100 мм) измельчался в щековой дробилке до фракции частиц  $\delta \approx 30$  мм. Далее угольная крошка размалывалась в шаровой мельнице до пылевидного состояния  $\delta \leq 90$  мкм. Окончательный этап – смешение каменного угля и

древесной биомассы с водой в соответствии с заданными массовыми соотношениями в гомогенизаторе. Суспензия доводилась до гомогенного (однородного) состояния в процессе перемешивания в течение 60 минут.

Состав исследуемых топливных композиций представлен в табл. 1.

Таблица 1. Состав исследуемых топливных композиций

Table 1. Structure of the studied fuel compositions

Уголь/Coal		Биомасса/Biomass		Вода/Water
Марка Brand	Содержание/Content, %	Содержание/Content, %	Вид Species	Содержание/Content, %
«Гоший» (Т) Subanthracite (SA)	35	15	Еловая хвоя Spruce needles	50
	40	10		
	45	5		
	50	0		

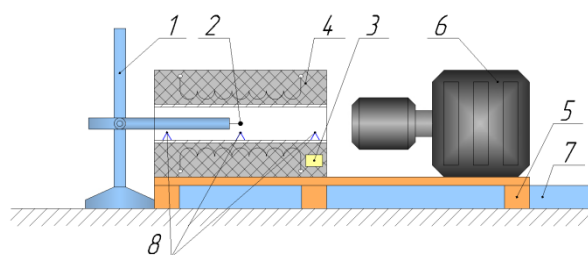


Рис. 1. Экспериментальный стенд: 1 – держатель капли; 2 – капля топлива; 3 – регулятор температуры; 4 – высокотемпературная печь; 5 – подвижная площадка; 6 – высокоскоростная видеокамера; 7 – направляющая подвижной площадки; 8 – термопары

Fig. 1. Experimental stand: 1 – the drop holder; 2 – the fuel drop; 3 – the temperature controller; 4 – the high-temperature furnace; 5 – the mobile platform; 6 – the high-speed video camera; 7 – the mobile platform guide; 8 – the thermocouples

На рис. 1 приведена схема экспериментальной установки, основными элементами которой являются высокотемпературная трубчатая печь и высокоскоростная видеокамера Photron FASTCAM CA4, которая установлена на подвижной каретке. Печь представляет собой полый керамический цилиндр, разделенный на три зоны нагрева с независимым управлением в каждой. Температура окислителя (воздуха) внутри печи контролировалась хромель-алюмелевой термопарой. На внешней поверхности цилиндра закреплялся термоэлектрический нагреватель. Вся система нагрева теплоизолирована минеральной ватой. Во избежание тепловых потерь торцы печи закрывались жаростойкими заглушками, которые убирались в момент, предшествующий вводу капли топлива, зафиксированной на металлическом держателе, в полость трубчатой печи. Следует отметить, что капля на держателе принимала форму вытянутого по нормали к поверхности держателя эллипсоида. Такая геометрия, как показали результаты экспериментов [23, 24], является одним из многих вариантов форм в реальной практике движения капель жидкости через высокотемпературную газовую среду. Поэтому форма капли

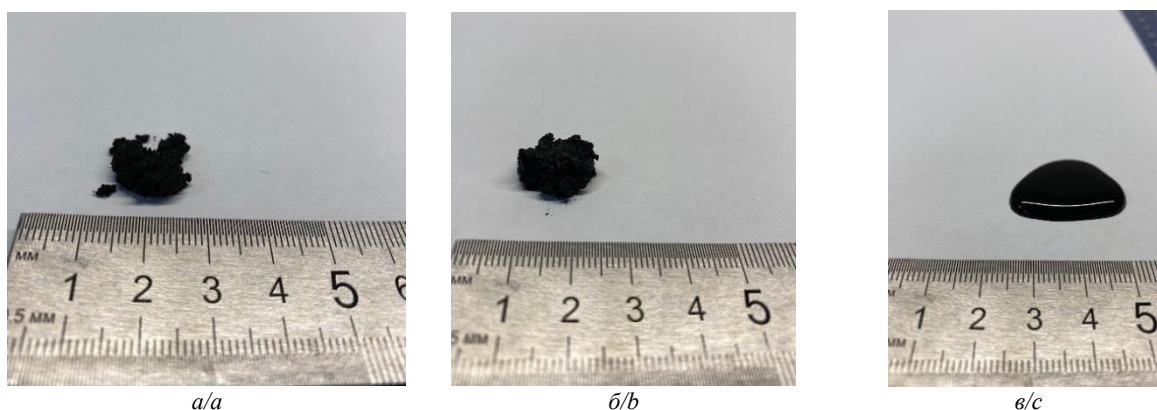
после ее деформации на держателе является одной из достаточно типичных, и результаты экспериментов можно оценивать как представительные. Температура воздуха ( $T_g$ ) в печи соответствовала условиям топочных камер реальных котельных агрегатов и составляла от 873 до 1273 К [25]. Процессы зажигания и термической подготовки капель топлив фиксировала высокоскоростная видеокамера Photron FASTCAM SA4 (скорость видеосъемки до 20000 кад/с). За время задержки зажигания ( $t_{ign}$ ) принимался период от начала теплового воздействия до зажигания (появление первого пламени).

Для капель каждой смеси в одинаковых условиях проводилась серия экспериментов не менее чем из 10 опытов. По результатам проведенных исследований определялись средние значения  $t_{ign}$ . После этого рассчитывались среднеквадратичные отклонения каждого отдельного результата измерения и доверительные интервалы  $\Delta t_{ign}$  времени задержки зажигания при идентичных условиях нагрева. После отбраковки

промахов определялся доверительный интервал и времена задержки зажигания при идентичных условиях нагрева. Значения  $\Delta t_{ign}$  при доверительной вероятности 0,95 составляли не более  $\pm 7,2\%$ .

#### Результаты экспериментов

На рис. 2 представлен внешний вид исследуемых смесей перед экспериментами. Установлено, что с увеличением доли биомассы в топливе увеличивается и адсорбционная способность смесей. Так, например, при уменьшении массовой концентрации угля и соответствующем увеличении доли лесного горючего материала в составе топлива (выше 5 %) водоугольная суспензия теряет свою однородность (рис. 2). По этой причине распыл такого существенно неоднородного топлива может привести к забиванию форсунок или системы подачи топлива, а также абразивному износу горелок. Соответственно для сжигания водоугольной суспензии с высоким содержанием биомассы необходимы специальные технологии топливоподачи.



**Рис. 2.** Внешний вид водоугольного топлива при различных концентрациях биомассы: а) 15 % лесного горючего материала; б) 10 % лесного горючего материала; в) 5 % лесного горючего материала

**Fig. 2.** Appearance of water-coal fuel at different biomass concentrations: а) 15 % of forest combustible fuel; б) 10 % of forest combustible fuel; в) 5 % of forest combustible fuel

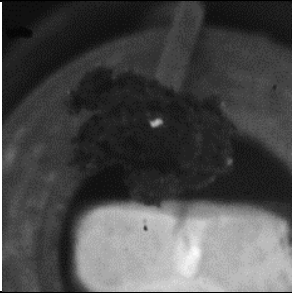
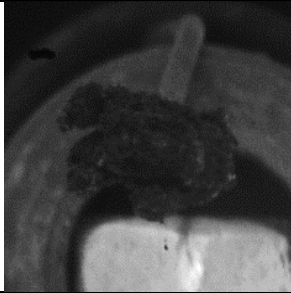
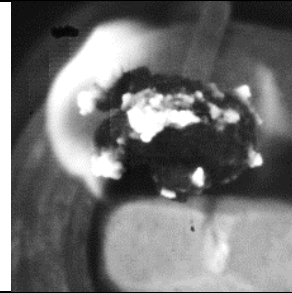
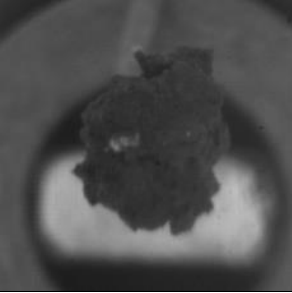
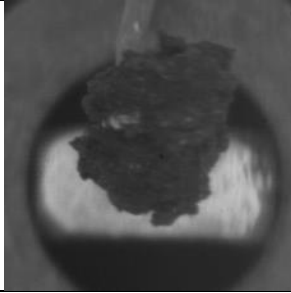
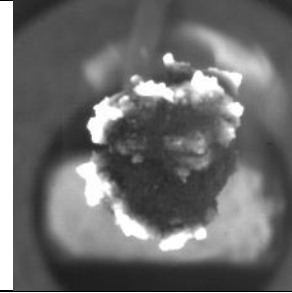
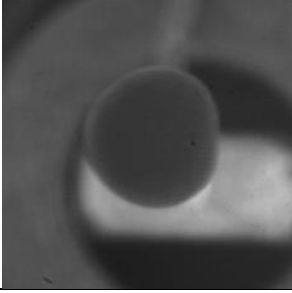
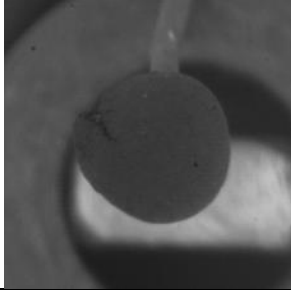
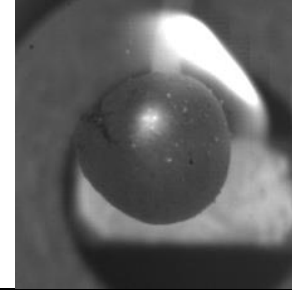
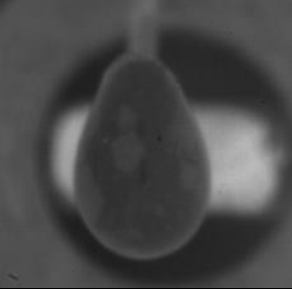
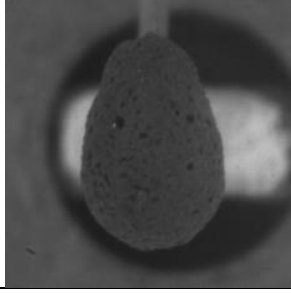
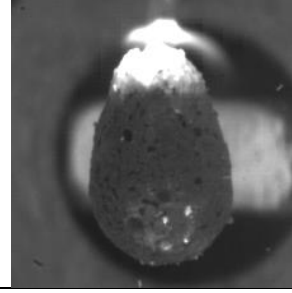
На рис. 3 представлены кадры типичной видеозаписи процесса нагрева капель и последующего воспламенения частиц Био-ВУТ. Анализ кадров показывает, что весь период термической подготовки и зажигания капли топлива можно разделить на ряд последовательных и взаимосвязанных (переходящих одна в другую) стадий (высокая скорость видеосъемки позволяет это сделать).

Кадр (а) соответствует началу теплового воздействия, которое инициирует процесс интенсивного испарения влаги. Завершение процесса влагоудаления характеризуется изменением цвета частицы Био-ВУТ (кадр (б)). Дальнейший ее нагрев приводит к пиролизу органической части угля и основных компонентов биомассы (лигнин, целлюлоза, гемицеллюлоза) с выходом горючих газов. Последующее повышение температуры поверхности частицы приводит к зажиганию Био-ВУТ (кадр (в)).

Анализ видеозаписей проведенных экспериментов дает основания для еще нескольких выводов. Во-первых, сравнение кадров третьего и четвертого рядов (рис. 3) показывает, что ввод в водоугольную

суспензию ЛГМ (при концентрации последнего 5 %) приводит к тому, что капля такого топлива в течение всего периода индукции (до зажигания) сохраняет форму сферы в отличие от ВУТ без добавок ЛГМ (четвертый ряд, рис. 3). Во-вторых, при концентрациях биомассы свыше 5 % формируется частица в форме, как правило, многогранников с множеством выступов и углов. Последние же являются концентраторами тепловых потоков, и, соответственно, зажигание частиц Био-ВУТ начинается именно в этих точках.

Также кадры (рис. 3, в) хорошо иллюстрируют газофазный механизм зажигания капель всех вариантов состава ВУТ (по концентрации ЛГМ). Зоны горения газов хорошо видны на всех четырех кадрах. При этом на кадре (в) (рис. 3) для состава ВУТ с концентрацией ЛГМ 10 % хорошо видно, что зажигание летучих (продуктов пиролиза угля и ЛГМ) происходит над частицей, хотя по всей ее поверхности распределены участки, разогретые до высоких температур (скорее всего, это фрагменты лесного горючего материала, расположенные вблизи поверхности частицы).

Кадры/Frames			Содержание биомассы Biomass content
			15 %
a t=0 с	б t=2,104 с	в t=2,640 с	
			
a t=0 с	б t=2,780 с	в t=3,128 с	
			5 %
a t=0 с	б t=4,240 с	в t=4,884 с	
			
a t=0 с	б t=5,208 с	в t=6,147 с	

**Рис. 3.** Видеограмма процесса нагрева и последующего зажигания частицы водоугольного топлива в высокотемпературной среде ( $T_g=1273\text{ K}$ )

**Fig. 3.** Videogram of heating and subsequent ignition of a water-coal fuel particle in a high-temperature medium ( $T_g=1273\text{ K}$ )

На рис. 4 приведены значения времен задержки зажигания одиночных капель био-водоугольного топлива (в начальный момент, а затем частиц после испарения влаги из приповерхностного слоя). Эксперименты проведены с каплями исследуемых топлив, начальные размеры которых составляли от 2 до 3,5 мм. В реальной практике после выхода из форсу-

нок и распыления капель водоугольного топлива большую долю составляют капли малых (от 0,5 до 1,0 мм) размеров. Поэтому установленные в экспериментах значения  $t_{ign}$  можно считать верхними оценками значений этой характеристики. В то же время в экспериментах [26] установлено, что при движении большой совокупности капель в условиях, близких к



топочной среде, происходят процессы коагуляции капель. Большие по размерам капли поглощают малые при движении в одном направлении. Также высока вероятность коагуляции и малых капель вследствие турбулентных пульсаций в капельной струе как в продольном, так и в поперечном направлениях.

Дробления же капель, сталкивающихся при одноподвижном движении, не происходит [26], так как их скорости сближения (если вторая «догоняет» идущую первой) малы. Поэтому диапазон изменения реальных размеров капель в проведенных экспериментах был представительным.

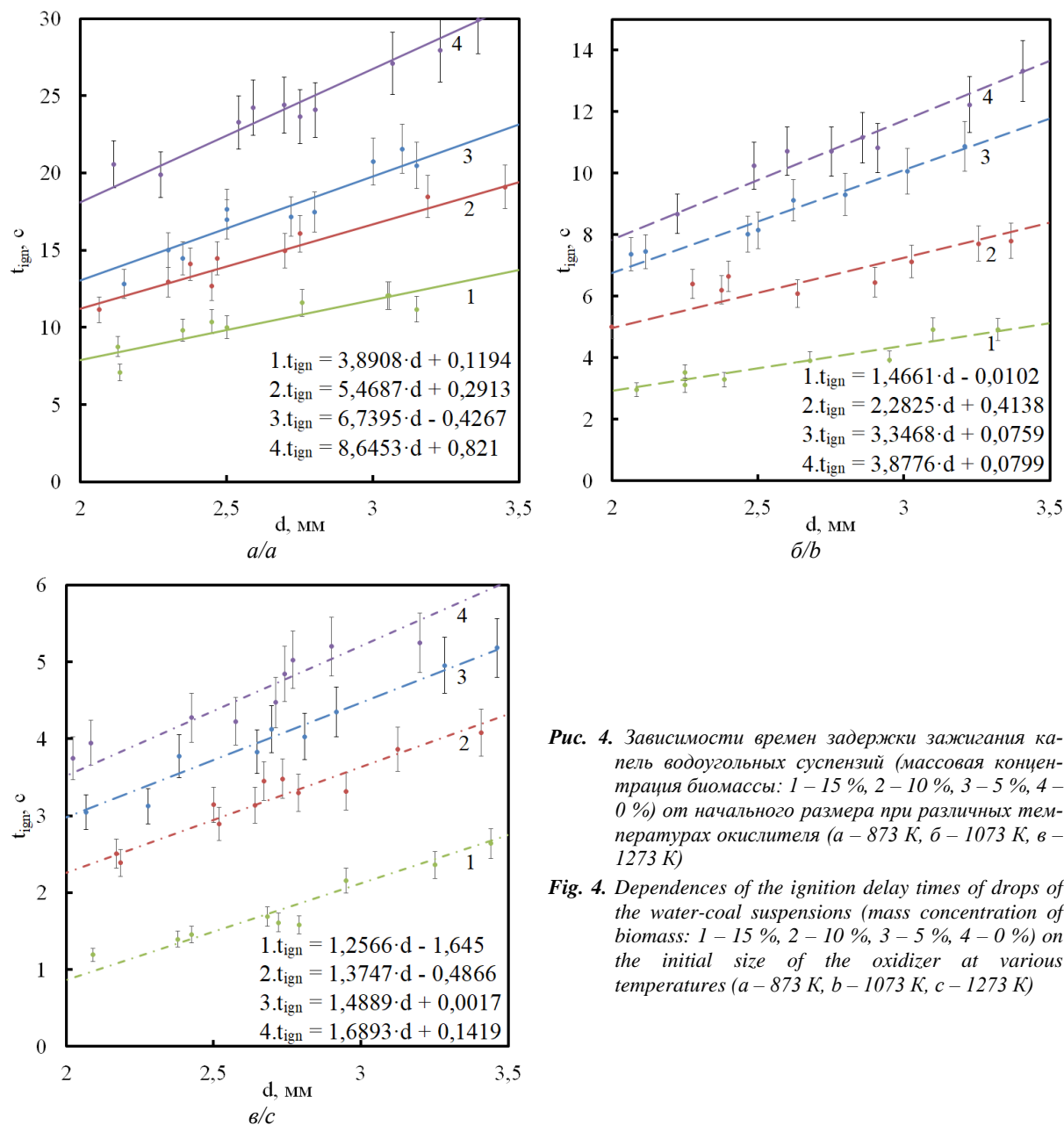


Рис. 4. Зависимости времен задержки зажигания капель водоугольных суспензий (массовая концентрация биомассы: 1 – 15 %, 2 – 10 %, 3 – 5 %, 4 – 0 %) от начального размера при различных температурах окислителя (а – 873 К, б – 1073 К, в – 1273 К)

Fig. 4. Dependences of the ignition delay times of drops of the water-coal suspensions (mass concentration of biomass: 1 – 15 %, 2 – 10 %, 3 – 5 %, 4 – 0 %) on the initial size of the oxidizer at various temperatures (a – 873 K, b – 1073 K, c – 1273 K)

Установленные закономерности, скорее всего, обусловлены тем, что зажигание газообразных продуктов пиролиза органической части угля происходит после полного испарения всей влаги, содержащейся в топливе. Чем больше размер капли топлива, тем длительнее процесс влагоудаления и, соответственно, больше время задержки зажигания при любых температурах среды. С ростом  $T_g$  скорость испарения воды растет, и значение  $t_{ign}$  в результате снижается. Линейный вид зависимости  $t_{ign}(d)$  может быть объяснен тем, что в период индукции протекают одновременно не-

сколько процессов, а интенсивность каждого зависит от характерного размера (условного диаметра) капли (в начальный период времени) и частицы (после испарения влаги с поверхностного слоя капли), представляющей собой двухслойную сферу (сухая оболочка и влажное ядро). Эти процессы – нагрев капли в результате излучения (в основном) и конвекции, перенос тепла в капле, теплопроводность, испарение воды, фильтрация паров воды к поверхности нагрева, вдув паров воды в слой газов вблизи поверхности капли, термическое разложение угля, фильтрация

летучих к нагреваемой поверхности, диффузия и нагрев летучих в среде окислителя, химическое взаимодействие газообразного горючего и окислителя – определяют вид зависимости  $t_{\text{ign}}(d)$  (каждый в большей или меньшей степени).

Основным результатом проведенных экспериментов можно считать, что смеси с добавлением ЛГМ зажигаются значительно быстрее (для смеси с добавлением 15 % биомассы времена задержки зажигания уменьшаются более чем в три раза) по сравнению с ВУТ без добавления ЛГМ (рис. 4). Это обусловлено тем, что биомасса богата летучими, по сравнению с углем, в котором, как известно из теории формирования углей, содержание горючих газов меньше, чем в древесине. С увеличением массовой доли ЛГМ приток горючих газов в область вблизи поверхности частицы увеличивается, поэтому зажигание в газовой фазе происходит быстрее. Можно сделать обоснованный вывод, что биомасса является более реакционно-способным топливом [27] и в составе водоугольной смеси выступает в качестве «разгонщика» термической реакции зажигания частиц Био-ВУТ.

По результатам выполненных исследований можно сделать заключение о том, что введение ЛГМ в состав ВУТ приводит к существенному повышению ресурсоэффективности технологий сжигания ВУТ. При существенном снижении (в 2,5–3 раза) времен задержки зажигания капель водоугольных топлив с добавками ЛГМ снижается и общее время термической подготовки таких топлив. Соответственно, отпадает необходимость реконструкции топок паровых и

водогрейных котлов при переходе с угольного топлива на водоугольные суспензии в качестве основного топлива ТЭС. Кроме того, добавление 10–15 % ЛГМ снижает потребление угля на тепловых электрических станциях и стоимость электроэнергии, так как цена ЛГМ определяется только затратами на сбор и транспортировку таких материалов. В результате использования лесных горючих материалов в качестве добавок к водоугольным топливам может существенно повыситься ресурсоэффективность угольной теплоэнергетики. При этом ВУТ с добавлением ЛГМ во многих случаях будут иметь преимущества (технологические и экономические) даже по сравнению с топливами, которые представляют собой смесь сухих углей (основная компонента) и биомассы (вторая компонента) [28, 29]. Такие смеси в последние годы достаточно интенсивно исследуются во многих развитых государствах.

### Заключение

По результатам экспериментальных исследований установлена перспективность использования в качестве ускоряющей процесс зажигания капель водоугольного топлива добавки ЛГМ. Показано, что добавление 15 % биомассы по массе в состав водоугольного топлива позволяет уменьшить времена задержки зажигания более чем в три раза по сравнению с водоугольной суспензией без добавления биомассы.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-79-10015).*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Miller B.G. Anatomy of a coal-fired power plant. Clean coal engineering technology (second edition). – Pennsylvania: Butterworth-Heinemann, 2017. – 856 p.
2. Zhao S., Alexandroff A. Current and future struggles to eliminate coal // *Energy Policy*. – 2019. – V. 129. – P. 511–520.
3. Grigoli F., Herman A., Swiston A. A crude shock: explaining the short-run impact of the 2014–16 oil price decline across exporters // *Energy Economics*. – 2019. – V. 78. – P. 481–493.
4. BP Statistical Review of World Energy. URL: <https://www.bp.com/en/global/corporate/news-and-insights/press-releases/bp-statistical-review-of-world-energy-2019.html> (дата обращения 16.03.2020).
5. A review of greenhouse gas emission profiles, dynamics, and climate change mitigation efforts across the key climate change players / X. Zheng, D. Streimikiene, T. Balezentis, A. Mardani, F. Cavallaro, H. Liao // *Journal of Cleaner Production*. – 2019. – V. 234. – P. 1113–1133.
6. Comparative study on combustion and oxy-fuel combustion environments using mixtures of coal with sugarcane bagasse and biomass sorghum bagasse by the thermogravimetric analysis / N.R. Galina, C.M. Romero Luna, G.L.A.F. Arce, I. Ávila // *Journal of the Energy Institute*. – 2019. – V. 92. – P. 741–754.
7. Furniture wood waste as a potential renewable energy source / A. Plis, M. Kotyczka-Morańska, M. Koczyński, G. Łabojko // *Thermal Analysis and Calorimetry*. – 2016. – V. 125. – P. 1357–1371.
8. Van der Stelt M.J.C., Gerhauser H., Kiel J.H.A. Biomass upgrading by torrefaction for the production of biofuels: a review // *Biomass Bioenergy*. – 2011. – V. 35. – P. 3748–3762.
9. Nunes L.J.R., Matias J.C.O., Catalo J.P.S. A review on torrefied biomass pellets as a sustainable alternative to coal in power generation // *Renew Sustain Energy Rev*. – 2014. – V. 40. – P. 153–160.
10. NO and SO<sub>2</sub> emissions from combustion of raw and torrefied biomasses and their blends with lignite / J. Yanik, G. Duman, O. Karlström, A. Brink // *Journal of Environmental Management*. – 2018. – V. 227. – P. 155–161.
11. Vicente E.D., Alves C.A. An overview of particulate emissions from residential biomass combustion // *Atmospheric Research*. – 2018. – V. 199. – P. 159–185.
12. Detailed Modeling of NO<sub>x</sub> and SO<sub>x</sub> formation in Co-combustion of coal and biomass with reduced kinetics / X. Wei, X. Guo, S. Li, X. Han, U. Schnell, G. Scheffknecht, B. Risio // *Energy & Fuels*. – 2012. – V. 26. – P. 3117–3124.
13. The prospects of burning coal and oil processing waste in slurry, gel, and solid state / K. Verzhinina, G. Nyashina, V. Dorokhov, N. Shlegel // *Applied Thermal Engineering*. – 2019. – V. 156. – P. 51–62.
14. Interaction between volatile-N and char-N and their contributions to fuel-NO during pulverized coal combustion in O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> atmosphere at high temperature / X. Wu, W. Fan, P. Ren, J. Chen, Z. Liu, P. Shen // *Fuel*. – 2019. – V. 255. – P. 1–15.
15. Долинский А.А., Халатов А.А. Водоугольное топливо: перспективы использования в теплоэнергетике и жилищно-коммунальном секторе // *Пром. теплотехника*. – 2007. – Т. 29. – № 5. – С. 70–79.
16. Antonov D.V., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Comparison of the characteristics of micro-explosion and ignition of two-fluid water-based droplets, emulsions and suspensions, moving in the high-temperature oxidizer medium // *Acta Astronautica*. – 2019. – V. 160. – P. 258–269.
17. Antonov D.V., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Differences of two-component droplets breakup at the high temperatures // *Journal of the Energy Institute*. – 2020. – V. 93. – P. 351–366.
18. Effect of high-temperature gas flow on ignition of the water-coal fuel particles / V. Salomatov, G. Kuznetsov, S. Syrodoy, N. Gutareva // *Combustion and Flame*. – 2019. – V. 203. – P. 375–385.
19. The influence of the structure heterogeneity on the characteristics and conditions of the coal–water fuel particles ignition in high temperature environment / S.V. Syrodoy, G.V. Kuznetsov,

- A.V. Zhakharevich, N.Y. Gutareva, V.V. Salomatov // Combustion and Flame. – 2017. – V. 180. – P. 196–206.
20. Sawdust as ignition intensifier of coal water slurries containing petrochemicals / K.Yu. Vershinina, G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak // Energy. – 2017. – V. 140. – P. 69–77.
21. Liu X., Luo Z., Yu C. Effect of limestone on the emission of NO during petroleum coke combustion // Fuel. – 2018. – V. 224. – P. 1–9.
22. Conditions and characteristics of mixed fuel granules ignition based on coal and finely dispersed wood / G.V. Kuznetsov, S.A. Yankovsky, A.A. Tolokolnikov, A.V. Zenkov, I.V. Cherednik // Energy. – 2020. – V. 194. – P. 1–9.
23. Volkov R.S., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Influence of the initial parameters of spray water on its motion through a counterflow of high-temperature gases // Technical Physics. – 2014. – V. 59. – P. 959–967.
24. Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. The motion of a manifold of finely dispersed liquid droplets in the counterflow of high-temperature gases // Technical Physics Letters. – 2014. – V. 40. – P. 499–502.
25. Aerodynamic processes and heat exchange in the furnace of a steam boiler with a secondary emitter / A. Redko, R. Dzhyoiev, A. Davidenko, A. Pavlovskaya, S. Pavlovskiy, I. Redko, N. Kulikova, O. Redko // Alexandria Engineering Journal. – 2019. – V. 58. – P. 89–101.
26. Volkov R.S., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Evaporation of two liquid droplets moving sequentially through high-temperature combustion products // Thermophysics and Aeromechanics. – 2014. – V. 21 (2). – P. 255–258.
27. Thermal behaviour and kinetics of coal/biomass blends during co-combustion / M.V. Gil, D. Casal, C. Pevida, J.J. Pis, F. Rubiera // Bioresource Technology. – 2010. – V. 101. – P. 5601–5608.
28. Kuznetsov G.V., Yankovskii S.A. Conditions and characteristics in ignition of composite fuels based on coal with the addition of wood // Thermal Engineering. – 2019. – V. 66 (2). – P. 133–137.
29. Ignition of the wood biomass particles under conditions of near-surface fragmentation of the fuel layer / G.V. Kuznetsov, S.V. Syrodoy, N.Y. Gutareva, A.A. Kostoreva, Zh.A. Kostoreva // Fuel. – 2019. – V. 252. – P. 19–36.

Поступила 23.03.2020 г.

#### Информация об авторах

**Малышев Д.Ю.**, аспирант Инженерной школы энергетики НОЦ И.Н. Бутакова Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Сыродой С.В.**, кандидат технических наук, научный сотрудник Инженерной школы энергетики НОЦ И.Н. Бутакова Национального исследовательского Томского политехнического университета.

УДК 536.468

## JUSTIFICATION OF RESOURCE EFFICIENCY OF THE TECHNOLOGIES FOR BURNING WATER-COAL FUELS WITH BIOMASS ADDITIVES

Dmitry Yu. Malyshev<sup>1</sup>,  
dmitry.mlv@gmail.com

Semen V. Syrodoy<sup>1</sup>,  
ssyrodoy@yandex.ru

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

One of the most pressing problems of our time is environmental safety. The pollution of the Earth's atmosphere in recent decades is caused by work at thermal power plants burning coal in the territories of the most popular states (USA, China, India, etc.). The use of a new class of fuel – bio-water-coal – can significantly reduce emissions of man-made gases, generated during combustion of coal in the furnaces of steam and hot water boilers, into the Earth's atmosphere, expand the raw materials base of the modern thermal power plants and increase the resource efficiency of coal-fired power systems.

**The aim** of the research is to study the influence of the concentration composition on the integral characteristics of ignition of the drops of the biohydrocarbon fuels under high-temperature heating.

**Object:** a water-coal suspension based on brand T coal, water and spruce needles. In the course of the experimental studies, the following mass concentrations of coal and biomass were considered 50/0 %, 45/5 %, 40/10 %, 35/15 %, respectively (50 % – water).

**Method:** experimental determination using the high-speed Photron FASTCAM CA4 video camera of the temporal characteristics of ignition of drops of the bio-water-coal suspensions under conditions corresponding to the heating intensity of the combustion chambers of the steam and hot water boilers; registration of medium temperature using chromel-alumel thermocouples.

**Results.** The effect of mass concentration of forest combustible material on ignition delay times ( $t_{ign}$ ) of water-coal fuels has been established. It was shown that when the fuel composition contains 15 % of biomass, the ignition delay times are reduced by more than three times compared with water-coal fuel without adding biomass at relatively low temperatures of the combustion medium. The results of experimental studies are also the basis for development of combustion models of liquid composite fuels.

### Key words:

Bio-water-coal fuel, biomass, forest combustible fuel, ignition, ignition delay time, experiment, energy efficiency.

The research was carried out due to the grant of the Russian Science foundation (project no. 18-79-10015).

### REFERENCES

1. Miller B.G. *Anatomy of a coal-fired power plant. Clean coal engineering technology* (second edition). Pennsylvania, Butterworth-Heinemann, 2017. 856 p.
2. Zhao S., Alexandroff A. Current and future struggles to eliminate coal. *Energy Policy*, 2019, vol. 129, pp. 511–520.
3. Grigoli F., Herman A., Swiston A. A crude shock: explaining the short-run impact of the 2014–16 oil price decline across exporters. *Energy Economics*, 2019, vol. 78, pp. 481–493.
4. *BP Statistical Review of World Energy*. Available at: <https://www.bp.com/en/global/corporate/news-and-insights/press-releases/bp-statistical-review-of-world-energy-2019.html> (accessed 16 March 2020).
5. Zheng X., Streimikiene D., Balezentis T., Mardani A., Cavallaro F., Liao H. A review of greenhouse gas emission profiles, dynamics, and climate change mitigation efforts across the key climate change players. *Journal of Cleaner Production*, 2019, vol. 234, pp. 1113–1133.
6. Galina N.R., Romero Luna C.M., Arce G.L.A.F., Ávila I. Comparative study on combustion and oxy-fuel combustion environments using mixtures of coal with sugarcane bagasse and biomass sorghum bagasse by the thermogravimetric analysis. *Journal of the Energy Institute*, 2019, vol. 92, pp. 741–754.
7. Plis A., Kotyczka-Morańska M., Koczyński M., Łabojko G. Furniture wood waste as a potential renewable energy source. *Thermal Analysis and Calorimetry*, 2016, vol. 125, pp. 1357–1371.
8. Van der Stelt M.J.C., Gerhauser H., Kiel J.H.A. Biomass upgrading by torrefaction for the production of biofuels: a review. *Biomass Bioenergy*, 2011, vol. 35, pp. 3748–3762.
9. Nunes L.J.R., Matias J.C.O., Catalo J.P.S. A review on torrefied biomass pellets as a sustainable alternative to coal in power generation. *Renew Sustain Energy Rev.*, 2014, vol. 40, pp. 153–160.
10. Yanik J., Duman G., Karlström O., Brink A. NO and SO<sub>2</sub> emissions from combustion of raw and torrefied biomasses and their blends with lignite. *Journal of Environmental Management*, 2018, vol. 227, pp. 155–161.
11. Vicente E.D., Alves C.A. An overview of particulate emissions from residential biomass combustion. *Atmospheric Research*, 2018, vol. 199, pp. 159–185.
12. Wei X., Guo X., Li S., Han X., Schnell U., Scheffknecht G., Risio B. Detailed Modeling of NO<sub>x</sub> and SO<sub>x</sub> Formation in Co-combustion of Coal and Biomass with Reduced Kinetics. *Energy & Fuels*, 2012, vol. 26, pp. 3117–3124.
13. Vershina K., Nyashina G., Dorokhov V., Shlegel N. The prospects of burning coal and oil processing waste in slurry, gel, and solid state. *Applied Thermal Engineering*, 2019, vol. 156, pp. 51–62.
14. Wu X., Fan W., Ren P., Chen J., Liu Z., Shen P. Interaction between volatile-N and char-N and their contributions to fuel-NO during pulverized coal combustion in O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> atmosphere at high temperature. *Fuel*, 2019, vol. 255, pp. 1–15.
15. Dolinsky A.A., Khalatov A.A. Coal-water fuels: prospects for use in the power system and housing and communal services. *Industrial heat engineering*, 2007, vol. 29, no. 5, pp. 70–79.
16. Antonov D.V., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Comparison of the characteristics of micro-explosion and ignition of two-fluid water-based droplets, emulsions and suspensions, moving in the high-temperature oxidizer medium. *Acta Astronautica*, 2019, vol. 160, pp. 258–269.
17. Antonov D.V., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Differences of two-component droplets breakup at the high temperatures. *Journal of the Energy Institute*, 2020, vol. 93, pp. 351–366.

18. Salomatov V., Kuznetsov G., Syrodoy S., Gutareva N. Effect of high-temperature gas flow on ignition of the water-coal fuel particles. *Combustion and Flame*, 2019, vol. 203, pp. 375–385.
19. Syrodoy S.V., Kuznetsov G.V., Zhakharevich A.V., Gutareva N.Y., Salomatov V.V. The influence of the structure heterogeneity on the characteristics and conditions of the coal–water fuel particles ignition in high temperature environment. *Combustion and Flame*, 2017, vol. 180, pp. 196–206.
20. Vershinina K.Yu., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Sawdust as ignition intensifier of coal water slurries containing petrochemicals. *Energy*, 2017, vol. 140, pp. 69–77.
21. Liu X., Luo Z., Yu C. Effect of limestone on the emission of NO during petroleum coke combustion. *Fuel*, 2018, vol. 224, pp. 1–9.
22. Kuznetsov G.V., Yankovsky S.A., Tolokolnikov A.A., Zenkov A.V., Cherednik I.V. Conditions and characteristics of mixed fuel granules ignition based on coal and finely dispersed wood. *Energy*, 2020, vol. 194, pp. 1–9.
23. Volkov R.S., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Influence of the initial parameters of spray water on its motion through a counter flow of high-temperature gases. *Technical Physics*, 2014, vol. 59, pp. 959–967.
24. Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. The motion of a manifold of finely dispersed liquid droplets in the counterflow of high-temperature gases. *Technical Physics Letters*, 2014, vol. 40, pp. 499–502.
25. Redko A., Dzhyoiev R., Davidenko A., Pavlovskaya A., Pavlovskiy S., Redko I., Kulikova N., Redko O. Aerodynamic processes and heat exchange in the furnace of a steam boiler with a secondary emitter. *Alexandria Engineering Journal*, 2019, vol. 58, pp. 89–101.
26. Volkov R.S., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Evaporation of two liquid droplets moving sequentially through high-temperature combustion products. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2014, vol. 21 (2), pp. 255–258.
27. Gil M.V., Casal D., Pevida C., Pis J.J., Rubiera F. Thermal behaviour and kinetics of coal/biomass blends during co-combustion. *Bioresource Technology*, 2010, vol. 101, pp. 5601–5608.
28. Kuznetsov G.V., Yankovskii S.A. Conditions and characteristics in ignition of composite fuels based on coal with the addition of wood. *Thermal Engineering*, 2019, vol. 66 (2), pp. 133–137.
29. Kuznetsov G.V., Syrodoy S.V., Gutareva N.Y., Kostoreva A.A., Kostoreva Zh.A. Ignition of the wood biomass particles under conditions of near-surface fragmentation of the fuel layer. *Fuel*, 2019, vol. 252, pp. 19–36.

Received: 23 March 2020.

#### Information about the authors

**Dmitry Yu. Malyshev**, post-graduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Semen V. Syrodoy**, Cand. Sc, researcher, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 551.251:552.13:552.16

## МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И Р-Т УСЛОВИЯ МЕТАМОРФИЗМА НЕОПРОТЕРОЗОЙСКИХ МЕТАБАЗИТОВ В БАСЕЙНАХ РЕК ТЫРАДА И МАЛАЯ КАДРА, ЕНИСЕЙСКИЙ КРЯЖ

Никитин Радим Николаевич,  
radim.geo@mail.ru

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

**Актуальность.** На сегодняшний день считается, что распространенные в заангарской части Енисейского кряжа метабазитовые породные ассоциации являются производными процессов рифтогенеза, вызванных плюмовой активностью и распадом суперконтинента Родиния на рубеже ~1100–700 млн лет назад. При этом данные по их абсолютному возрасту являются предметом дискуссий. В статье рассматриваются неопротерозойские метаморфические события на примере термодинамических особенностей формирования исследуемых амфиболитовых проявлений, обсуждается вопрос их места в геодинамической модели образования Енисейского кряжа и роли син/постколлизийного гранитоидного магматизма в омоложении датированного возраста заангарских амфиболитов.

**Цель:** установить главный минеральный парагенезис амфиболитов и их вторичную минерализацию; определить термодинамические условия метаморфизма и его основные этапы; сопоставить характер метаморфизма с метаморфическими событиями региона и определить его роль в формировании современного облика Енисейского кряжа; выявить причины, отвечающие за несоответствие полученного возраста изучаемых амфиболитов по Ar-Ag изотопии известным на сегодняшний день датировкам метабазитов Заангарья.

**Объект:** амфиболиты шумихинского метапикрит-базальтового комплекса, входящего в состав малогаревской метасерии позднеархейского (?) возраста, залегающие в пластах карбонатных пород и кристаллических сланцев в бассейнах рек Тырада и Малая Кадра (притоков Теи и Панимбы соответственно).

**Методы.** Химический состав минеральных фаз изучен с использованием аналитического комплекса для растровой электронной микроскопии и микроанализа на базе сканирующего электронного микроскопа TESCAN VEGA II LMU, совмещенного с рентгеновским энергодисперсионным микроанализатором Oxford INCA Energy 350, в центре коллективного пользования «Аналитический центр геохимии природных систем» Национального исследовательского Томского государственного университета. На основании этих данных были рассчитаны кристаллохимические формулы минералов, построены классификационные диаграммы и диаграммы геотермобарометров.

**Результаты.** Установлен общий парагенезис амфиболитов исследуемых проявлений:  $Nb+Pl (X_{An}=0,28-0,38)+Qz+Ilm (Sph)+Fsp$  с вторичным локальным развитием Act, Zo, Bt, Ms и Chl. Термодинамические параметры метаморфизма метабазитов соответствуют условиям низкотемпературных зон амфиболитовой фации (555–475 °С, 5–7,5 кбар) с динамикой повышения давления на общем фоне постепенного остывания. Амфиболиты являются производными коллизийного метаморфизма (~880–800 млн лет), проявленного в условиях аккреции ранее отколовшихся тектонических блоков к Сибирскому кратону. Локальное развитие калишпатизации, актинолитизации и хлоритизации (344–199 °С) относится к наложенным процессам в условиях повторного разогрева и может быть связано с завершающей стадией гренвильских тектонических событий, сопровождавшихся син/постколлизийным гранитоидным магматизмом ( $\gamma R_3t_1$ , 760–630 млн лет), что могло стать причиной омоложения возраста исследуемых метабазитов (707–675 млн лет).

### Ключевые слова:

Амфиболиты, неопротерозойский коллизийный метаморфизм, эпидот-амфиболитовая фация, Р-Т условия, возраст метаморфизма, Енисейский кряж.

### Введение

Мафитовый магматизм считается индикатором тектонических событий в обстановках спрединга, субдукции и внутриплитных горячих точек [1–3]. Пикрит-базальтовая и субщелочная базальтоидная магматическая активность, проявленная на юго-западном обрамлении Сибирского кратона, могла быть связана с мезопротерозойским растяжением литосферы в результате внедрения высокотемпературного материала [4–6]. При этом продукты его геологической деятельности, подвергнувшиеся метаморфизму, заключают в себе разные стадии развития палеоокеанов [7]. Такие метабазитовые проявления распространены в складчато-надвиговом поясе Енисейского кряжа, где они залегают среди метаморфизованных толщ Заангарья и Ангаро-Канского выступа в виде протерозойских субсогласных тел, приурочен-

ных к Татаро-Ишимбинскому глубинному разлому и Приенисейской сдвиговой зоне [8–12]. На сегодняшний день не существует единого мнения по поводу условий и времени их образования. По одним данным амфиболитовые проявления имеют позднеархейский возраст и являются производными рассеянного рифтогенеза в условиях гранулитовой и гранат-силлиманитовой зон амфиболитовой фации [13], по другим – неопротерозойскими рифтогенными метаморфитами [9, 10, 14], сформированными в условиях амфиболитовой и эпидот-амфиболитовой фаций метаморфизма в обстановке растяжения и сжатия континентальной коры [15]. Установление целостной картины протерозойских метаморфических событий региона, как отражение геодинамических режимов, а также выявление причин реальной проблемы с неоднозначностью абсолютного возраста метабазитовых тел Заангарья и поиск маркеров, указывающих на

перестройку изотопной системы в амфиболах, представляют собой фундаментальную и практическую ценность исследования. Для этого мы изучаем минеральные ассоциации амфиболитовых проявлений и Р-Т условия их метаморфизма.

#### Объект исследования

Енисейский кряж является докембрийским орогеном на юго-западной части Сибирской платформы и представляет собой два различных по строению сегмента: Заангарье и Ангаро-Канский блок. Формирование складчато-надвигового пояса Заангарья происходило в обстановке коллизии одного или нескольких террейнов к окраине Сибирского кратона в интервале ~1100–900, 900–850 и 800–600 млн лет назад [16–22]. При этом считается, что формирование рифтогенных структур в пределах Татаро-Ишимбинской зоны разломов Енисейского кряжа происходило в три стадии (750, 700 и 650–670 млн лет) и сопровождалось внутриплитным магматизмом, а также образованием метабазитов Приангарья и Тейско-Чапского прогиба в северной части Енисейского кряжа [9, 10, 14].

Изучаемые метабазальты расположены в средней части Заангарья в пределах Татаро-Ишимбинской зоны разломов и относятся к шумихинскому метапикрит-базальтовому комплексу в составе малогаревской метасерии позднеархейского (?) возраста и прорывают карбонатные породы (мрамора, кальцифиры) и кристаллические сланцы в долинах рек Тырада и Малая Кадра, притоков Теи и Панимбы соответственно (рис. 1). По своим геохимическим признакам исследуемые метавулканы сопоставимы с толеитовыми производными E–MORB-магматизма. Предполагается, что их развитие происходило в сложной геодинамической обстановке задугового бассейна и взаимодействия мантийного/астеносферного диапира с материковой окраиной и/или фрагментами обогащенной океанической литосферы. [23]. Метабазиты представляют собой ограниченные по площади ареалы субсогласных будинированных пластинообразных тел (до 2000×30 м) амфиболитов. Это мелко-среднезернистые породы темно-зеленого цвета с массивной, реже сланцевато-полосчатой текстурой. В шлифах они имеют нематобластовую равномерно-зернистую структуру и представлены преимущественно зеленой роговой обманкой и плагиоклазом с подчиненной ролью кварца, биотита и рудных минералов.

По результатам изотопного Ag-Ag-анализа время образования амфибола из метабазитовых пород соответствует  $707 \pm 6$  и  $544 \pm 5$  млн лет для амфиболитовых образований реки Тырада и  $675 \pm 10$  млн лет для метабазитов в долине реки Кадра [23]. Наблюдаемое низкотемпературное спектральное плато на 544 млн лет, вероятно, свидетельствует о перестройке изотопной системы минерала в условиях ретроградного метаморфизма, которое могло быть связано с надвиговой тектоникой [24] и проявлением более позднего внутриплитного магматизма в пределах Енисейского кряжа. Данные по изотопному составу неодима (~1,4–2,2 млрд лет) и изотопных отношений  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_T$  отражают разнородный характер субстрата, участво-

вавшего в пороодообразовании, и позволяют говорить о смешении мантийных протолитов с компонентами земной коры [23].

#### Методика исследования

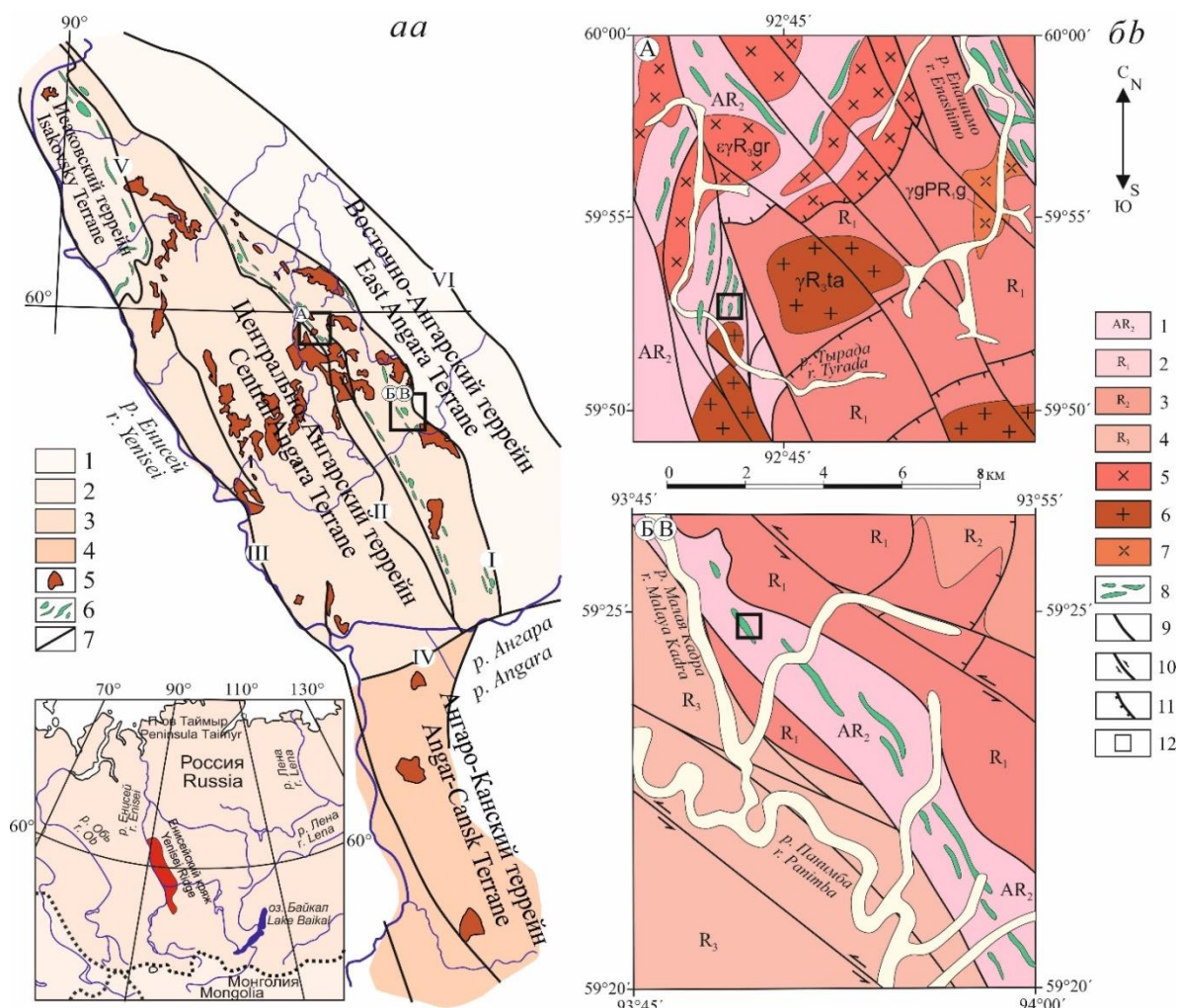
Данные по количественному анализу минеральных фаз исследуемых амфиболитов были получены при помощи аналитического комплекса сканирующего электронного микроскопа VEGA II LMU, совмещенного с энергодисперсионным рентгеновским спектрометром модели INCA Energy 350. Пробоподготовка для данного вида исследования включала в себя изготовление образца размером не более  $20 \times 20 \times 5$  мм путем отпиливания его от горной породы с последующей полировкой и чисткой поверхности, а также напылением слоя углерода толщиной  $25 \pm 5$  нм.

При процедуре количественного анализа образец располагался строго перпендикулярно к пучку зонда под определенным углом к устройству Si(Li)-детектора. Рабочее ускоряющее напряжение не менее 15 кВ, ток пучка 5 нА, размер пучка 500 Å. Результаты анализа визуализировались в виде спектра. Для получения прецизионных данных о химическом составе исследуемого объекта проводилась локализация области возбуждения, что дало значительно откорректированный спектр.

Для оценки термодинамических условий метаморфизма были использованы минеральные геотермометры: роговообманковый геотермометр [25],  $\text{Amr-P1}$  геотермометр [26] и  $\text{Amr-P1}$  геобарометры [27, 28], а также термометры для определения температур кристаллизации хлоритов [29–31]. Геотермометрия производилась на основании рассчитанных структурных формул минералов с использованием данных, полученных при помощи энергодисперсионного анализа. Расчет кристаллохимических формул проводился на 28 атомов кислорода для хлорита, на 23 для амфибола, на 11 для биотита и мусковита, на 8 для плагиоклаза и калиевого полевого шпата.

#### Результаты

Нами были проанализированы тринадцать образцов метабазитовых проявлений в долинах рек Тырада (Т-1/1, Т-1/4, Т-3/3, Т-3/5, Т-3/6, Т-4/2, Т-5/2, далее I) и Малая Кадра (К-7, К-9, К-10, К-11, К-12, К-13, далее II). В табл. 1 приведены их типичные представители и составы их главных пороодообразующих минералов. Было сделано до 60 точек рентгеноспектрального анализа на четырех–пяти участках в каждом отдельно взятом образце. В результате проведенных исследований установлен общий парагенезис амфиболитов двух исследуемых проявлений: Hbl (роговая обманка) + Pl (плагиоклаз,  $X_{\text{An}}=0,28-0,38$ ) + Qz (кварц) + Ilm (ильменит) (рис. 2). На него накладываются процессы, повлекшие развитие Sph (сфена) и частичной калишпатизации, проявленной в виде реликтов зерен ортоклаза (Or) или залеченных им микротрещинок. Локальное развитие Vt (биотита), Ms (мусковита), Chl (хлорита), а затем Act (актинолита) и Zo (цоизита) присуще только отдельным зонам амфиболитов бассейна р. Тырада и отражает постметаморфические наложенные процессы.



**Рис. 1.** Геологическая позиция метаботритовых пород Заангарья: а) структурно-тектоническая схема Енисейского кряжа [17]: 1 – мезо- и неопротерозойские метаосадочные комплексы Восточно-Ангарского террейна; 2 – неопротерозойские метаосадочные и вулканогенные комплексы Исаковского террейна; 3 – архейские, палео-, мезо- и неопротерозойские метаосадочные комплексы Центрально-Ангарского террейна; 4 – архейские и палеопротерозойские гранулитовые и гнейсовые комплексы Ангаро-Канского террейна; 5 – гранитоидные массивы; 6 – пояса распространения метаботритовых пород; 7 – региональные зоны разломов: I – Ишимбинская, II – Татарская, III – Енисейская, IV – Нижне-Ангарская, V – Исаковская, VI – Ангаро-Бахтинская. На врезке показано географическое расположение Енисейского кряжа; б) схемы геологического строения в бассейнах рек Тырада (А) и Малая Кадра (Б), составлены по материалам геологических съемок (А.А. Стороженко, В.К. Зув, 1981; А.И. Хисамутдинов, 1990; А.А. Стороженко, Н.Ф. Васильев, 2003; В.М. Колямкин, Г.А. Середенко, 2006), 1 – плагиогнейсы, гнейсы, мраморы, амфиболиты малогаревского комплекса архея (AR<sub>2</sub>); 2–4 – биотит-хлорит-серцитовые сланцы, кварцевые и аркозовые метапесчаники кординской свиты (2), серцит-хлоритовые сланцы горбилковской и удерейской свит (3), филлиты шунтарской и потоскуйской свит (4) рифейского (R<sub>1-3</sub>) возраста; 5–7 – гранитоидные комплексы: гаревский (5), татарско-аяхтинский (6), гурахтинский (7); 8 – амфиболиты; 9–11 – дизъюнктивные нарушения: субвертикальные разломы (9), сдвиги (10), надвиги (11); 12 – места отбора проб

**Fig. 1.** Geological position of Transangarian metabasites: a) structural tectonic scheme of Yenisei ridge [17]: 1 – meso- and neoproterozoic metasediment complexes of East Angarian terrain; 2 – neoproterozoic metasediment and volcanogenic complexes of Isakovskiy terrain; 3 – paleo-, meso- and neoproterozoic metasediment complexes of Central Angarian terrain; 4 – archean and paleoproterozoic granulitic and gneissic complexes of Angarian-Kansk terrain; 5 – granitoid massifs; 6 – metabasites distribution belts; 7 – regional fault zones: I – Ishimbinskaya, II – Tatarskaya, III – Yeniseiskaya, IV – Nizhne-Angarskaya, V – Isakovskaya, VI – Angaro-Bakhtinskaya. Geographical location of Yenisei ridge is shown on the inset; b) schemes of geological structure of areas of Tyrada (A) and Malaya Kadra (B) according to materials of geological surveys (A.A. Storozhenko, V.K. Zuev, 1981; A.I. Hisamutdinov, 1990; A.A. Storozhenko, N.F. Vasilev, 2003; V.M. Kolyamkin, G.A. Seredenko, 2006), 1 – plagiogneisses, gneisses, marbles, amphibolites of malogarevsky complex of archaean (AR<sub>2</sub>); 2–4 – biotite-chlorite-sericite schists, quartzose and arkose metasediments (kordinskaya suite) (2), sericite-chlorite schists (gorbilokskaya and udereyskaya suites) (3), phyllites (shuntarskaya and potoskuyskaya suites) (4) all R<sub>1-3</sub>; 5–7 – granitoid complexes: garevsky (5), tatar-ayahtinsky (6), gurakhtinsky (7); 8 – amphibolites; 9–11 – disjunctive faults: subvertical faults (9), strike-slip faults (10), thrust faults (10); 12 – sampling points

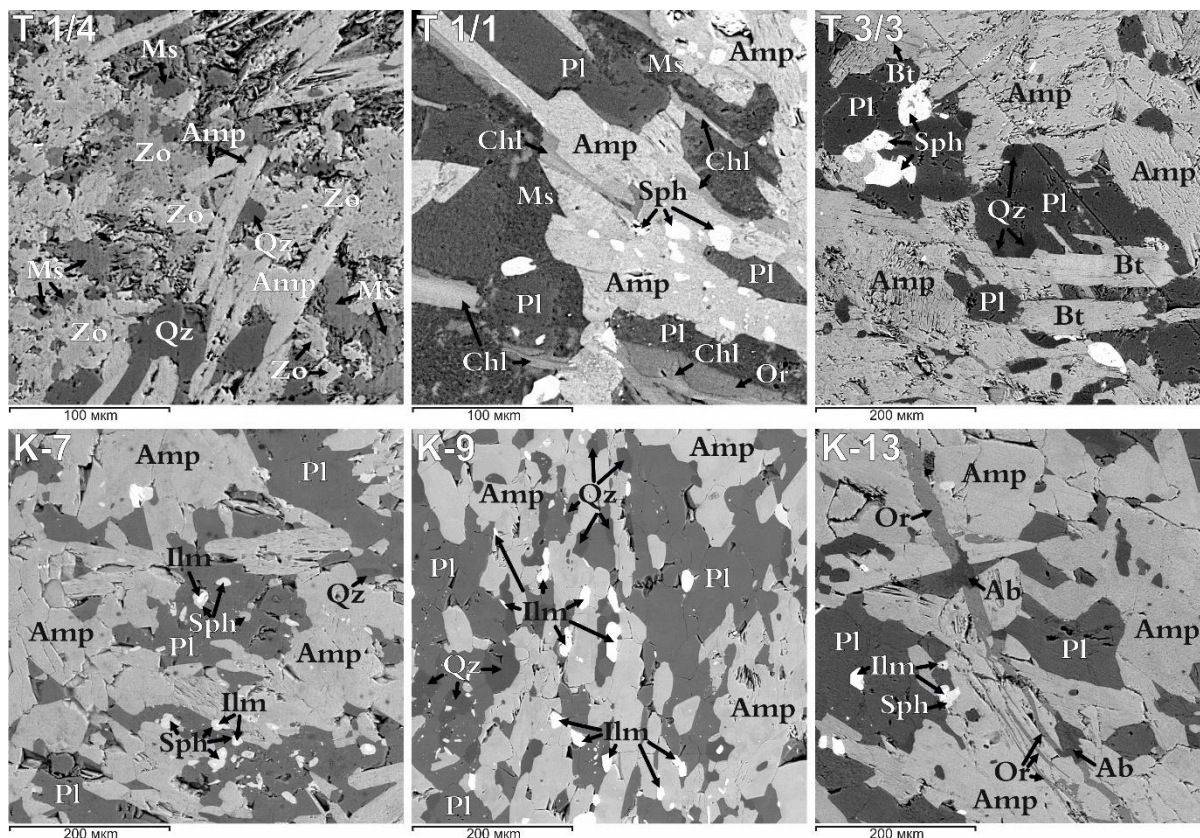


**Таблица 1.** Химический состав (мас. %) и структурные формулы минералов представительных амфиболитов  
**Table 1.** Chemical composition (wt. %) and structural formula of minerals in the representative amphibolites

Компонент Component	Метабазитовое проявление в бассейне р. Тырада/Metabasites from the Tyrada river basin												
	Т-1/4		Т-1/1				Т-3/3						
	Act		Hbl		Pl		Bt		Hbl		Pl		Bt
SiO <sub>2</sub>	55,25	55,32	43,73	43,25	58,40	58,69	36,31	42,36	42,15	61,08	58,56	39,53	
TiO <sub>2</sub>	0,00	0,00	0,35	0,43	0,00	0,00	0,58	0,49	0,65	0,00	0,00	2,13	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,68	3,08	13,35	13,16	25,63	25,87	17,56	13,46	12,47	23,71	22,94	16,33	
FeO	10,63	11,54	15,73	15,17	0,24	0,28	18,26	18,87	18,14	0,23	0,39	21,64	
MnO	0,39	0,49	0,23	0,23	0,00	0,00	0,00	0,32	0,24	0,00	0,00	0,00	
MgO	17,34	16,75	9,83	9,64	0,00	0,00	14,97	7,62	8,32	0,00	0,00	12,18	
CaO	12,92	13,03	12,10	11,80	7,89	7,70	0,00	11,05	11,43	5,68	5,53	0,00	
Na <sub>2</sub> O	0,00	0,00	1,27	1,47	6,93	6,96	0,31	1,89	1,46	7,45	7,35	0,00	
K <sub>2</sub> O	0,00	0,00	0,93	0,96	0,14	0,00	7,35	0,44	0,61	0,18	0,00	9,47	
Сумма/Amount	98,21	100,21	97,52	96,11	99,67	97,99	95,34	96,50	95,47	98,33	94,77	101,29	
(O)	(23)	(23)	(23)	(23)	(8)	(8)	(11)	(23)	(23)	(8)	(8)	(11)	
Si	7,826	7,708	6,515	6,530	2,631	2,633	2,715	6,469	6,500	2,750	2,739	2,834	
Ti	0,000	0,000	0,039	0,049	0,000	0,000	0,033	0,056	0,075	0,000	0,000	0,115	
Al	0,280	0,506	2,344	2,342	1,361	1,368	1,548	2,423	2,266	1,258	1,265	1,380	
Fe	1,259	1,345	1,960	1,915	0,000	0,000	1,142	2,410	2,339	0,009	0,015	1,297	
Mn	0,047	0,058	0,029	0,029	0,009	0,011	0,000	0,041	0,031	0,000	0,000	0,000	
Mg	3,661	3,478	2,183	2,169	0,000	0,000	1,668	1,734	1,912	0,000	0,000	1,302	
Ca	1,961	1,945	1,931	1,909	0,381	0,370	0,000	1,808	1,888	0,274	0,277	0,000	
Na	0,000	0,000	0,367	0,430	0,605	0,605	0,045	0,560	0,437	0,650	0,666	0,000	
K	0,000	0,000	0,177	0,185	0,008	0,000	0,701	0,086	0,120	0,010	0,000	0,866	
X <sub>Fe</sub>	0,256	0,279	0,473	0,469	–	–	0,406	0,581	0,550	–	–	0,499	
X <sub>Mg</sub>	0,744	0,721	0,527	0,531	–	–	0,594	0,419	0,450	–	–	0,501	
X <sub>An</sub>	1,000	1,000	0,780	0,756	0,383	0,379	–	0,737	0,772	0,293	0,294	–	
Компонент Component	Метабазитовое проявление в бассейне р. Малая Кадра/Metabasites from the Malaya Kadra river basin												
	K-7				K-9				K-13				
	Hbl		Pl		Hb		Pl		Hbl		Pl		
SiO <sub>2</sub>	44,62	44,12	60,60	63,21	43,62	44,66	59,83	62,47	43,17	45,57	59,22	59,88	
TiO <sub>2</sub>	0,60	0,61	0,00	0,00	0,41	0,41	0,00	0,00	0,36	0,41	0,00	0,00	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13,44	12,60	25,70	24,32	12,24	13,33	23,44	24,74	13,26	12,18	24,50	24,28	
FeO	18,82	18,98	0,36	0,44	17,47	18,35	0,00	0,34	17,83	17,76	0,00	0,27	
MnO	0,23	0,27	0,00	0,00	0,27	0,00	0,00	0,00	0,26	0,25	0,00	0,00	
MgO	8,22	7,96	0,00	0,00	8,83	8,71	0,00	0,00	8,22	9,10	0,00	0,00	
CaO	11,74	11,73	7,31	5,31	11,53	11,98	5,46	5,86	11,78	11,92	6,67	6,46	
Na <sub>2</sub> O	1,59	1,38	7,85	8,28	1,36	1,49	8,39	8,63	1,38	1,35	7,49	7,68	
K <sub>2</sub> O	0,36	0,37	0,00	0,00	0,24	0,27	0,00	0,00	0,31	0,26	0,00	0,00	
Сумма/Amount	99,62	98,02	101,82	101,56	95,97	99,20	97,12	102,04	96,57	98,80	97,88	98,57	
n(O)	(23)	(23)	(8)	(8)	(23)	(23)	(8)	(8)	(23)	(23)	(8)	(8)	
Si	6,560	6,609	2,658	2,756	6,630	6,573	2,734	2,722	6,538	6,712	2,689	2,702	
Ti	0,066	0,069	0,000	0,000	0,047	0,045	0,000	0,000	0,041	0,045	0,000	0,000	
Al	2,329	2,225	1,329	1,250	2,193	2,312	1,262	1,270	2,367	2,114	1,311	1,291	
Fe	2,314	2,378	0,013	0,016	2,221	2,258	0,000	0,012	2,258	2,187	0,000	0,010	
Mn	0,029	0,034	0,000	0,000	0,035	0,000	0,000	0,000	0,033	0,031	0,000	0,000	
Mg	1,801	1,777	0,000	0,000	2,000	1,911	0,000	0,000	1,856	1,998	0,000	0,000	
Ca	1,849	1,883	0,344	0,248	1,878	1,889	0,267	0,274	1,912	1,881	0,325	0,312	
Na	0,453	0,401	0,668	0,700	0,401	0,425	0,743	0,729	0,405	0,386	0,659	0,672	
K	0,068	0,071	0,000	0,000	0,047	0,051	0,000	0,000	0,060	0,049	0,000	0,000	
X <sub>Fe</sub>	0,562	0,572	–	–	0,526	0,542	–	–	0,549	0,523	–	–	
X <sub>Mg</sub>	0,438	0,428	–	–	0,474	0,458	–	–	0,451	0,477	–	–	
X <sub>An</sub>	0,780	0,800	0,340	0,262	0,808	0,799	0,265	0,273	0,804	0,812	0,330	0,317	

Примечание. Для плагиоклаза (Pl) приведены содержания анортитового компонента  $X_{An} = Ca/(Ca+Na+K)$ , для роговой обманки (Hb) и биотита (Bt) – железистость  $X_{Fe} = Fe/(Fe+Mg)$ . FeO представлено в форме суммарного железа. 0,00 – ниже порога обнаружения энергодисперсионного спектрометра. Структурные формулы минералов рассчитаны на определенное количество атомов кислорода, обозначенное как n(O).

Note. Anorthite component content for plagioclase (Pl) are given  $X_{An} = Ca/(Ca+Na+K)$ , the iron content for hornblende (Hb) and biotite (Bt) –  $X_{Fe} = Fe/(Fe+Mg)$ . The total iron is shown in the FeO-form. 0,00 means that concentration is below the level of detection of SEM. Minerals structural formulas designed for a fixed number of oxygen atoms denoted as n(O).



**Рис. 2.** Минеральный состав представительных образцов амфиболитовых проявлений в бассейнах рек Тырада (Т) и Малая Кадра (К). Фотографии растровой электронной микроскопии, режим съемки BSE (детектор отраженных электронов). Ab – альбит, Amp – амфибол, Bt – биотит, Chl – хлорит, Ilm – ильменит, Ms – мусковит, Or – ортоклаз, Pl – плагиоклаз, Qz – кварц, Spn – сфен, Zo – цоизит

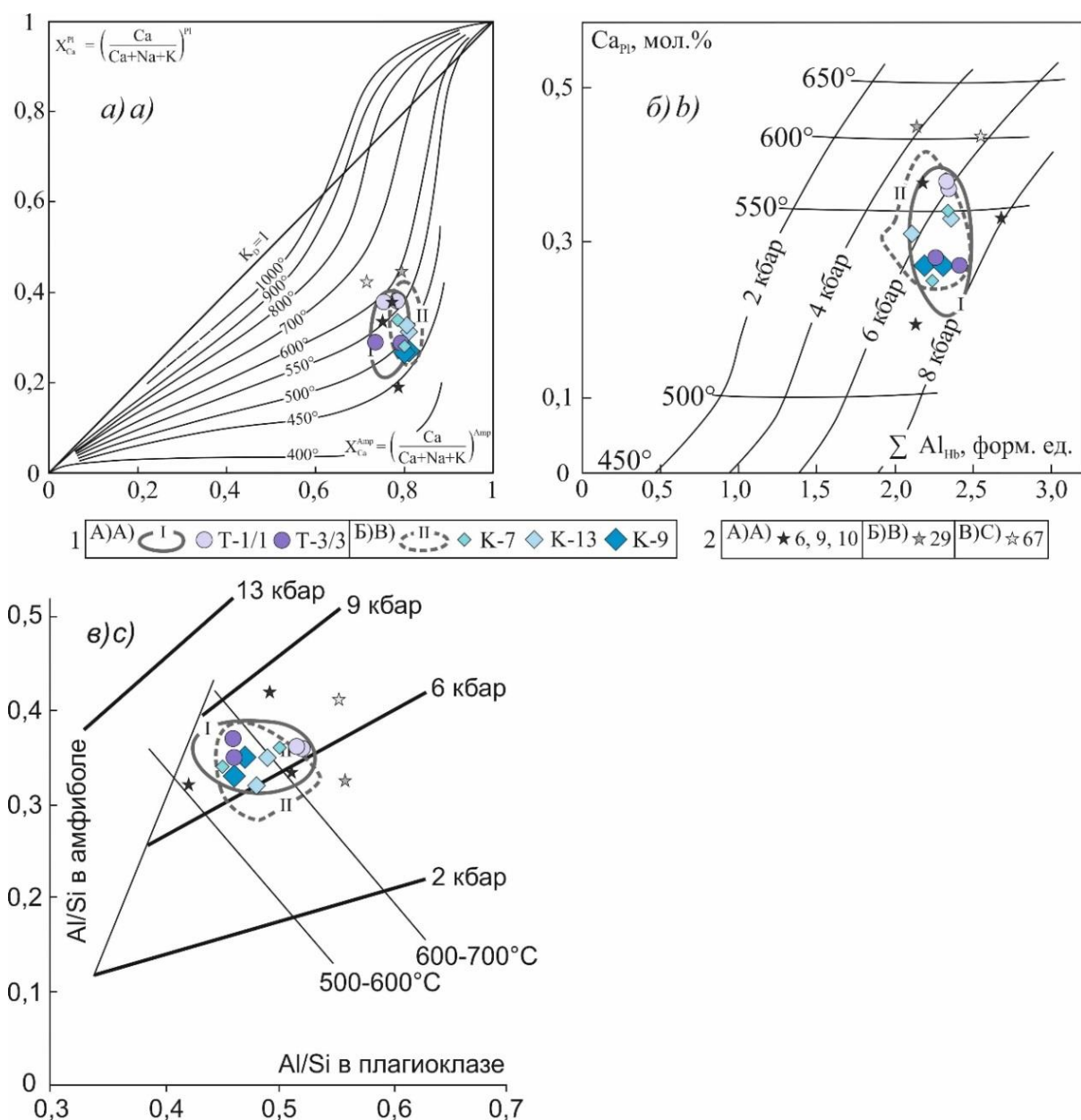
**Fig. 2.** Mineral composition of representative samples of amphibolite occurrences in the Tyrada (T) and Malaya Kadra (K) river basins. Photos of scanning electron microscopy. Mode-BSE (backscattered electrons detector). Ab – albite, Amp – amphibole, Bt – biotite, Chl – chlorite, Ilm – ilmenite, Ms – muscovite, Or – orthoclase, Pl – plagioclase, Qz – quartz, Spn – sphene, Zo – zoisite

Согласно международной классификации [32], кальциевый амфибол представлен роговой обманкой, а в безплагиоказовых образцах (Т-1/4) – актинолитом, со значениями железистости ( $X_{Fe}$ ) в диапазоне 0,48–0,58 и 0,25–0,29 соответственно. При этом на одном и том же участке образца этот показатель может варьировать от 0,01–0,03, местами до 0,06. Прослеживается прямая зависимость кремнистости от магниальности, которая укладывается в единый тренд эволюции составов амфиболов: от роговой обманки с незначительной примесью чермакитового компонента до кристаллизации актинолита (рис. 3). Во всех роговых обманках несущественные колебания содержания  $TiO_2$  (0,30–0,64 мас. %),  $K_2O$  (0,22–1,00 мас. %),  $Na_2O$  (1,08–1,57 мас. %) и  $MnO$  (до 0,32 мас. %) свидетельствует об их идентичности.

В роговообманковых образцах плагиоклаз незонален, состав его представительных зерен изменяется в диапазоне от олигоклаза до андезина ( $X_{An}=0,28–0,38$ ). В актинолитовом амфиболите (Т-1/4) плагиоклаз отсутствует полностью, цоизит выступает в качестве метаморфогенного продукта его изменения, а мусковит здесь представлен серицитом, большое количество которого, по всей вероятности, подтверждает наличие наложенного гидротермального метасоматоза. Также

серицитизация краевых зон плагиоклаза прослеживается в роговообманковых амфиболитах (I, Т-3/3). В качестве рудного компонента в ассоциацию входит ильменит. При этом зафиксирован факт его частичного или полного замещения сфеном (рис. 2, К-7, К-13 и Т-1/1, Т-3/3 соответственно). Очень редко встречаются зерна кварца, заполняющие пространство между зернами амфиболов и плагиоказов и входящие в состав родоначальных базальтов. Калиевый полевой шпат представлен микроклином, местами ортоклазом (до 10 и 30 мол. % альбита соответственно), выделяется поверх основной массы в виде линз и прожилков (или целой серии прожилков), размером не превышающих 0,05 мм, мощностью менее 40 мкм, и не имеет большого распространения. В отдельных представительных амфиболитах (II) встречаются криптопертиты, выраженные частичной метасоматической альбитизацией калиевого полевого шпата (рис. 2, К-13). Биотит редок, но представлен хорошо сформированными зернами. Их железистость ( $X_{Fe}$ ) варьирует от 0,42–0,43 (обр. Т-1/1) до 0,52 (обр. Т-3/3), что сопоставимо с железистостью ассоциированных с ними амфиболов (табл. 1). Хлориты встречаются локально, преимущественно в роговообманковых амфиболитах метаботритового проявления в бассейне р. Тырада, и





**Рис. 4.** P-T условия метаморфизма на амфибол-плагиоклазовых геотермобарометрах. Диаграммы отношений: а)  $Ca/(Ca+Na+K)$  в амфиболе и  $Ca/(Ca+Na+K)$  в плагиоклазе [26]; б) суммарного Al в амфиболе и Ca в плагиоклазе [25]; в) Al/Si плагиоклаза и амфибола [27]. 1 – область распределения фигуративных точек представительных образцов метабазитовых проявлений Шумихинского комплекса в бассейнах: А) р. Тырада, Б) р. Малая Кадра; 2 – фигуративные точки образцов амфиболитов Гаревского метаморфического комплекса по данным И.И. Лиханова и В.В. Ревердатто [12] в бассейнах: А) среднего течения р. Гаревка; Б) нижнего течения р. Гаревка; В) нижнего течения р. Тис

**Fig. 4.** P-T conditions of metamorphism on amphibole-plagioclase geothermobarometers. Diagrams of ratio: a)  $Ca/(Ca+Na+K)$  in amphibole and  $Ca/(Ca+Na+K)$  in plagioclase [26]; b) total Al in amphibole and Ca in plagioclase [25]; c) Al/Si of plagioclase and amphibole [27]. 1 – distribution area of data of representative samples of metabasite manifestations from the Shumikhinskiy complex in the river basins of: A) Tyrada, B) Malaya Kadra; 2 – data of amphibolites from the Garevsk metamorphic complex based on data of I.I. Likhanov, V.V. Reverdatto [12] in the basins of: A) the middle reaches of the Garevka; B) the lower reaches of the Garevka; C) the lower reaches of the Tis

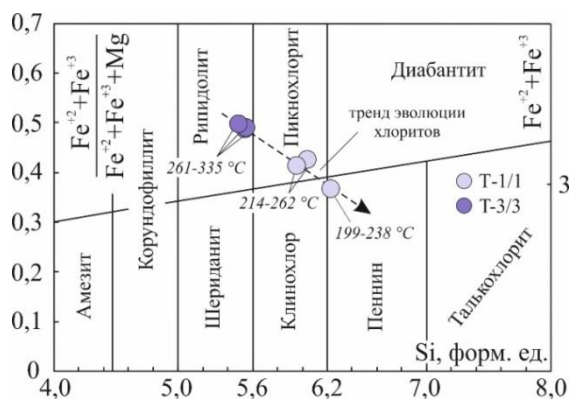
**Таблица 2.** Оценки P-T условий метаморфизма метабазитовых образований Заангарья по минеральным геотермобарометрам

**Table 2.** Estimates of P-T conditions of metabasic Transangare formations metamorphism using mineral geothermobarometers

Номер образца Sample number	1		2		3		4	
	T, °C	P, кбар P, kbar	T, °C	P, кбар P, kbar	T, °C	P, кбар P, kbar	T, °C	P, кбар P, kbar
T-1/1 T-3/3	Ортоамфиболиты шумихинского метапикрит-базальтового комплекса в бассейне р. Тырада Orthoamphibolites of the Shumikhinsky metapicritic-basalt complex from the Tyrada river basin							
	~550	5-7	545-550	~6-7	6,91-8,35			
K-7 K-9 K-13	Ортоамфиболиты шумихинского метапикрит-базальтового комплекса в бассейне р. Малая Кадра Orthoamphibolites of the Shumikhinsky metapicritic-basalt complex from the Malaya Kadra river basin							
	540-555	5,5-7	525-545	~6-7	6,88-8,32			
	540-545	5-7	485-500	~5,5-7	6,04-7,90			
	540-545	5,5-7,5	475-500	~6-7,5	6,55-8,38			
6 9 10 29	Ортоамфиболиты гаревского метаморфического комплекса в бассейне нижне-среднего течения р. Гаревка <sup>5</sup> Orthoamphibolites of the Garevsky metamorphic complex from the lower-middle course Garevka river basin <sup>5</sup>							
	~570	~5	~570	~6	7,02			
	~520	~7	~450	~7	6,79			
	~570	~8	~550	~8	9,54			
	~605	~4	~600	~5	6,82			
67	Ортоамфиболиты гаревского метаморфического комплекса в бассейне нижнего течения р. Тис <sup>5</sup> Orthoamphibolites of the Garevsky metamorphic complex from the lower course Tys river basin <sup>5</sup>							
	~600	~6	~650	~7	8,88			

Примечание. Геотермобарометры: 1 – Amp-Pl [26]; геотермометр: 2 – Amp-Pl [25]; геобарометры: 3 – Amp-Pl [27], 4 – [28], 5 – данные по [12].

Note. Geothermobarometers: 1 – Amp-Pl [26]; geothermometers: 2 – Amp-Pl [25]; geobarometers: 3 – Amp-Pl [27], 4 – [28], 5 – based on data of [12].



**Рис. 5.** Классификационная диаграмма хлоритов (Si к X<sub>Fe</sub>) по [33] и их температура кристаллизации. Фигуративные точки составов хлоритов в представительных образцах метабазитового проявления Шумихинского комплекса в бассейне р. Тырада: рипидолит (обр. T-3/3) и пикнохлорит-пеннин (обр. T-1/1). Стрелкой отображен тренд эволюции составов хлоритов на фоне снижения температуры их кристаллизации

**Таблица 3.** Химический состав (мас. %), структурные формулы и температуры кристаллизации представительных хлоритов (T, °C)

**Table 3.** Chemical composition (wt. %), crystallization temperature (T, °C) and the structural chlorites formula

Компонент Component	T-1/1			T-3/3		
SiO <sub>2</sub>	30,11	28,68	29,2	25,47	25,56	24,54
TiO <sub>2</sub>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17,28	18,84	18,55	19,82	19,52	19,21
FeO <sub>total</sub>	21,25	23,74	24,55	26,76	26,97	26,55
MnO	0,00	0,23	0,00	0,00	0,00	0,00
MgO	16,53	15,94	15,07	13,77	14,01	13,5
CaO	1,47	0,00	1,24	0,00	0,00	0,00
Na <sub>2</sub> O	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
K <sub>2</sub> O	1,25	0,78	0,00	0,00	0,00	0,00
Сумма Amount	87,89	88,21	88,61	85,81	86,07	83,79
n(O)	28	28	28	28	28	28
Si	6,220	5,950	6,033	5,533	5,545	5,481
Ti	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Al <sup>IV</sup>	1,780	2,050	1,967	2,467	2,455	2,519
Al <sup>VI</sup>	2,427	2,556	2,551	2,608	2,536	2,538
Fe <sub>total</sub>	3,671	4,119	4,242	4,862	4,893	4,959
Mn	0,000	0,040	0,000	0,000	0,000	0,000
Mg	5,089	4,929	4,641	4,459	4,530	4,494
Ca	0,325	0,000	0,275	0,000	0,000	0,000
Na	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
K	0,329	0,206	0,000	0,000	0,000	0,000
X <sub>Fe</sub>	0,419	0,455	0,478	0,522	0,519	0,525
T °C						
A	225	268	255	335	333	344
B <sup>1</sup>	207	235	226	279	278	285
B <sup>2</sup>	238	269	262	318	317	324
C	199	225	214	263	261	268

Примечание. X<sub>Fe</sub>=Fe<sub>total</sub>/(Fe<sub>total</sub>+Mg), геотермометры: A [29]; B [30]: 1 – без поправки на Al<sup>IV</sup>, 2 – с поправкой на Al<sup>IV</sup>; C [31]. FeO представлено в форме суммарного железа. 0,00 – ниже порога обнаружения энергодисперсионного спектрометра. Структурные формулы минералов рассчитаны на определенное количество атомов кислорода, обозначенное как n(O).

Note. X<sub>Fe</sub>=Fe<sub>total</sub>/(Fe<sub>total</sub>+Mg), geothermometers: A [29]; B [30]: 1 – without adjusting on Al<sup>IV</sup>, 2 – with adjusting on Al<sup>IV</sup>; C [31]. The total iron is in the FeO-form. 0,00 means that concentration is below the level of detection of SEM. Minerals structural formulas designed for a fixed number of oxygen atoms denoted as n(O).

**Fig. 5.** Chlorite classification diagram based on [33] and the temperature of chlorite crystallization. Chemical composition points of chlorites in representative samples of metabasite manifestation from the Shumikhinsky complex in the Tyrada river basin: ripidolite (sample T-3/3) and pseudobrookite-pennine (sample T-1/1). The arrow shows the change in chlorite compositions against the background of a temperature decrease of their crystallization

### Обсуждение результатов

На сегодняшний день существует несколько точек зрения относительно условий формирования и возраста ортоамфиболитов шумихинского метапикрит (метакатиит)-метабазальтового комплекса. По одним данным метабазитовые ассоциации образовались в геодинамической обстановке растяжения в условиях гранулитовой и гранат-силлиманитовой зон амфиболитовой фации (750–850 °С и 8–9 кбар) и имеют позднеархейский возраст по Rb-Sr изотопии (~2531 млн лет) [13]. Более современные исследования включают шумихинские ортоамфиболиты в единый полиметаморфический комплекс, сформированный в обстановке растяжения и сжатия континентальной коры в позднем рифее (~980–880 млн лет) в условиях амфиболитовой и эпидот-амфиболитовой фаций метаморфизма (581–631 °С, 7,7–8,6 кбар и 461–547 °С и 3,9–4,9 кбар соответственно) [15, 21, 22]. В ходе данного исследования вышеизложенные результаты позволяют выделить как минимум два неопротерозойских эволюционных события, отразившихся на метабазитовых породных комплексах Заангарья.

Первое событие повлекло за собой образование единого устоявшегося парагенезиса исследуемых метабазитов в условиях метаморфизма низкотемпературных зон амфиболитовой фации в температурном интервале 475–550 °С и давлении 5–7,5 кбар. Значительный рост давления при небольшом уменьшении температуры можно объяснить утолщением земной коры в результате надвиговых процессов на общем фоне эксгумации тектонических блоков в верхние структурные этажи. В этом случае метаморфизованный блок был лежащим относительно плоскости смещения, а из этого следует, что направление смещения происходило в сторону Сибирского кратона, и данное метаморфическое событие стоит относить ко второму коллизионному этапу с участием надвигов, датированному ~800 млн лет назад [18, 20, 21, 34, 35]. Несоответствие этой цифре полученных данных по Ar-Ar-изотопии (707–675 млн лет) указывает на перестройку изотопной системы амфибола в результате повторного теплового воздействия на амфиболиты после или во время их остывания.

Со вторым событием связан процесс калишпатизации, повлекший за собой образование микроклина/ортоклаза при температуре ≤500 °С с дальнейшим наложением процессов альбитизации, имеющих аутометасоматическую природу возникновения. Этап частичной гранитизации имеет унаследованный характер, вероятно, при участии высокотемпературных флюидов при заложении неопротерозойских лейкогранитов, в значительной степени обогащенных калием. Распространенные в пределах Татаро-Ишимбинской зоны разломов синколлизионные аяхтинские (760–750 млн лет) и/или анорогенные татарские (680–630 млн лет) гранитоиды, входящие в татаро-аяхтинский гранитовый комплекс ( $\gamma R_3ta$ ) [36], могли стать причиной омоложения возраста исследуемых метабазитов. Частичная хлоритизация и актинолитизация (344–199 °С), а также последующие ста-

дии более низкотемпературных гидратермальных изменений, включающие в себя процессы серицитизации и сосюритизации, являются показателем краткосрочных фаз гидротермального воздействия в условиях остывания коллизионных гранитоидов. Наличие или отсутствие этих вторичных изменений в метабазальтах объясняется локальностью гидротерм, неравномерно разогревающих породный комплекс. Этому свидетельствует прямая зависимость Si к  $X_{Fe}$  в хлоритах по мере уменьшения температуры их кристаллизации. В совокупности с локальным присутствием зерен актинолита (обр. Т-1/4) образование хлоритов подтверждает факт вторичного влияния нового источника разогрева, вероятно, спровоцировавшего открытие изотопной системы в амфиболе, в результате чего произошло омоложение возраста амфиболитов. Верхний порог температур нагрева мог быть выше и соответствовать эффективной температурной зоне закрытия изотопной системы в амфиболах равной 420 °С [34], но в связи со своей краткосрочностью не повлекший значительных изменений.

Докембрийские амфиболитовые тела в толщах позднеархейской (?) малогаревской метасерии (шумихинский метапикрит-базальтовый комплекс?) также выделяются в пределах гаревского метаморфического комплекса (ГМК) вдоль разрывных нарушений Приенисейской зоны разломов [12]. Данные метабазитовые образования также ассоциируются с неопротерозойскими лейкогранитами возрастом 750–720 млн лет, относящимся к постколлизионному глушихинскому гранитоидному комплексу ( $l\gamma R_3g$ ) [36], что вызывает интерес в контексте данного исследования. Формирование микроклин-цоизитовых ортоамфиболитов авторы описывают в два этапа. На первом этапе породы погружаются в среднюю часть континентальной коры и перекристаллизовываются в условиях средней-верхней части амфиболитовой фации регионального метаморфизма ( $P=7,7-8,6$  кбар и  $T=582-631$  °С; ~960 млн лет). Второй этап имеет сходство с эволюционными событиями, описанными выше в рамках данного исследования: позднерифейский коллизионный метаморфизм в условиях эпидот-амфиболитовой фации ( $P=3,9-4,9$  кбар,  $T=461-547$  °С; ~880 млн лет) и поздний низкотемпературный метаморфизм мусковит-хлоритовой субфации фации зеленых сланцев, отражающий низкотемпературные изменения средне-высокотемпературных пород ГМК при их эксгумации [15]. По данным химических составов минеральных фаз, приведенным авторами указанной статьи, были пересчитаны P-T условия образования амфиболитов с использованием вышеописанных геотермобарометров. Полученные результаты (табл. 2, рис. 4) имеют сходство с результатами вышеприведенных авторов. Схожесть химического состава амфиболов ГМК и его преобразование в процессе их перекристаллизации, которое укладывается в общий тренд закономерного изменения роговых обманок исследуемых амфиболитов (рис. 3), а также одинаковые минеральные ассоциации, сформированные наложенными процессами,

позволяют утверждать, что сравниваемые метабазитовые комплексы являются производными одних и тех же геодинамических событий, происходивших в Заангарье ~880–800 млн лет назад.

#### Выводы

1. Наряду со сходством состава петрогенных и редких элементов [23] одинаковый минеральный парагенезис заангарских амфиболитов в бассейнах рек Тырада и Малая Кадра позволяет говорить о них, как об одном амфиболитовом комплексе. А термодинамические условия их образования указывают на то, что они являются производными одного и того же метаморфического процесса.
2. Проведенные анализы и расчеты позволяют выделить основную фазу эволюции метаморфитов, соответствующую эпидот-амфиболитовой фации коллизионного метаморфизма и действующую без перерыва на протяжении длительного времени в условиях надвига. Это может быть сопряжено с

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pearce J.A. Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust // *Lithos* – 2008. – № 100. – P. 14–48.
2. Богатиков О.А., Коваленко В.И., Шарков Е.В. Магматизм, тектоника, геодинамика Земли // *Труды Института геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии* (новая серия). Вып. 3 / под ред. В.В. Ярмолюк. – М.: Наука, 2010. – 606 с.
3. Dilek Y., Furnes H. Ophiolite genesis and global tectonics: geochemical and tectonic fingerprinting of ancient oceanic lithosphere // *Geological Society of America Bulletin*. – 2011. – № 123. – P. 387–411.
4. Попов Н.В., Лиханов И.И., Ножкин А.Д. Мезопротерозойский гранитоидный магматизм в Заангарской части енисейского кряжа: результаты U–Pb-исследований // *Доклады академии наук* – 2010. – Т. 431. – № 4. – С. 509–515.
5. Козлов П.С., Лиханов И.И. Мезо-неопротерозойская эволюция Заангарья Енисейского кряжа // *Геодинамика раннего докембрия: сходства и различия с фанерозоем* – Петрозаводск: Карельский научный центр Российской академии наук, 2017. – С. 121–126.
6. Докембрийская эволюция Заангарья Енисейского кряжа как отражение тектонических событий на западной окраине Сибирского кратона / А.А. Крылов, И.И. Лиханов, А.Д. Ножкин, В.В. Ревердатто, П.С. Козлов // *Петрология магматических и метаморфических комплексов* – Томск: Томский центр научно-технической информации, 2017. – С. 265–270.
7. Ernst R.E. Large igneous provinces. – Cambridge: Cambridge University Press, 2014. – 630 p.
8. Рабочая схема корреляции магматических и метаморфических комплексов Енисейского кряжа / Т.Я. Корнев, Л.К. Качевский, А.Д. Ножкин, В.М. Даценко, А.А. Стороженко, К.А. Заблочкин, А.П. Романов // *Региональные схемы корреляции магматических и метаморфических комплексов Алтае-Саянской складчатой области*. – Новосибирск: СНИИГГИМС, 1999. – С. 17–46.
9. Неопротерозойский рифтогенный и внутриплитный магматизм Енисейского кряжа как индикатор процессов распада Родинии / А.Д. Ножкин, О.М. Туркина, Т.Б. Баянова, Н.Г. Бережная, А.Н. Ларионов, А.А. Постников, А.В. Травин, Р.Е. Эрнст // *Геология и геофизика* – 2008. – Т. 49. – № 7. – С. 666–688.
10. Ножкин А.Д., Качевский Л.К., Дмитриева Н.В. Позднепротерозойская рифтогенная метариолит-базальтовая ассоциация глушихинского прогиба (Енисейский кряж): петрогеохимический состав, возраст и условия образования // *Геология и геофизика* – 2013. – Т. 54. – № 1. – С. 58–71.

аккрецией отколовшегося от Сибирского кратона микроконтинента к Центрально-Ангарскому террейну около 800 млн лет назад [18, 35, 37].

3. Вторичное воздействие на сформированный парагенезис могло быть спровоцировано заложением развитых в регионе синколлизийных/постколлизийных неопротерозойских гранитоидов (760–630 млн лет назад) [36–41], что, вероятно, послужило причиной омоложения абсолютного возраста исследуемых амфиболитов (707–675 млн лет).

Вышеизложенное укладывается в полиметаморфическую модель формирования современного облика юго-западного обрамления Сибирского кратона, отражающую процессы рассеянного рифтогенеза при участии плюмовой активности, инициированного распадом суперконтинента Родиния [42–44], и коллизийные процессы в пределах трансформных разломов на завершающей стадии гренвилльских тектонических событий [45].

11. Туркина О.М., Ножкин А.Д. Геохимия и вопросы генезиса метабазитов из гранулит-гнейсового комплекса Ангаро-Канского блока (Юго-запад Сибирского кратона) // *Геохимия* – 2014. – № 10. – С. 892–906.
12. Лиханов И.И., Ревердатто В.В. Неопротерозойские комплексы-индикаторы континентального рифтогенеза как свидетельство процессов распада Родинии на западной окраине Сибирского кратона // *Геохимия* – 2015. – № 8. – С. 675–694.
13. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (третье поколение). Серия Ангаро-Енисейская. Лист О-46 – Красноярск. Объяснительная записка. – СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2009. – 500 с.
14. Чингасанская серия неопротерозоя Енисейского кряжа: Новые данные о возрасте и условиях формирования / А.Д. Ножкин, А.А. Постников, А.В. Наговицин, А.В. Травин, А.М. Станевич, Д.С. Юдин // *Геология и геофизика* – 2007. – Т. 48. – № 12. – С. 1307–1320.
15. Тектонометаморфическая эволюция гаревского полиметаморфического комплекса Енисейского кряжа / П.С. Козлов, И.И. Лиханов, В.В. Ревердатто, С.В. Зиновьев // *Геология и геофизика* – 2012. – Т. 53. – № 11. – С. 1476–1496.
16. Верниковский В.А., Верниковская А.Е. Тектоника и эволюция гранитоидного магматизма Енисейского кряжа // *Геология и геофизика* – 2006. – № 1. – С. 35–52.
17. Neoproterozoic accretionary and collisional events on the western margin of the Siberian Craton: new geological and geochronological evidence from the Yenisei Ridge / V.A. Vernikovskiy, A.E. Vernikovskaya, A.B. Kotov, E.B. Salmikova, V.P. Kovach // *Tectonophysics*. – 2003. – V. 375. – № 1–4. – P. 147–168.
18. Гренвилльские тектонические события и эволюция Енисейского кряжа, западная окраина Сибирского кратона / И.И. Лиханов, А.Д. Ножкин, В.В. Ревердатто П.С. Козлов // *Геотектоника*. – 2014. – Т. 50. – № 5. – С. 32–53.
19. Kuzmichev A.B., Sklyarov E.V. The Precambrian of Transangaria, Yenisei ridge (Siberia): Neoproterozoic microcontinent, grenville-age orogen, or reworked margin of the Siberian craton? // *Journal of Asian Earth Sciences* – 2016. – V. 115. – № 1. – P. 419–441.
20. Первые петрологические свидетельства субдукции на западной окраине Сибирского кратона / И.И. Лиханов, П.С. Козлов, К.А. Савко, С.В. Зиновьев, А.А. Крылов // *Доклады академии наук*. – 2019. – Т. 484. – № 2. – С. 209–2014.
21. Likhanov I.I., Nozhkin A.D., Savko K.A. Accretionary tectonics of rock complexes in the western margin of the Siberian craton // *Geotectonics*. – 2018. – V. 52. – P. 22–44.
22. Likhanov I.I. Mass-transfer and differential element mobility in metapelites during multistage metamorphism of Yenisei ridge, Siberia // *Geological society special publication*. – 2019. – V. 478. – P. 89–115.

23. Метабазитовые породы Среднего Заангарья, Енисейский край: е-топб реликты неопротерозойской литосферы / В.В. Врублевский, Р.Н. Никитин, П.А. Тишин, А.В. Травин // Литосфера. – 2017. – Т. 17. – № 5. – С. 67–84.
24. Заангарский щелочной интрузив, Енисейский край: Rb–Sr, Sm–Nd-изотопный возраст пород и источники фельдшпатоидных магм в позднем докембрии / А.М. Сазонов, В.В. Врублевский, И.Ф. Гертнер, А.В. Федорова, В.В. Гавриленко, Е.А. Звягина, С.И. Леонтьев // Доклады Академии наук. – 2007. – Т. 413. – № 16. – С. 798–802.
25. Плюснина Л.П. Экспериментальное исследование равновесий метабазитов, геотермобарометрия // Эксперимент в решении актуальных задач в геологии: сб. науч. трудов. – М.: Наука, 1986. – С. 174–183.
26. Перчук Л.Л. Равновесия породообразующих минералов. – М.: Наука, 1970. – 390 с.
27. Ферштатер Г.Б. Эмпирический плагиоклаз-рогообманковый барометр // Геохимия. – 1990. – № 3. – С. 328–335.
28. Hammarstrom J.M. Aluminum in hornblende: an empirical igneous geobarometer // American Mineralogist. – 1986. – № 71. – P. 1297–1313.
29. Cathelineau M. Cation site in chlorites and illites as a function of temperature // Clay Minerals. – 1988. – № 23. – P. 471–485.
30. Kranidiotis P., Maclean W.H. Systematics of chlorite alteration at the Phelps Dodge massive sulfide deposit // Economic Geology. – 1987. – № 82. – P. 1898–1911.
31. Fayek M., Kyser T.K. Characteristics of auriferous and barren fluids associated with the Proterozoic // Economic Geology. – 1995. – № 90. – P. 385–406.
32. Leake B.E. Nomenclature of amphiboles: report of the subcommittee on amphiboles of the commission on new minerals and mineral names of the international mineralogical association (CNMMN IMA) // PROC. RMS. – 1997. – № 6. – P. 82–102.
33. Hey M.H. A new review of the chlorites // Mineralogical Magazine. – 1954. – № 30. – P. 277–292.
34. Травин А.В. Термохронология субдукционно-коллизийных, коллизийных событий Центральной Азии: дис. ... д-ра наук. – Новосибирск, 2016. – 320 с.
35. Лиханов И.И., Ревердатто В.В., Козлов П.С. Коллизийные метаморфические комплексы енисейского края: особенности эволюции, возрастные рубежи и скорость эксгумации // Геология и геофизика. – 2011. – № 10. – С. 1593–1611.
36. Лейкогранитный магматизм а-типа в эволюции континентальной коры западного обрамления Сибирского кратона / А.Е. Верниковская, В.А. Верниковский, Е.Б. Сальникова, А.Б. Котов, В.П. Ковач, А.В. Травин, М.Т. Вингейт // Геология и геофизика. – 2007. – Т. 48. – № 1. – С. 5–21.
37. Верниковский В.А., Верниковская А.Е. Тектоника и эволюция гранитоидного магматизма Енисейского края // Геология и геофизика. – 2006. – № 1. – С. 35–52.
38. Likhonov I.I., Santosh M. A-type granites in the western margin of the Siberian craton: implications for breakup of the Precambrian supercontinents Columbia/Nuna and Rodinia // Precambrian Research. – 2019. – V. 328. – P. 128–145.
39. Likhonov I.I., Nozhkin A.D., Reverdatto V.V. Early stages of the evolution of the paleoasian ocean on the western margin of the Siberian craton: evidence from geochronological and geochemical studies of Yenisei ridge // Doklady earth sciences – 2017. – V. 476. – P. 1089–1093.
40. Likhonov I.I., Reverdatto V.V., Savko K.A. Bimodal intraplate magmatism of the Yenisei ridge as evidence of breakup of Rodinia and opening of the paleoasian ocean at the western margin of the Siberian craton // Doklady earth sciences. – 2017. – V. 476. – P. 1217–1221.
41. Late vendian postcollisional leucogranites of Yenisei ridge / A.D. Nozhkin, I.I. Likhonov, V.V. Reverdatto, S.V. Zinoviev, N.V. Dmitrieva, T.B. Bayanova, P.S. Kozlov, N.V. Popov // Doklady earth sciences. – 2017. – V. 474. – P. 674–679.
42. Meert J.G., Powell C.M. Assembly and break-up of Rodinia: introduction to the special volume // Precambrian Research. – 2001. – № 110. – P. 1–8.
43. Meert J.G., Torsvik T.H. The making and unmaking of a supercontinent: Rodinia revisited // Tectonophysics. – 2003. – № 375. – P. 261–288.
44. Kuznetsov N.B., Meert J.G., Romanyuk T.V. Ages of detrital zircons (U/Pb, LA-ICP-MS) from the latest neoproterozoic-middle cambrian(?) Asha group and early devonian takaty formation, the southwestern urals: a test of an australia-baltica connection within Rodinia // Precambrian Research. – 2014. – V. 244. – № 1. – P. 288–305.
45. Ножкин А.Д., Попов Н.В., Дмитриева Н.В., Стороженко А.А., Васильев Н.Ф. Неопротерозойские коллизийные S-гранитоиды Енисейского края: петрогеохимические особенности, U–Pb, Ar–Ar, Sm–Nd изотопные данные // Геология и геофизика. – 2015. – Т. 56. – № 5. – С. 881–889.

Поступила 03.06.2020 г.

#### Информация об авторах

**Никитин Р.Н.**, инженер-исследователь Центра коллективного пользования «Аналитический центр геохимии природных систем» Национального исследовательского Томского государственного университета.



UDC 551.251:552.13:552.16

## MINERALOGICAL FEATURES AND P-T CONDITIONS OF METAMORPHISM OF NEOPROTEROZOIC METABASITES FROM THE TYRADA AND MALAYA KADRA RIVER BASINS, YENISEI RIDGE

**Radim N. Nikitin,**  
radim.geo@mail.ru

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

**The relevance of the work.** Today it is considered that metabasite rock associations widespread in the Trans-Angara part of the Yenisei Ridge are products of rifting processes caused by activity of plume and breakdown of the Rodinia supercontinent during ~1100–700 Ma. In this case, data on their absolute age are the subject of discussion. The paper considers the Neoproterozoic metamorphic events using thermodynamic features of formation of the studied amphibolite manifestations as an example and their place in geodynamic model of formation of the Yenisei Ridge, as well as the role of syn/postcollisional granitoid magmatism in age rejuvenation of Transangara amphibolites.

**The aim** of the research is to establish the main mineral paragenesis of amphibolites and their secondary mineralization; determine the thermodynamic conditions of metamorphism and its main stages; correlate the nature of metamorphism with the metamorphic events of the region and determine its role in the formation of the modern appearance of the Yenisei Ridge; identify the reasons responsible for the mismatch between the age of the studied amphibolites according to the Ar-Ar isotopy and the accepted dating the Zaangarya metabasalts.

**Objects:** amphibolites of the Shumikhinsky metapicritic-basalt complex, which is a part of the malogarevskaya metamorphic series of the Late Archean age (?) occurring among carbonate rocks and crystalline schists in the valleys of the Tyrad and Malaya Kadra river basins and the Tei and Panimba tributaries respectively.

**Methods.** Chemical composition of the mineral phases was obtained using an analytical complex for scanning electron microscopy and microanalysis based on a TESCAN VEGA II LMU scanning electron microscope, combined with an Oxford INCA Energy 350 in the Center for Collective Use «Analytical Center of the Geochemistry of Natural Systems» of the National Research Tomsk State University. Based on the data the crystal chemical formulas of minerals were calculated, classification and geothermobarometric diagrams were constructed.

**Results.** The authors established general paragenesis of amphibolites of the studied manifestations: Hbl+Pl ( $X_{An}=0,28-0,38$ )+Qz+Ilm (Sph)+Fsp with secondary local development of Act, Zo, Bt, Ms and Chl. Thermodynamic parameters of metamorphism of metabasites correspond to the conditions of low-temperature zones of the amphibolite facies (555–475 °C, 5–7,5 kbar) with the dynamics of pressure increase against the general background of gradual cooling. Amphibolites are derivatives of collision metamorphism (~880–800 Ma), which appeared in the accretionary conditions of previously split tectonic blocks of the Siberian craton. The local development of potassium feldspar, actinolization, and chloritization (344–199 °C) refers to superimposed processes under reheating conditions and may be associated with the final stage of the Grenville tectonic events accompanied by syn/postcollisional granitoid magmatism (yRsta, 760–630 Ma). It could become a cause of age rejuvenation of the studied metabasites (707–675 Ma).

### Key words:

Amphibolites, neoproterozoic collision metamorphism, epidote-amphibolite facies, P-T conditions, age of metamorphism, Yenisei Ridge.

### REFERENCES

- Pearce J.A. Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust. *Lithos*, 2008, no. 100, pp. 14–48.
- Bogatikov O.A., Kovalenko V.I., Sharkov E.V. *Magmatizm, tektonika, geodinamika Zemli. Trudy Instituta geologii rudnykh mestorozhdeniy, petrografii, mineralogii i geokhimii (novaya seriya)* [Magmatism, tectonics, geodynamics of the Earth. Proceedings of the Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry (new series)]. Moscow, Nauka Publ., 2010. 606 p.
- Dilek Y., Furnes H. Ophiolite genesis and global tectonics: geochemical and tectonic fingerprinting of ancient oceanic lithosphere. *Geological Society of America Bulletin*, 2011, no. 123, pp. 387–411.
- Popov N.V., Likhonov I.I., Nozhkin A.D. Mezoproterozoyskiy granitoidnyy magmatizm v Zaangarskoy chasti yeniseyskogo kryazha: rezultaty U–Pb-issledovaniy [Mesoproterozoic granitoid magmatism in the Zaangarsky part of the Yenisei Ridge: results of U–Pb studies]. *Doklady akademii nauk*, 2010, vol. 431, no. 4, pp. 509–515.
- Kozlov P.S., Likhonov I.I. Mezo-neoproterozoyskaya evolyutsiya Zaangarya Yeniseyskogo kryazha [Meso-Neoproterozoic evolution of the Zaangarya of the Yenisei Ridge]. *Geodinamika rannego dokembriya: skhodstva i razlichiya s fanerozoyem* [Geodynamics of early Precambrian: similarities and differences with the Phanerozoic]. Petrozavodsk, Karelia scientific centre of the RAS, 2017. pp. 121–126.
- Krylov A.A., Likhonov I.I., Nozhkin A.D., Reverdatto V.V., Kozlov P.S. Dokembriyskaya evolyutsiya Zaangarya Yeniseyskogo kryazha kak otrazheniye tektonicheskikh sobyitiy na zapadnoy okraine Sibirskogo kratona [Precambrian evolution of the Zaangara of the Yenisei Ridge as a reflection of tectonic events on the western outskirts of the Siberian Craton]. *Petrologiya magmaticheskikh i metamorficheskikh kompleksov* [Petrology of igneous and metamorphic complexes]. Tomsk, Tomsk center of science-technical information, 2017. pp. 265–270.
- Ernst R.E. *Large igneous provinces*. Cambridge, Cambridge University Press, 2014. 630 p.
- Kornev T.Ya., Kachevskiy L.K., Nozhkin A.D., Datsenko V.M., Storozhenko A.A., Zablotskiy K.A., Romanov A.P. Rabochaya skhema korrelyatsii magmaticheskikh i metamorficheskikh kompleksov Yeniseyskogo kryazha [Working correlation scheme for magmatic and metamorphic complexes of the Yenisei Ridge]. *Regionalnye skhemy korrelyatsii magmaticheskikh i metamorficheskikh kompleksov Altae-Sayanskoy skladchatoy oblasti* [Regional correlation schemes of magmatic and metamorphic complexes of the Altai-Sayan folded region]. Novosibirsk, SNIIGGIMS Publ., 1999. pp. 17–46.
- Nozhkin A.D., Tupkina O.M., Bayanova T.B. Bepezhnaya N.G., Lapionov A.N., Pochtnikov A.A., Tpvav A.V., Epnct P.E. Neoproterozoyskiy piftogenny i vnutriplitnyy magmatizm Yeniseyskogo kryazha kak indikator protsessov raspada Rodinii [The Neoproterozoic riftogenic and intraplate magmatism of the

- Yenisei ridge as an indicator of the decay processes of the Line]. *Geologiya i geofizika*, 2008, vol. 49, no. 7, pp. 666–688.
10. Nozhkin A.D., Kachevskiy L.K., Dmitrieva N.V. Pozdneoproterozoyskaya riftogennaya metariorolit-bazaltovaya assotsiatsiya glushikhinskogo progiba (Yeniseyskiy kryazh): petrogeokhimicheskiy sostav, vozrast i usloviya obrazovaniya [Late Neoproterozoic riftogenic metariorolit-basalt association of the Glushikhinsky trough (Yenisei Ridge): petrogeochemical composition, age, and formation conditions]. *Geologiya i geofizika*, 2013, vol. 54, no. 1, pp. 58–71.
  11. Turkina O.M., Nozhkin A.D. Geokhimiya i voprosy genezisa metabazitov iz granulito-gneysovogo kompleksa Angaro-Kanskogo bloka (Yugo-zapad Sibirskogo kratona) [Geochemistry and questions of the genesis of metabasites from the granulite-gneiss complex of the Angara-Kan block (South-West of the Siberian craton)]. *Geokhimiya*, 2014, no. 10, pp. 892–906.
  12. Likhanov I.I., Reverdatto V.V. Neoproterozoyskie komplekso-indikatoriy kontinentalnogo riftogeneza kak svidetelstvo protsessov raspada Rodinii na zapadnoy okraine Sibirskogo kratona [Neoproterozoic indicator complexes of continental riftogenesis as evidence of the decay of Rodinia on the western edge of the Siberian craton]. *Geokhimiya*, 2015, no. 8, pp. 675–694.
  13. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii. Masshtab 1:1000000 (tret'ye pokoleniye). Seriya Angaro-Yeniseyskaya. List O-46. Obyasnitelnaya zapiska [State geological map of the Russian Federation. Scale 1:1000000 (third generation). Series Angara-Yenisei. Sheet O-46. Explanatory note]. St. Petersburg, Kartograficheskaya fabrika VSEGEI Publ., 2009. 500 p.
  14. Nozhkin A.D., Pochtikov A.A., Nagovitsin A.V., Tpavin A.V., Stanevich A.M., Yudin D.S. Chingasanskaya seriya neoproterozoya Yeniseyskogo kpyazha: Noveye dannye o vozpaste i usloviyakh fopmipovaniya [The Chingasan neoproterozoic series of the Yenisei Ridge: New data on the age and conditions of formation]. *Geologiya i geofizika*, 2007, vol. 48, no. 12, pp. 1307–1320.
  15. Kozlov P.S., Likhanov I.I., Reverdatto V.V., Zinoviyev S.V. Tektonometamorficheskaya evolyutsiya garevskogo polimetamorficheskogo kompleksa Yeniseyskogo kryazha [Tectonometamorphic evolution of the Garevsky polymetamorphic complex of the Yenisei Ridge]. *Geologiya i geofizika*, 2012, vol. 53, no. 11, pp. 1476–1496.
  16. Vernikovskiy V.A., Vernikovskaya A.E. Tektonika i evolyutsiya granitoidnogo magmatizma Yeniseyskogo kryazha [Tectonics and evolution of granitoid magmatism of the Yenisei Ridge]. *Geologiya i geofizika*, 2006, no. 1, pp. 35–52.
  17. Vernikovskiy V.A., Vernikovskaya A.E., Kotov A.B., Salnikova E.B., Kovach V.P. Neoproterozoic accretionary and collisional events on the western margin of the Siberian Craton: new geological and geochronological evidence from the Yenisei Ridge. *Tectonophysics*, 2003, vol. 375, no 1–4, pp. 147–168.
  18. Likhanov I.I., Nozhkin A.D., Reverdatto V.V., Kozlov P.S. Grenvil'skiye tektonicheskiye sobytiya i evolyutsiya Yeniseyskogo kryazha, zapadnaya okraina Sibirskogo kratona [Grenville tectonic events and the evolution of the Yenisei Ridge, the western outskirts of the Siberian craton]. *Geotektonika*, 2014, vol. 50, no. 5, pp. 32–53.
  19. Kuzmichev A.B., Sklyarov E.V. The Precambrian of Transangaria, Yenisei ridge (Siberia): Neoproterozoic microcontinent, grenville-age orogen, or reworked margin of the Siberian craton? *Journal of Asian Earth Sciences*, 2016, vol. 115, no. 1, pp. 419–441.
  20. Likhanov I.I., Krylov A.A., Kozlov P.S., Zinoviev S.V., Savko K.A. The first petrological evidence for subduction at the western margin of the Siberian craton. *Doklady earth sciences*, 2019, vol. 484, no. 1, pp. 79–83.
  21. Likhanov I.I., Nozhkin A.D., Savko K.A. Accretionary tectonics of rock complexes in the western margin of the Siberian craton. *Geotectonics*, 2018, vol. 52, pp. 22–44.
  22. Likhanov I.I. Mass-transfer and differential element mobility in metapelites during multistage metamorphism of Yenisei ridge, Siberia. *Geological society special publication*, 2019, vol. 478, pp. 89–115.
  23. Vrublevskiy V.V., Nikitin R.N., Tishin P.A., Travin A.V. Metabasite rocks of the Middle Zaangarye, Yenisei Ridge: e-morb relics of the Neoproterozoic lithosphere. *Litosfera*, 2017, vol. 17, no. 5, pp. 67–84. In Rus.
  24. Sazonov A.M., Vrublevskiy V.V., Gertner I.F., Fedorova A.V., Gavrilenko V.V., Zvyagina E.A., Leontyev S.I. Zaangarskiy shchelochnoy intruziv, Yeniseyskiy kryazh: Rb–Sr, Sm–Nd izotopny vozrast porod i istochniki feldshpatoidnykh magm v pozdnem dokembrii [Zaangarsk alkaline intrusion, Yenisei Ridge: Rb – Sr, Sm – Nd isotopic age of rocks and sources of feldspathoid magmas in Late Precambrian]. *Doklady Akademii nauk*, 2007, vol. 413, no. 16, pp. 798–802.
  25. Plyusnina L.P. *Eksperimentalnoe issledovanie ravnovesiy metabazitov, geotermobarometriya* [An experimental study of the equilibrium of metabasites, geothermobarometry]. Moscow, Nauka Publ., 1986. pp. 174–183.
  26. Perchuk L.L. *Ravnovesiya porodoobrazuyushchikh mineralov* [Equilibrium of rock-forming minerals]. Moscow, Nauka Publ., 1970. 390 p.
  27. Fershtater G.B. Empiricheskiy plagioklaz-rogoobmankovyy barometr [Empirical plagioclase-tax-barometer barometer]. *Geokhimiya*, 1990, no. 3, pp. 328–335.
  28. Hammarstrom J.M. Aluminum in hornblende: an empirical igneous geobarometer. *American Mineralogist*, 1986, no. 71, pp. 1297–1313.
  29. Cathelineau M. Cation site in chlorites and illites as a function of temperature. *Clay Minerals*, 1988, no. 23, pp. 471–485.
  30. Kranidiotis P., Maclean W.H. Systematics of chlorite alteration at the Phelps Dodge massive sulfide deposit. *Economic Geology*, 1987, no. 82, pp. 1898–1911.
  31. Fayek M., Kyser T.K. Characteristics of auriferous and barren fluids associated with the Proterozoic. *Economic Geology*, 1995, no. 90, pp. 385–406.
  32. Leake B.E. Nomenclature of amphiboles: report of the subcommittee on amphiboles of the commission on new minerals and mineral names of the international mineralogical association (CNMMN IMA). *PROC. RMS*, 1997, no. 6, pp. 82–102.
  33. Hey M.H. A new review of the chlorites. *Mineralogical Magazine*, 1954, no. 30, pp. 277–292.
  34. Travin A.V. *Termokhronologiya subduksionno-kollizionnykh, kollizionnykh sobyitii Tsentralnoy Azii*. Dis. Dokt. nauk [Thermochronology of subduction-collision, collision events of Central Asia. Dr. Diss.]. Novosibirsk, 2016. 320 p.
  35. Likhanov I.I., Reverdatto V.V., Kozlov P.S. Kollizionnye metamorficheskie kompleksoy yeniseyskogo kryazha: osobennosti evolyutsii, vozrastnye rubezhi i skorost ekskumatsii [Collision metamorphic complexes of the Yenisei Ridge: evolutionary features, age lines, and the rate of exhumation]. *Geologiya i geofizika*, 2011, no. 10, pp. 1593–1611.
  36. Vernikovskaya A.E., Vernikovskiy V.A., Sal'nikova E.B., Kotov A.B., Kovach V.P., Travin A.V., Vingeyt M.T. Leykogranitnyy magmatizm a-tipa v evolyutsii kontinental'noy kory zapadnogo obramleniya Sibirskogo kratona [Leucogranite magmatism of a-type in the evolution of the continental crust of the western frame of the Siberian craton]. *Geologiya i geofizika*, 2007, vol. 48, no. 1, pp. 5–21.
  37. Vernikovskiy V.A., Vernikovskaya A.E. Tektonika i evolyutsiya granitoidnogo magmatizma Yeniseyskogo kryazha [Tectonics and evolution of granitoid magmatism of the Yenisei Ridge]. *Geologiya i geofizika*, 2006, no 1, pp. 35–52.
  38. Likhanov I.I., Santosh M. A-type granites in the western margin of the Siberian craton: implications for breakup of the precambrian supercontinents Columbia/Nuna and Rodinia. *Precambrian Research*, 2019, vol. 328, pp. 128–145.
  39. Likhanov I.I., Nozhkin A.D., Reverdatto V.V. Early stages of the evolution of the paleoasian ocean on the western margin of the siberian craton: evidence from geochronological and geochemical studies of Yenisei ridge. *Doklady earth sciences*, 2017, vol. 476, pp. 1089–1093.
  40. Likhanov I.I., Reverdatto V.V., Savko K.A. Bimodal intraplate magmatism of the Yenisei ridge as evidence of breakup of Rodinia and opening of the paleoasian ocean at the western margin of the Siberian craton. *Doklady earth sciences*, 2017, vol. 476, pp. 1217–1221.
  41. Nozhkin A.D., Likhanov I.I., Reverdatto V.V., Zinoviev S.V., Dmitrieva N.V., Bayanova T.B., Kozlov P.S., Popov N.V. Late vendian postcollisional leucogranites of Yenisei ridge. *Doklady earth sciences*, 2017, vol. 474, pp. 674–679.

42. Meert J.G., Powell C.M. Assembly and break-up of Rodinia: introduction to the special volume. *Precambrian Research*, 2001, no. 110, pp. 1–8.
43. Meert J.G., Torsvik T.H. The making and unmaking of a supercontinent: Rodinia revisited. *Tectonophysics*, 2003, no. 375, pp. 261–288.
44. Kuznetsov N.B., Meert J.G., Romanyuk T.V. Ages of detrital zircons (U/Pb, LA-ICP-MS) from the latest neoproterozoic-middle Cambrian(?) Asha group and early Devonian takaty formation, the southwestern Urals: a test of an Australia-Baltica connection within Rodinia. *Precambrian Research*, 2014, vol. 244, no. 1, pp. 288–305.
45. Nozhkin A.D., Popov N.V., Dmitriyeva N.V., Storozhenko A.A., Vasilyev N.F. Neoproterozoyskiye kollizionnyye S-granitoidy Eniseyskogo kryazha: petrogeokhicheskiye osobennosti. U-Pb, Ar-Ar, Sm-Nd izotopnyye dannyye [Neoproterozoic collisional S-granitoids of the Yenisei Ridge: petrogeochemical features, U-Pb, Ar-Ar, Sm-Nd isotopic data]. *Geologiya i geofizika*, 2015, vol. 56, no. 5, pp. 881–889.

*Received: 3 June 2020.*

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

**Radim N. Nikitin**, research engineer, National Research Tomsk State University.

УДК 550.8.023; 519.223.4

## ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ШЛИФОВ НА ПРИМЕРЕ УСИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ НЕФТИ

**Попов Никита Андреевич<sup>1</sup>,**  
Nikita.Popov@pnn.lukoil.com

**Путилов Иван Сергеевич<sup>1</sup>,**  
Ivan.Putilov@pnn.lukoil.com

**Гуляева Анастасия Андреевна<sup>1</sup>,**  
Anastasija.Guljaeva@pnn.lukoil.com

**Винокурова Екатерина Евгеньевна<sup>1</sup>,**  
Ekaterina.Vinokurova@pnn.lukoil.com

<sup>1</sup> Управление комплексных исследований ядра Центра исследования ядра и пластовых флюидов  
Филиал ООО «ЛУКОЙ-Инжиниринг» «ПермНИПИнефть» в г. Перми,  
Россия, 614066, г. Пермь, ул. Советской Армии, 29.

*Статья посвящена разработке методических приемов к применению технологий машинного обучения для решения задач по углубленному анализу геолого-физических параметров на основе результатов лабораторных исследований шлифов ядра. Для достижения поставленной цели был разработан специализированный табличный формат описания шлифов ядра карбонатных отложений. На основе разработанного формата сформирована база данных для последующего анализа и применения технологий глубокого и поверхностного обучения. В качестве объекта исследования выбрана пермокарбонатная залежь Усинского месторождения, расположенного в Республике Коми.*

*Технология глубокого обучения была применена с целью получения математической модели прогноза ряда геологических параметров по фотографиям шлифов. В качестве основного примера был рассмотрен прогноз восьми классов по Данему, выделяемых по шлифам.*

*Разработанный формат позволяет все текстовые описания геологических характеристик шлифа представить в табличном виде с дискретной кодировкой. Табличное представление даёт ряд преимуществ. Во-первых, это позволяет выполнять математико-статистический анализ описания шлифов; во-вторых, можно формировать базу для анализа, используя результаты работы разных авторов, включая фотографии шлифов; в-третьих, даёт возможность сопоставлять и анализировать параметры, полученные по шлифам с другими результатами исследований кернов. На примере пермокарбонатной залежи Усинского месторождения по разработанному формату была сформирована уникальная база по данным более 1000 шлифов из 6 скважин. Дополнительно к описаниям шлифов в базу данных была загружена информация по результатам лабораторных исследований различных геолого-физических параметров, полученная на образцах ядра из тех же интервалов, что и шлифы. На основании сформированной базы данных было получено соотношение газопроницаемости и пористости с категоризацией точек по классификации Данема на пермокарбонатной залежи Усинского месторождения. Сформированная база данных описаний шлифов связана с фотографиями шлифов, что, в свою очередь, позволяет применять современные технологии компьютерного зрения, основанные на глубоком обучении, для анализа и прогноза параметров шлифов.*

*В результате проведенных экспериментов была получена модель, которая позволяет по фотографии шлифа выделять геологические параметры. На сегодняшний день работы по пополнению базы и совершенствованию модели продолжаются, но полученная модель уже используется как инструмент, ускоряющий процесс анализа шлифов.*

### **Ключевые слова:**

*Технология машинного обучения, лабораторные исследования ядра, описание шлифов, математико-статистический анализ, классификация по Данему.*

### **Введение**

Сегодня мы наблюдаем новый виток революционного развития информационных технологий. За последние пять лет удалось решить целый ряд задач, которые казались неразрешимыми последние десятилетия. Технологический прорыв цифровых технологий открыл новые возможности в разных отраслях. Лидерами по разработке и внедрению прорывных технологий являются интернет корпорации. Основными факторами, обусловившими технологический прорыв, стали развитие вычислительных мощностей и накопление значительного объема информации [1]. Это сочетание позволило более эффективно применить технологии, разработанные еще в середине два-

дцатого века, такие как нейронные сети и др. На сегодняшний день в нефтяной промышленности используется вычислительная техника последнего поколения, а также накоплены большие объемы информации. Таким образом, имеются все предпосылки для внедрения прорывных информационных разработок в широком спектре задач нефтяной отрасли.

В данной работе мы рассмотрим примеры использования технологии машинного обучения для изучения шлифов. Цель исследования – разработка методических приемов к применению технологии машинного обучения, включая глубокое обучение, к задачам углубленного анализа геолого-физических параметров на основе результатов лабораторных исследова-

ний шлифов кернов. Достоверность оценки фильтрационно-емкостных свойств разрабатываемых пластов-коллекторов в значительной степени зависит от обеспеченности петрофизической информацией [2–4].

Для достижения поставленной цели решаются задачи разработки специализированного табличного формата описания шлифов керна карбонатных отложений. Формируется база данных на основе разработанного формата для последующего анализа и применения технологий глубокого и поверхностного обучения.

#### Экспериментальная часть

В качестве объекта исследования выбрана пермско-карбонатная залежь Усинского месторождения, расположенного в Республике Коми. Залежь является уникальной по размерам и свойствам нефти ( $\mu=723,2$  мПа\*с). Этаж нефтеносности более 300 м, количество геологических запасов категории АВ1 составляет 747 млн т, извлекаемых 247 млн т. На месторождении пробурено более 2000 скважин, в 30 скважинах отобрано более 2000 м керна, из которого изготовлено и в дальнейшем исследовано в лабораториях около 9000 стандартных и более 1000 полноразмерных образцов. В результате литолого-петрографических и петрофизических исследований установлено, что породы изученного разреза обладают неоднородными, но в основном достаточно хорошими фильтрационно-ёмкостными свойствами (ФЕС), что в свою очередь связано с литолого-генетическими закономерностями распределения пор, каверн и трещин, а также с их морфологическими особенностями. Изучение емкостного пространства пород данного разреза позволило выявить его структуру, строение и с помощью результатов петрофизических анализов определить типы коллекторов. Емкостное пространство известняков различных литотипов неоднородно. Развиваются пустоты неравномерно. Поры и каверны развиваются в основном по цементу, реже – во внутрискелетных полостях органических остатков. Поры и каверны размером до 3,00 мм (по описанию шлифов) открытые, сообщающиеся. Форма пустот самая разнообразная: удлинённая и изометричная, с «изорванными» краями, щелевидная, лапчатая, рукавообразная. Отдельные пустоты частично или полностью залечены кальцитом. Некоторые поры и каверны имеют форму органических остатков (слепковая пористость). Межзерновые и внутрiformенные поры нередко развиваются вблизи стилолитовых швов, а также в разделительных пленках стилолитов и по ходу минеральных и открытых трещин. Пустоты образованы преимущественно в результате процессов выщелачивания, в подчиненном количестве встречаются субкапиллярные седиментационные поры и поры диагенетической и катагенетической перекристаллизации, развивающиеся на участках перекристаллизации и вблизи стилолитов.

Стилолиты развиваются во всех породах, но их плотность в разрезе неодинакова. Стилолиты и их фрагменты зубчатого, бугорчато-зубчатого, зубчато-бугорчатого, бугорчато-столбчатого типов выполне-

ны глинистым веществом, пигментированным. В разделительных пленках отмечается примесь терригенного кварца псаммоалевритовой размерности и выделения аутигенного пирита. Отмечаются участки линзовидной формы с извилистыми очертаниями, выполненные глинистым веществом, которые, вероятно, являются «раздувами» разделительных пленок стилолитов. Стилолиты переплетаются между собой, группируются в серии, образуя ослабленные зоны. Стилолиты растворяют близлежащие органические остатки (членики криноидей и раковинки фораминифер). Участками стилолиты выщелочены. Максимальная амплитуда стилолитов по шлифам в изученном разрезе достигает 14 мм, ширина разделительных пленок составляет не более 0,75 мм.

От стилолитов в разные стороны отходят разнообразные открытые и минеральные трещины. Некоторые трещины выполнены оранжевым, коричневым и желтым битуминозным органическим веществом. Трещины короткие, реже протяженные извилистой и слабоизвилистой конфигурации, конусовидные, прямолинейные и разветвленные, секущие органические компоненты пород. Ширина открытых трещин колеблется от 0,005 до 0,600 мм. Минеральные трещины выполнены яснокристаллическим мелкозернистым и мелко-среднезернистым кальцитом. Ширина их не превышает 0,12 мм.

Битуминозно-органическое вещество (БОВ) коричневого, желтого и красно-коричневого цвета пигментирует глинистые слои и разделительные пленки стилолитов, выполняет мелкие субкапиллярные поры, сорбируется остатками водорослей и мшанок, окрашивает породы неравномерно (пятнами). БОВ отмечается в виде примазок по стенкам трещин и пор, участками выполняет тонкие трещины, пигментирует кремнистый материал в зонах окремнения, иногда подчеркивает контуры ромбоздров диагенетического доломита, выполняющего роль цемента.

Как правило, породы изученного разреза в разной степени нефтенасыщены (равномерно, реже пятнисто) либо пигментированы БОВ. И даже в весьма плотных разностях наблюдается точечное и пятнистое нефтенасыщение, что позволяет рассматривать изученную толщу как единый резервуар. БОВ коричневого, светло-коричневого и оранжево-коричневого цвета неравномерно пигментирует форменные элементы, заполняет пустоты и отмечается в виде тонких пленок, примазок и капель на стенках пор и трещин, отмечается в виде выпотов по трещинам и пустотам.

Коллекторские характеристики рассматриваемой толщи, как видно из вышесказанного, весьма неоднородны: наряду с высокопористыми и кавернозными породами в разрезе имеются низкопористые и трещиноватые разности, причем, это относится к породам разного литологического состава. Встречаются интервалы, где отложения характеризуются низкой матричной пористостью, в то время как проницаемость достигает высоких значений. Это позволяет предположить присутствие в разрезе пластов-коллекторов порово-трещинного типа.

При бурении скважины неоднократно отмечается неполный вынос керна, что может свидетельствовать о наличии кавернозных прослоев, расположенных в разрезе на разных уровнях и на участках с различными структурами.

В целом отложения изученного разреза могут быть отнесены к разноёмкому коллектору сложного типа, где в разрезе определяются кавернозно-поровые, трещинно-поровые, порово-трещинные и трещинно-порово-кавернозные типы коллекторов.

Дополнительно изготовлено около 3000 шлифов и проведено их описание. Изготовление самих шлифов является сложным процессом, требующим наличия высокоточного оборудования и высокой, практически ювелирной, квалификации персонала. Не менее специфичным является на сегодняшний день анализ шлифов керна. Специалисты по анализу шлифов, как правило, специализируются на описании шлифов определенных отложений. Это обусловлено различным набором информативных признаков, отражающих их генезис и вторичные преобразования. Само описание шлифов чаще всего представлено в виде последовательного текстового изложения, надо отметить, что описания различных авторов могут отличаться по стилю и терминологии, что усложняет дальнейшее их использование. Отметим, что часто описание шлифов происходит на разных языках и это также усложняет использование таких описаний в дальнейшей работе. Очевидно, что выполнять оперативно какую-либо аналитику по сотням, а иногда и тысячам различных описаний проблематично и занимает много времени, и чаще всего принимает форму отдельной научно исследовательской работы. При описании шлифа используются микроскопы, которые позволяют детально исследовать всю поверхность шлифа, составляющую примерно 2 кв. см. Наиболее представительная часть шлифа фотографируется и приобщается к текстовому отчету. Фотография фрагмента шлифа при увеличении в 25 раз в среднем составляет 5–7 % от всей площади шлифа. В некоторых работах проводят полное сканирование шлифа. Естественно, что фотографии не могут заменить по информативности работу с микроскопом, однако для специалистов, работающих только с описанием и не имеющих возможности изучать сам шлиф, эти фотографии являются важнейшей частью отчета, не менее ценной, чем само описание. Для преодоления описанных выше осложняющих факторов дальнейшего использования полученной при описании шлифа информации, а также для систематизации представления описания шлифов карбонатных отложений в Филиале ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «ПермНИ-ПИНЕФТЬ» группой экспертов по описанию шлифов был разработан специализированный формат таблицы с кодировкой наиболее востребованных параметров, определяемых в шлифах. Основными параметрами, включаемыми в таблицу, являются: название породы, наличие органического вещества, БОВ, форменные элементы, текстура, структура по Данему, преобладающие аутигенные компоненты, влияющие на ФЕС, измеренная пористость по шлифу, преобла-

дающий тип пористости, трещиноватость и наличие стилолитов. Разработанный формат позволяет все текстовые описания петрографических характеристик породы представить в табличном виде с дискретной кодировкой. Табличное представление даёт ряд преимуществ. Во-первых, это позволяет выполнять математико-статистический анализ описания шлифов. Во-вторых, можно формировать базу данных для анализа, используя результаты работы разных авторов, включая фотографии шлифов, и, в-третьих, дает возможность сопоставлять и анализировать параметры, полученные по шлифам, с другими результатами исследований кернов. На примере пермокарбонатной залежи Усинского месторождения по разработанному формату была сформирована уникальная база на основании данных более 1000 описанным шлифов из 6 скважин. На месторождении по Данему выделяются восемь типов структур: мадстоун, вакстоун, пакстоун, грейнстоун, баундстоун, флаутстоун, рудстоун и кристаллический карбонат (доломит). Примеры фотографий и краткое описание типов структур приведены в табл. 2.

Дополнительно к описаниям шлифов в базу данных была загружена информация результатов лабораторных исследований различных геолого-физических параметров, полученная на стандартных и полноразмерных образцах керна из тех же интервалов, что и шлифы. Лабораторные исследования керна являются единственным прямым способом получения такой информации [5–10]. Породы-коллекторы Усинского месторождения трещинно-каверно-порового типа. В связи с этим исследования по определению фильтрационно-емкостных свойств проводились как на стандартных, так и на полноразмерных образцах керна, которые учитывают масштабный фактор и включают в себя микротрещины, каверны большого размера и матрицу породы, соизмеримые с размерами образцов [11–17]. Коэффициент открытой пористости на стандартных образцах керна был определен методом жидкостенасыщения (метод Преображенского) и гидростатического взвешивания с учетом внешних каверн согласно ГОСТ 26450.1-85 [18], коэффициент открытой пористости полноразмерных образцов – методом (МР-ИСМ-03-ОЛФИ-046-2013) [19]. Частота отбора образцов керна для комплексных лабораторных исследований определяется литологическим составом, изменчивостью физических свойств и характером насыщения изучаемых пород. Согласно методическим рекомендациям [20], при изучении неоднородных пород-коллекторов, обладающих сложной структурой пустотного пространства, количество образцов должно быть не менее 5 на метр.

В табл. 3 приведено сопоставление типов структуры по Данему с геолого-физическими параметрами. Анализ средних значений дисперсий и интервалов параметров показывает, что однозначно разделить на типы структур по геолого-геофизическим параметрам нельзя. Для изучаемой выборки образцов был дополнительно проведен анализ t-статистики [21–28].

Используя сформированную базу данных, построено соотношение газопроницаемости и открытой по-

ристости с категоризацией точек по классификации Данема на пермокарбоневой залежи Усинского месторождения (рис. 1). На графиках видно, что диапазоны изменения проницаемости рудстоунов, мадстоунов и флаустоунов ограничены и частично перекрываются, а диапазоны значений проницаемости пакстоунов и баундстоунов значительно шире других типов по Данему. Максимальные значения проницаемости, превышающие  $1000 \cdot 10^{-3} \text{ мкм}^2$ , характерны только для баундстоунов и частично кристаллических карбонатов (доломитов). Соотношение на рис. 1 наглядно демонстрирует, что структура порового пространства и ФЕС контролируется минералами и условиями их формирования на пермокарбоневой залежи Усинского месторождения. По результатам литолого-петрографических исследований пород установлено, что породы Усинского месторождения скважин 9ОЦ, 3501 и 3506 представлены в большей степени баундстоунами, а скважины 5ОЦ – грейнстоунами (табл. 1). Нужно отметить, что, к примеру, кристаллический карбонат (доломит) имеет поровую структуру пустотного пространства (рис. 3), а баунд-

стоуны характеризуются более сложной структурой пустотного пространства каверно-порового и порово-кавернового типа (рис. 2).

Таблица 1. Литологическая характеристика скважин Усинского месторождения

Table 1. Lithologic description of wells of the Usinsk field

Скважина Well	Литологическая характеристика скважины Lithological characteristics of a well					
	Мадстоун Mudstone	Пакстоун Packstone	Грейнстоун Grainstone	Баундстоун Boundstone	Флаустоун Floatstone	Кристаллический карбонат (доломит) Crystalline carbonate
	%					
5ОЦ	1	23	71	4	0	0
9ОЦ	0	34	2	51	6	8
3501	1	14	17	52	7	9
3506	0	6	2	62	2	27

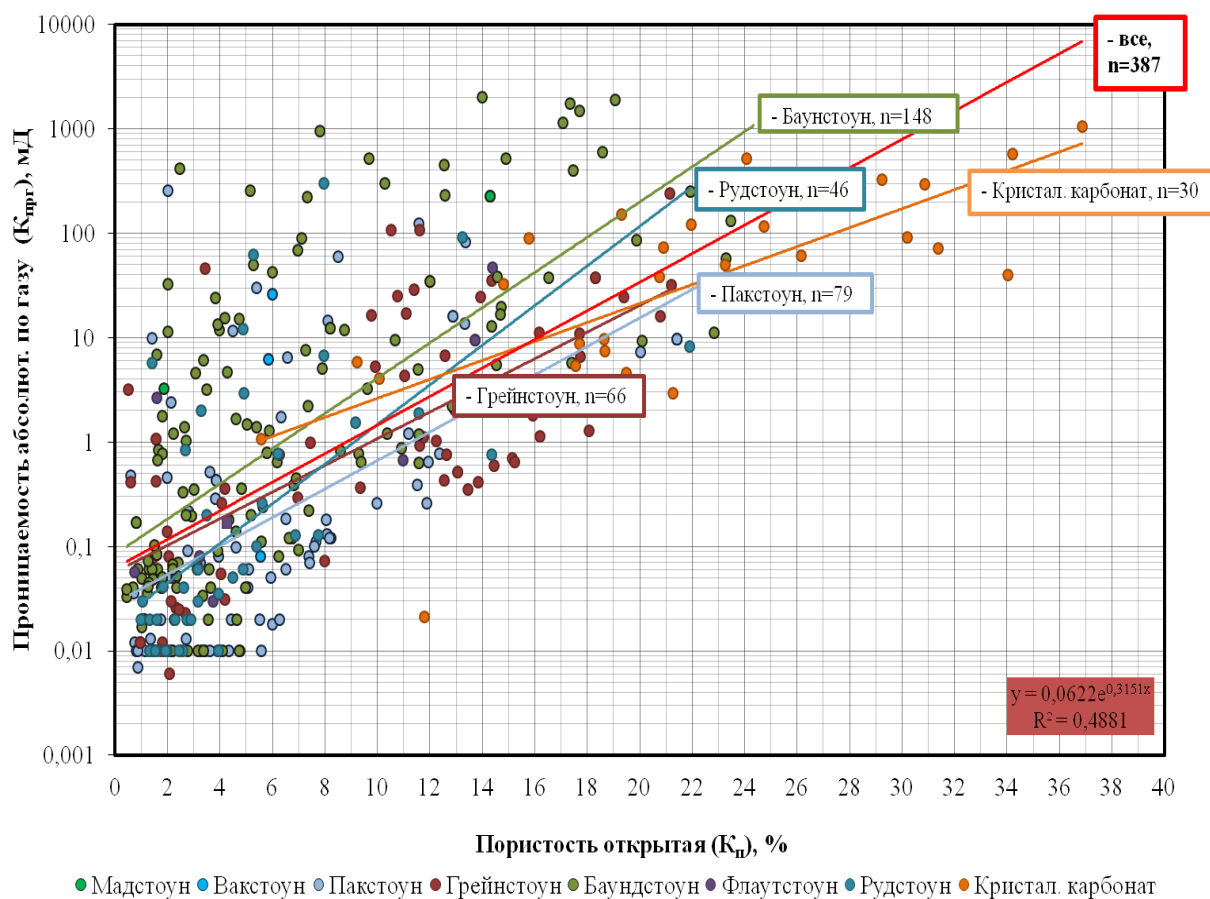


Рис. 1. Соотношение газопроницаемости и открытой пористости с категоризацией точек по классификации Данема

Fig. 1. Ratio of gas permeability and open porosity with the categorization of points according to the classification of Danhem

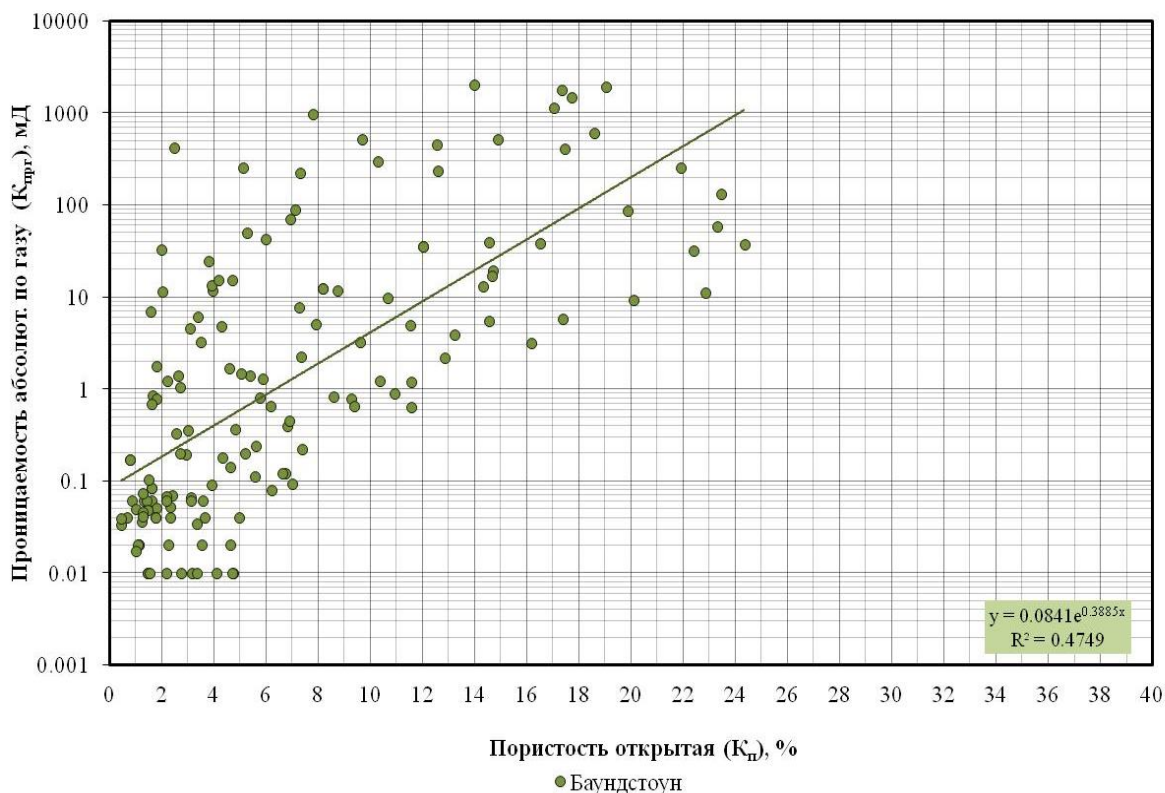


Рис. 2. Соотношение газопроницаемости и открытой пористости для баундстоунов  
Fig. 2. Ratio of gas permeability and open porosity for boundstone

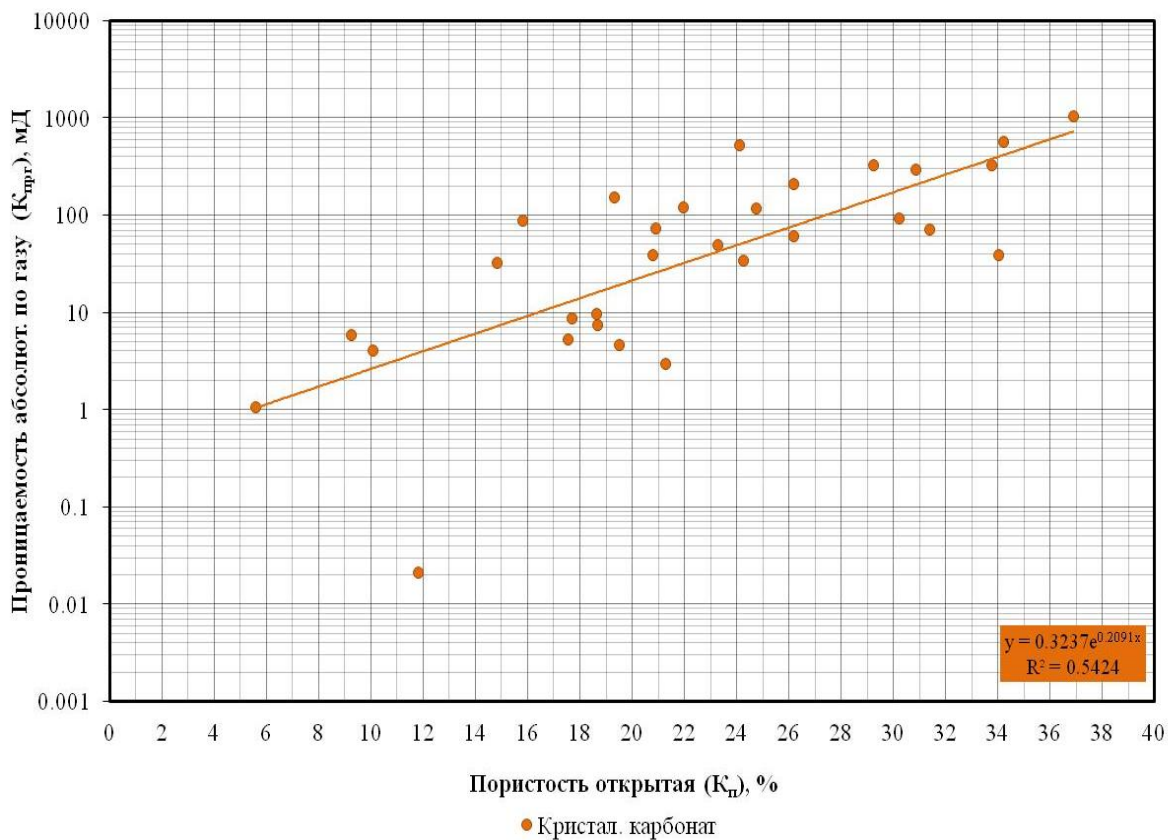

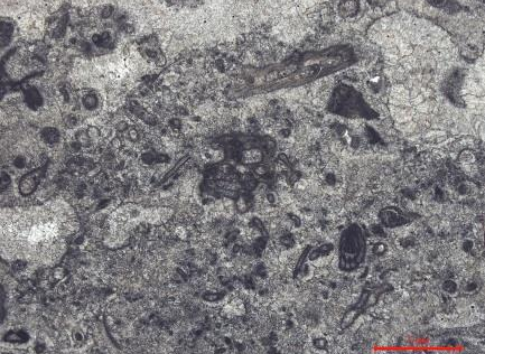


Рис. 3. Соотношение газопроницаемости и открытой пористости для кристаллического карбоната (доломита)  
Fig. 3. Ratio of gas permeability and open porosity for crystalline carbonate



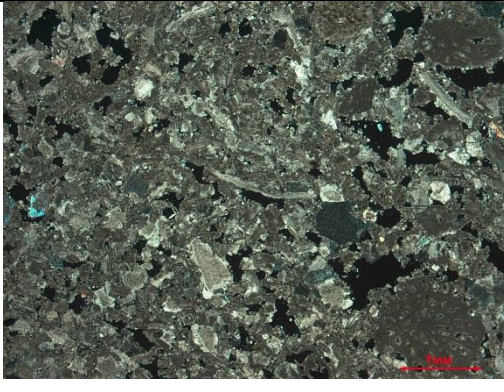
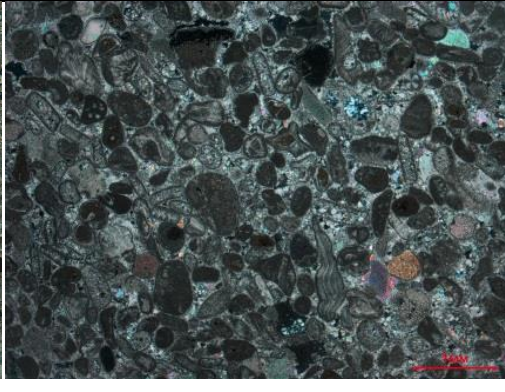
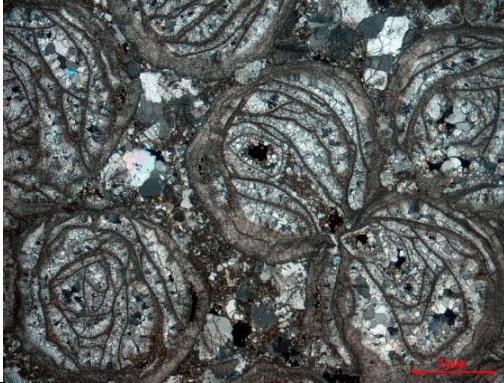
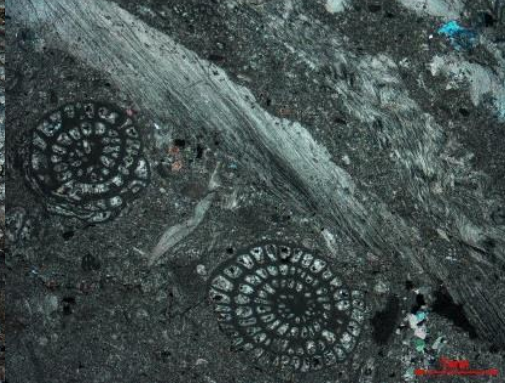
**Таблица 2.** Общая характеристика пород по классификации Данема с фотографиями шлифов Усинского месторождения, лучшие всего характеризующими данный литотип

**Table 2.** General characteristics of rocks according to the classification of Danhem with the photos of thin sections of the Uinsk field most characteristic for this lithotype

<p>Тип структуры по Данему Structure type to the classification of Danhem</p>	<p><b>Мадстоун/Mudstone</b> Микро-тонкозернистый известняк с незначительным содержанием форменных элементов размером &lt;2 мм. Первичные компоненты не были скреплены во время отложения. Micro-fine-grained limestone with insignificant content of shaped elements &lt;2 mm in size. The primary components were not bonded during deposition.</p>	<p><b>Вакстоун/Wackestone</b> Микро-тонкозернистый известняк с достаточно обильным (до 40–50 %) форменными элементами размером &lt;2 мм. Первичные компоненты не были скреплены во время отложения. Micro-fine-grained limestone with sufficiently abundant (up to 40–50 %) shaped elements &lt;2 mm in size. The primary components were not bonded during deposition.</p>
<p>Краткая характеристика типа Brief description of the type</p>	<p>Известняк биокластовый с микритовым матриком, кремненый. Известняк сложен преимущественно пелитоморфным кальцитом. В подчиненном количестве редкие биокласты иглокожих и брахиопод (10 %). Большая часть детрита кремнена. Bioclast limestone with micrite matrix, silicified. Limestone is composed mainly of pelitomorph calcite. In a subordinate amount, rare bioclasts of echinoderms and brachiopods (10 %). Most of the detritus is silicified.</p>	<p>Известняк мшанковый с инкрустационной текстурой. Порода образована фрагментами мшанок ячеистого строения размером до 2,10 мм. Каждый фрагмент мшанки подчеркнут инкрустационной корочкой различной по ширине, которая выполняет роль крустификационного цемента. В значительно подчиненном количестве встречаются обломки раковин остракод, многокамерные раковинки фораминифер и трудноопределимый детрит размером до 0,10 мм. Биокласты значительно перекристаллизованы. Limestone mossy with inlaid texture. The rock is formed by fragments of mosses of cellular structure up to 2,10 mm in size. Every piece of bryozoans fresco is underlined by incrustation crust of different width, which performs the role of crustifications cement. In a much smaller number there are fragments of ostracod shells, multi-chamber shells foraminifera and hard-to-determine detritus up to 0,10 mm in size. Bioclasts are significantly recrystallized.</p>
<p>Фото (наиболее характерное изображение данного типа) Photo (the most characteristic image of this type)</p>		
<p>Тип структуры по Данему Structure type to the classification of Danhem</p>	<p><b>Пакстоун/Packstone</b> Известняк, состоящий из форменных элементов размером &lt;2 мм, с тонко-микрозернистым цементом порового и базального типов, зерна опираются друг на друга. Первичные компоненты не были скреплены во время отложения. Limestone, consisting of shaped elements &lt;2 mm in size, with fine-grained cement of pore and basal types, the grains resting on each other. The primary components were not bonded during deposition.</p>	<p><b>Грейнстоун/Grainstone</b> Порода не содержит ила и состоит из опирающихся друг на друга зерен размером &lt;2 мм, имеет яснокристаллический цемент порового и базального типов. Первичные компоненты не были скреплены во время отложения. The rock does not contain silt and consists of &lt;2 mm grains resting on each other, has clear-crystalline cement of pore and basal types. The primary components were not bonded during deposition.</p>
<p>Краткая характеристика типа Brief description of the type</p>	<p>Известняк фораминиферово-биокластовый с микритовым цементом. Порода сложена биокластами (в среднем 0,6–0,9 мм) в преобладающем количестве криноиды, остракоды, брахиоподы, пелециподы, сгустки и комки синезеленых водорослей, желваки багряных водорослей, гастроподы, мшанки и мелкий раковинный детрит и шлам. В подчиненном количестве крупными одно- и многокамерными фораминиферами и фузулинидами. Цемент микритовый, преимущественно пелитоморфный и регенерационный кальцит. Limestone foraminifera-bioclast with micrite cement. The rock is composed of bioclasts (on average 0,6–0,9 mm) in a predominant number of crinoids, ostracods, brachiopods, pelecipods, clots and lumps of blue-green algae, purple algae nodules, gastropods, mosses and small shell detritus and sludge. In subordinate numbers by large single- and multi-chamber foraminifera and fusulinids. The cement is micrite, predominantly pelitomorph and regenerative calcite.</p>	<p>Известняк биокластово-фораминиферовый со спаритовым цементом, перекристаллизованный. Порода сложена одно- и многокамерными фораминиферами (до 1,1 мм), часто микритизированными до бесструктурных комков. Биокласты: мшанки, криноиды, брахиоподы, пелециподы, остракоды, трубки перекристаллизованных зеленых водорослей и мелкий раковинный детрит. Цемент – спаритовый кальцит. Bioclast-foraminiferous limestone with sparite cement, recrystallized. The rock is composed of single- and multi-chamber foraminifera (up to 1,1 mm), often micritized to structureless lumps. Bioclasts: mosses, crinoids, brachiopods, pelecipods, ostracods, tubes of recrystallized green algae and small shell detritus. Cement-spar calcite.</p>

Продолжение табл. 2

Table 2

<p>Фото (наиболее характерное изображение данного типа)                  Photo (the most characteristic image of this type)</p>		
<p>Тип структуры по Данему                  Structure type to the classification of Danhem</p>	<p><b>Баундстоун/Boundstone</b>                  Автохтонный известняк, первичные компоненты были скреплены во время отложения.                  Autochthonous limestone, the primary components were bonded during deposition.</p>	<p><b>Флаутстоун/Floatstone</b>                  Известняк, состоящий из форменных элементов размером &gt;2 мм, с микро-тонкозернистым цементом порового и базального типов. Опорой служит основная масса. Первичные компоненты не были скреплены во время отложения.                  Limestone consisting of shaped elements &gt;2 mm in size, with micro-fine-grained cement of pore and basal types. Support is the bulk. The primary components were not bonded during deposition.</p>
<p>Краткая характеристика типа                  Brief description of the type</p>	<p>Известняк биогермный коралловый. Порода представлена фрагментом кустистой колонии кораллов. Стенки кораллитов тонкие. Внутренние полости кораллитов выполнены вторичным кальцитом. Масса, заполняющая пространство между кораллитами, представлена вторичным спаритовым кальцитом. Встречаются мелкие комки и сгустки сине-зеленых водорослей. Заполнитель – спаритовый кальцит.                  Limestone bioherm coral. The rock is represented by a fragment of a bushy coral colony. The walls of corallites are thin. The internal cavities of corallites are made of secondary calcite. The mass filling the space between the corallites is represented by secondary sparitic calcite. There are small lumps and clumps of blue-green algae. The filler is sparite calcite.</p>	<p>Известняк фораминиферо-биокластовый с микритовым цементом. Порода сложена крупными одно- и многокамерными фораминиферами и фузулинидами. В преобладающем количестве биокласты – крупные створки брахиопод и остракод, пелециподы, криноиды, мшанки, кальциферы и мелкий раковинный детрит и шлам. Цемент микритовый, преимущественно пелитоморфный.                  Limestone foraminifera-bioclast with micrite cement. The breed is composed of large single- and multi-chamber foraminifera and fusulinids. In the vast number of bioclast – large sash of brachiopods and ostracods, pelecypoda, crinoidea, bryozoans, and small celticifury of shell detritus and sludge. The cement is micrite, mainly pelitomorphic.</p>
<p>Фото (наиболее характерное изображение данного типа)                  Photo (the most characteristic image of this type)</p>		
<p>Тип структуры по Данему                  Structure type to the classification of Danhem</p>	<p><b>Рудстоун/Rudstone</b>                  Известняк, состоящий из форменных элементов размером &gt;2 мм, с яснокристаллическим цементом порового типа. Опорой служат зерна. Первичные компоненты не были скреплены во время отложения.                  Limestone consisting of shaped elements &gt;2 mm in size, with clear-crystalline pore-type cement. Grains serve as a support. The primary components were not bonded during deposition.</p>	<p><b>Кристаллический карбонат (доломит)</b>                  Crystalline carbonate                  Перекристаллизованный известняк (вторичный доломит), в котором не распознается первичная структура.                  Recrystallized limestone (secondary dolomite) in which the primary structure is not recognized.</p>

Окончание табл. 2

Table 2

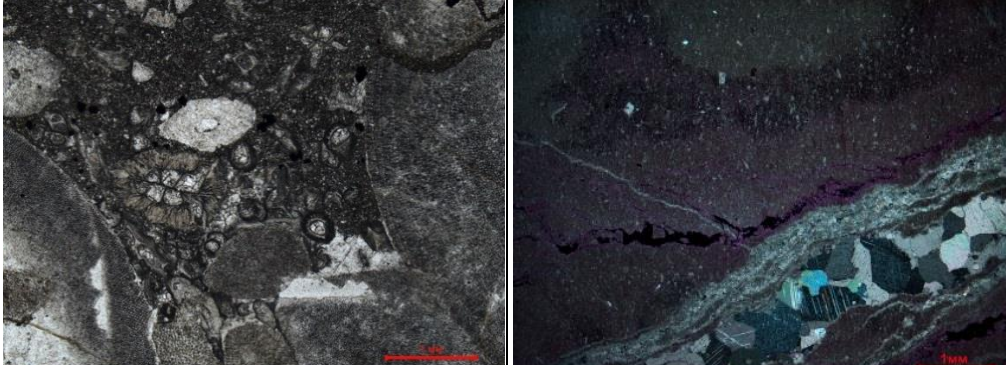
<p>Краткая характеристика типа                  Brief description of the type</p>	<p>Известняк мшанково-эхиноидный трещиноватый. Породообразующими являются многочисленные членики криноидей, размером до 7,0×5,0 мм. Также встречаются иглы морских ежей, размером до 3,9 мм. Часто наблюдаются фрагменты мшанок, размером до 2,74 мм, ячеистого строения, ветвистого морфологического типа. Отмечаются единичные обломки створок остракод и брахиопод. Цемент базального и порового типов, сложного состава: преобладает кальцит микро-тонкозернистой размерности с примесью терригенного вещества. Также отмечается регенерационный цемент (5 %), связанный с члениками криноидей.                  Limestone mankovo-echinoidea fractured. Numerous segments of crinoids, up to 7,0×5, 0 mm in size, are rock-forming. There are also needles of sea urchins, up to 3,9 mm in size. Often there are fragments of mosses, up to 2,74 mm in size, cellular structure, branched morphological type. There are single fragments of the valves of ostracods and brachiopods. Cement of basal and pore types, complex composition: calcite of micro-fine-grained dimension with admixture of terrigenous substance prevails. Regeneration cement (5 %) associated with crinoid segments is also noted.</p>	<p>Вторичный доломит микрозернистый, известняковый. Порода сложена вторичным микрозернистым доломитом. Биокласты, выполненные пелитоморфным кальцитом, иглокожие и мелкий неопределимый раковинный детрит и шлам.                  Grained secondary dolomite and limestone. The rock is composed of secondary micrograin dolomite. Bioclasts made of pelitomorphic calcite, echinoderms and small indeterminate shell detritus and sludge.</p>
<p>Фото (наиболее характерное изображение данного типа)                  Photo (the most characteristic image of this type)</p>		

Таблица 3. Соотношение классификации пород по Данему и полученных в лабораторных условиях геолого-физических параметров пород

Table 3. Ratio of rock to the classification of Danhem and geological and physical parameters of rocks obtained in the laboratory

Тип структуры по Данему Structure type to the classification of Danhem	Геолого-физические параметры/Geological and physical parameters						
	Количество определений Number of definitions, %	Проницаемость Permeability, 10 <sup>-3</sup> мкм <sup>2</sup> (mcm <sup>2</sup> )	Пористость Porosity, %	Плотность мин., г/см <sup>3</sup> Mineralogical density, g/cm <sup>3</sup>	Содержание кальцита Calcite content, %	Содержание доломита Dolomite content, %	Нераств. ост. Insoluble residue, %
Мадстоун Mudstone	6	152,42±129,17 3,27–227,00	10,14±7,18 1,85–14,28	2,68±0,01 2,68–2,69	35,90±28,20 19,60–68,50	3,00±5,25 0,00–9,10	61,00±33,46 22,40–80,40
Вакстоун Wackestone	14	8,08±12,30 0,01–26,01	5,35±0,93 3,99–6,00	2,70±0,02 2,67–2,72	93,10±10,60 77,40–100,00	0,70±1,45 0,00–2,90	6,20±10,95 0,00–22,60
Пакстоун Packstone	225	9,13±33,47 0,01–257,20	6,62±5,84 0,59–27,02	2,70±0,02 2,64–2,83	86,50±22,16 0,00–100,00	5,20±16,52 0,00–98,00	8,30±15,90 0,00–74,80
Грейнстоун Grainstone	190	13,16±35,41 0,01–242,60	9,33±6,32 0,51–22,45	2,70±0,01 2,66–2,74	95,60±7,10 52,70–100,00	0,10±0,61 0,00–6,80	4,40±7,05 0,00–47,30
Баундстоун Boundstone	427	97,85±325,33 0,01–2016,00	6,90±5,98 0,37–25,58	2,70±0,02 2,64–2,84	93,50±11,36 0,00–100,00	1,10±7,68 0,00–100,00	5,40±8,07 0,00–70,20
Флаутстоун Floatstone	43	6,41±13,95 0,01–46,97	7,65±6,64 0,73–21,91	2,72±0,05 2,68–2,88	88,20±22,81 0,00–100,00	7,30±21,04 0,00–86,80	4,50±3,80 0,00–13,20
Рудстоун Rudstone	197	10,87±46,56 0,01–300,50	4,50±4,00 0,98–21,89	2,69±0,02 2,62–2,78	94,10±8,63 52,90–100,00	3,00±7,69 0,00–47,10	2,90±3,57 0,00–22,20
Кристаллический Карбонат (доломит) Crystalline carbonate	148	106,71±200,27 0,01–1055,00	19,51±9,73 0,94–37,02	2,80±0,04 2,69–2,84	18,40±32,87 0,00–99,00	74,70±32,02 0,00–98,60	7,00±6,98 0,00–33,60

### Технология глубокого обучения при описании шлифов

Одной из новых технологий, быстро развивающихся в последние годы, является технология глубокого обучения. Глубокое обучение – это раздел машинного обучения, который за последние пять лет очень эффективно проявил себя в задачах компьютерного зрения, заняв прочные лидирующие позиции. Преимущество данного подхода сводится к использованию многослойных сетей сложной архитектуры для расширения пространства признаков, а затем его редукции под поставленную задачу. Применение глубокого обучения не ограничивается задачами машинного зрения, а распространяется на целый ряд других задач, таких как распознавание речи, перевод текстов, управление беспилотными автомобилями и другими.

**Таблица 4.** Архитектура глубокой нейронной сети для классификации фотографий шлифов

**Table 4.** Architecture of a deep neural network for classification of photos of cuts

Номер Number	Слой Layer	Размерность данных Data dimensionality
1	Входная свертка Input Convolution	3, 256, 256
2	Свертка Convolution	16, 256, 256
3	Снижения размерности MaxPooling	16, 256, 256
4	Свертка Convolution	16, 128, 128
5	Свертка Convolution	32, 128, 128
6	Свертка Convolution	32, 128, 128
7	Снижения размерности MaxPooling	32, 128, 128
8	Свертка Convolution	32, 64, 64
9	Свертка Convolution	64, 64, 64
10	Свертка Convolution	64, 64, 64
11	Снижения размерности MaxPooling	64, 64, 64
12	Свертка Convolution	64, 32, 32
13	Свертка Convolution	128, 32, 32
14	Свертка Convolution	128, 32, 32
15	Снижения размерности MaxPooling	128, 32, 32
16	Свертка Convolution	128, 16, 16
17	Свертка Convolution	256, 16, 16
18	Свертка Convolution	256, 16, 16
19	Снижения размерности MaxPooling	256, 16, 16
20	Смена формы тензора Flatten	256, 8, 8
21	Полносвязный слой Dense	16384
22	Полносвязный слой Dense	2048
23	Классификация Softmax	8

Применимо глубокое обучение и для того, чтобы получить математическую модель прогноза ряда геологических параметров по фотографиям шлифов. В качестве основного примера рассмотрим прогноз восьми классов по Данему, выделяемых по шлифам. Учитывая ограниченный объем выборки исследованных шлифов, всего 1700 шлифов, был применен подход на основе уже обученной нейронной сети, разработанной специально для распознавания графических образов. Рассмотрев и оценив ряд ранее обученных нейронных сетей, находящихся в открытом доступе, была выбрана сеть, дающая наиболее информативные тензоры для последующего анализа. В качестве предварительного обучения сети была выбрана многослойная нейронная сеть Paintest, победившая в соревновании Kaggle по распознаванию художественных стилей по фотографиям картин [29]. Обучение Paintest происходило на 79433 фотографиях картин, количество классов составляло 1584, количество слов 24. Обученная нейронная сеть используется для получения набора информативных тензоров, на основе которых выполнялся прогноз заданных классов согласно табл. 2, 3. В сети Paintest был заменен последний классифицирующий слой и выполнено дополнительное обучение на выборке из 1700 фотографий шлифов, количество классов составляло 8 (табл. 4). Обучение глубокой нейронной сети проводилось на языке Python с применением библиотек Keras и TensorFlow. Подбор гиперпараметров последних трех модифицированных слоев глубокой нейронной сети выполнялся с использованием автоматизированного инструмента Keras-Tuner из библиотеки Keras.

Для предотвращения переобучения выборка была разделена на три части: обучающую 70 %, контрольную 15 % и тестовую 15 %. При обучении использовалась технология перекрестной проверки. Полученная модель дала 94,5 % правильности и 80 % точности классификации на тестовой выборке. Правильность классификации по классам составляет: мадстоун 99 %, вакстоун 99 %, пакстоун 80 %, грейнстоун 91 %, баундстоун 79 %, флаутстоун 97 %, рудстоун 87 % и кристаллический карбонат 94 %. Разработанная глубокая нейронная сеть позволяет определять петрографические параметры шлифов с достаточно высокой для практического применения правильностью классификации. Сразу стоит отметить, что высокие проценты классификации для мадстоун, вакстоун и флаутстоун отчасти обусловлены скорее небольшими выборками шлифов и в дальнейшем планируется уточнить модель за счет расширения количества образцов именно по этим классам. По остальным пяти обучаемым классам, где количество шлифов превышает 100, результаты могут быть применены для прогноза с установленной правильностью. Полученные математические модели на основе глубокого обучения были использованы для прогноза классов по Данему при изучении 2000 шлифов, для которых отсутствовала классификация. Это позволило впервые на несколько порядков сократить время получения такого параметра, как класс по Данему,

для дальнейшего его использования в фациальном моделировании. Скорость классификации 2000 фотографий шлифов при использовании двухъядерного центрального процессора Intel Core i5 с чистотой 1,3 ГГц составляет 10 секунд, что позволяет обученную глубокую нейронную сеть широко применять как цифровую экспресс-технологию анализа и получения новой геологической информации для исторически накопленных и вновь получаемых фотографий шлифов.

#### Заключение

Разработан цифровой формат для описания шлифов в карбонатных отложениях, который позволил сформировать базу данных описаний шлифов для пермокарбонатной залежи Усинского месторождения. Сформированная база данных использована в качестве информационной основы для получения математической модели, которая на основе фотографии шлифа определяет его класс по Данему и другие параметры. Применяя машинное обучение, авторы разработали новую технологию описания фотографий шлифов. С использованием новой технологии полу-

чена дополнительная информация по 2000 шлифам, позволяющая уточнить концептуальную модель седиментации пермокарбонатной залежи Усинского месторождения для последующего построения более достоверных трёхмерных фациальных моделей, промышленного подсчёта запасов и проектирования разработок месторождений.

На сегодняшний день работы по пополнению базы данных и совершенствованию модели продолжаются, но полученная модель уже позволяет решать практические задачи и используется как инструмент для экспресс-анализа, ускоряющий на несколько порядков процесс описания шлифов. Разработанный авторами подход к описанию шлифов с применением технологии глубокого обучения пермокарбонатной залежи Усинского месторождения может быть использован для аналогичных залежей Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции и мира.

Сама технология использования машинного зрения для описания шлифов может быть тиражирована на любые другие геологические объекты, где имеется достаточный набор описанных шлифов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Школле Ф. Глубокое обучение на Python. – СПб.: Питер, 2018. – 400 с.
2. Гурбатова И.П., Мелехин С.В., Юрьев А.В. Особенности изучения петрофизических и упругих свойств керна в сложнопостроенных коллекторах нефти и газа при моделировании термобарических пластовых условий // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2010. – № 5. – С. 67–72.
3. Костин Н.Г., Губайдуллин М.Г. Влияние размеров исследуемых образцов керна на величину коэффициента пористости карбонатных и терригенных коллекторов // Геологические опасности: материалы XV Всероссийской конференции с международным участием – Архангельск, 2009. – С. 248–250.
4. Петерсилье В.И., Рабиц Э.Г., Белов Ю.Я. Методы и аппаратура для изучения фильтрационно-емкостных свойств пород-коллекторов на образцах большого размера. – М.: Недра, 1980. – 53 с.
5. Алексин Г.А., Клещев А.А., Россихин Ю.А. Перспективы поисков нефти и газа на севере Тимано-Печорской провинции. – М.: ВНИИОЭНГ, 1982. – 44 с.
6. Ruth D., Arajamaloie R. Reconsidering Klinkenberg's permeability data // *Petrophysics*. – 2019. – V. 60. – Iss. 03. Web of conferences. URL: <https://www.onepetro.org/journal-paper/SPWLA-2019-v60n3a5> (дата обращения 12.12.2019).
7. Validation of permeability and relative permeability data using mercury injection capillary pressure data / R. Arabjamaloie, D. Daniels, E. Ebeltoft, E. Petersen, R.J. Pitman, D. Ruth // *E3S Web Conf.* 2019. – V. 89. The 2018 International Symposium of the Society of Core Analysts (SCA 2018). Web of conferences. URL: [https://www.e3sconferences.org/articles/e3sconf/abs/2019/15/e3sconf\\_sca2018\\_01001/e3sconf\\_sca2018\\_01001.html](https://www.e3sconferences.org/articles/e3sconf/abs/2019/15/e3sconf_sca2018_01001/e3sconf_sca2018_01001.html) (дата обращения 12.12.2019).
8. Insights, trends and challenges associated with measuring coal relative permeability / D. Shaw, P. Mostaghimi, F. Hussain, R.T. Armstrong // *E3S Web Conf.* – 2019. – V. 89. The 2018 International Symposium of the Society of Core Analysts (SCA 2018). Web of conferences. URL: [https://www.e3sconferences.org/articles/e3sconf/abs/2019/15/e3sconf\\_sca2018\\_01004/e3sconf\\_sca2018\\_01004.html](https://www.e3sconferences.org/articles/e3sconf/abs/2019/15/e3sconf_sca2018_01004/e3sconf_sca2018_01004.html) (дата обращения 12.12.2019).
9. Pruno S., Rodvelt H.E., Skjæveland O. Measurement of spontaneous imbibition capillary pressure, saturation and resistivity index by counter current technique at net reservoir stress and elevated temperature // *E3S Web Conf.* – 2019. – V. 89. The 2018 International Symposium of the Society of Core Analysts

- (SCA 2018). Web of conferences. URL: [https://www.e3sconferences.org/articles/e3sconf/abs/2019/15/e3sconf\\_sca2018\\_02002/e3sconf\\_sca2018\\_02002.html](https://www.e3sconferences.org/articles/e3sconf/abs/2019/15/e3sconf_sca2018_02002/e3sconf_sca2018_02002.html) (дата обращения 12.12.2019).
10. A fast method for trapped gas determination / P. Faurissoux, M. Lutui-Tefuka, C. Caubit, B. Lalanne, B. Nicot // *E3S Web Conf.* – 2019. – V. 89. The 2018 International Symposium of the Society of Core Analysts (SCA 2018). Web of conferences. URL: [https://www.e3sconferences.org/articles/e3sconf/abs/2019/15/e3sconf\\_sca2018\\_02004/e3sconf\\_sca2018\\_02004.html](https://www.e3sconferences.org/articles/e3sconf/abs/2019/15/e3sconf_sca2018_02004/e3sconf_sca2018_02004.html) (дата обращения 12.12.2019).
11. Гурбатова И.П., Михайлов Н.Н. Изучение анизотропии сложнопостроенных карбонатных коллекторов лабораторными методами // Актуальная проблема развития нефтегазового комплекса России: сб. тез. докл. VIII Всерос. науч.-техн. конф. – М., 2010. – Ч. 1. – С. 94–95.
12. Гурбатова И.П., Кузьмин В.А., Михайлов Н.Н. Влияние структуры порового пространства на масштабный эффект при изучении фильтрационно-емкостных свойств сложнопостроенных карбонатных коллекторов // *Геология нефти и газа.* – 2011. – № 2. – С. 74–82.
13. Особенности изучения карбонатных пород-коллекторов лабораторными методами; Фил. ООО «ЛУКОЙЛ-инжиниринг» «ПермНИПИнефть» в г. Пермь / И.П. Гурбатова, Д.В. Глушков, П.Н. Рехачев, С.В. Мелехин, Н.А. Попов. – Пермь: Астер Диджитал, 2017. – 264 с.
14. Михайлов Н.Н., Гурбатова И.П. Масштабный эффект при лабораторном определении фильтрационно-емкостных свойств сложнопостроенных карбонатных коллекторов // *Технологии нефти и газа.* – 2011. – № 4 (75). – С. 32–35.
15. Эпоха полноразмерного керна при лабораторных исследованиях технологий повышения нефтеотдачи пластов / И.С. Путилов, П.Н. Рехачев, И.П. Гурбатова, Н.Н. Барковский, О.И. Якимов, О.А. Морозюк // *Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело.* – 2016. – Т. 15. – № 19. – С. 155–164. DOI: 10.15593/2224-9923/2016.19.6
16. Суходанова С.С. Создание 3D-модели залежи с карбонатными трещиноватыми коллекторами на основе комплексирования гидродинамических, геофизических, сейсмических и промысловых данных (на примере нижнепермских отложений Варандейского месторождения): дис. ... канд. техн. наук. – М., 2016. – 157 с.
17. Worthington P.F. Advances in core evaluation. Accuracy and precision in reserves estimation // *Reviewed Proceedings of the First Society of Core Analysts European Core Analysis Symposium.* – London, 1990. – 567 p.

18. ГОСТ 26450.1-85. Породы горные. Метод определения коэффициента открытой пористости жидкостенасыщением. – М.: Издательство стандартов, 1985. – 7 с.
19. МР-ИСМ-03-ОЛФИ-046-2013. Горные породы. Определение коэффициента открытой пористости газовольнометрическим методом. – Пермь: Филиал ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «ПермНИПИнефть» в г. Перми, 2013. – 22 с.
20. Методические рекомендации по подсчету геологических запасов объемными методами / под ред. В.И. Петерсилье, В.И. Порокуна, Г.Г. Яценко. – М.; Тверь: ВНИГНИ, НПЦ «ТверьГеофизика», 2003. – 130 с.
21. Дементьев Л.Ф. Статистические методы обработки и анализа промыслово-геологических данных. – М.: Недра, 1966. – 206 с.
22. Мирзанзаде А.Х., Степанова Г.С. Математическая теория эксперимента в добыче нефти и газа. – М.: Недра, 1977. – 228 с.
23. Чини Р.Ф. Статистические методы в геологии. – М.: Мир, 1986. – 189 с.
24. Шарапов И.П. Применение математической статистики в геологии. – М.: Недра, 1965. – 260 с.
25. Johnson N.L., Leone F.C. Statistics and experimental design. – New York; London; Sydney; Toronto: John Wiley & Sons, 1977. – 606 p.
26. Montgomery D.C., Peck E.A. Introduction to liner regression analysis. – New York: John Wiley & Sons, 1982. – 504 p.
27. Watson G.S. Statistic on spheres. – New York: John Wiley and Sons, Inc., 1983. – 238 p.
28. Yarus J.M. Stochastic modeling and geostatistics. AAPG. – Tulsa, Oklahoma: John Wiley & Sons, 1994. – 231 p.
29. Painter by Numbers (Kaggle). URL: <https://inejc.github.io/kaggle/2016/11/17/painter-by-numbers-competition-on-kaggle/> (дата обращения 12.12.2019).

Поступила 03.06.2020 г.

#### Информация об авторах

**Попов Н.А.**, начальник Управления комплексных исследований керна Центра исследования керна и пластовых флюидов Филиал ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «ПермНИПИнефть» в г. Перми.

**Путилов И.С.**, доктор технических наук, заместитель директора по научной работе в области геологии Филиал ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «ПермНИПИнефть» в г. Перми.

**Гуляева А.А.**, инженер 2 категории Отдела подсчета запасов северной группы месторождений Волго-Уральского региона Филиал ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «ПермНИПИнефть» в г. Перми.

**Винокурова Е.Е.**, главный специалист Отдела литологии и стратиграфии Управления комплексных исследований керна Центра исследования керна и пластовых флюидов Филиал ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «ПермНИПИнефть» в г. Перми.

UDC 550.8.023; 519.223.4

## APPLICATION OF DEEP LEARNING TECHNOLOGIES FOR STUDYING THIN SECTIONS ON THE EXAMPLE OF USINSK OIL FIELD

**Nikita A. Popov<sup>1</sup>,**  
Nikita.Popov@pnn.lukoil.com

**Ivan S. Putilov<sup>1</sup>,**  
Ivan.Putilov@pnn.lukoil.com

**Anastasiya A. Gulyaeva<sup>1</sup>,**  
Anastasija.Guljaeva@pnn.lukoil.com

**Ekaterina V. Vinokurova<sup>1</sup>,**  
Ekaterina.Vinokurova@pnn.lukoil.com

<sup>1</sup> Affiliate Branch of OOO LUKOIL-Engineering PermNIPIneft in Perm,  
29, Sovetskaya Armiya avenue, Perm, 614006, Russia.

The article is devoted to development of methodological techniques for application of machine learning technologies, including deep learning, to the problems of in-depth analysis of geological and physical parameters based on the results of laboratory studies of core sections. To achieve this goal, we solve the problem of developing a specialized tabular format for describing the core sections of carbonate deposits, formation of a database on the basis of the developed format for further analysis and application of deep and surface training technologies. The permocarbon deposit of Usinsk field located in the Komi Republic was chosen as the object of research. Deep learning technology was applied to obtain a mathematical model for predicting a number of geological parameters from the photos of sections. As the main example, the forecast of eight classes of Danhem, allocated by sections, was considered.

The developed format allows presenting all text descriptions of the geological characteristics of the section in a tabular form with a discrete encoding. The table view provides a number of advantages. First, it allows you to perform mathematical and statistical analysis of the description of sections. Second, it is possible to form a database for analysis, using the results of the work of different authors, including photographs of thin sections, thirdly, provides an opportunity to compare and analyze the parameters obtained for the sections with other results of studies of the cores. On the example of permocarbon deposit of Usinsk field, a unique database of 500 sections from 6 wells was formed according to the developed format. In addition to the descriptions of the sections, the database was loaded with information on the results of laboratory studies of various geological and physical parameters obtained on standard core samples from the same intervals as the sections. Using the formed database, the ratio of mineralogical density and permeability with the categorization of points according to the Danhem classification on the permocarbon deposit of the Usinsk field is constructed. The generated database of sections descriptions is related as well to photographs of sections, that, in its turn, allows the use of modern computer vision technologies based on deep learning to analyze and predict the parameters of sections.

As a result of the experiments, a model was obtained, which allows distinguishing geological parameters from the photo of the plume. To date, work on updating the database and improving the model continues, but the model is already used as a tool to accelerate the process of sections analysis.

### Key words:

Technology of machine learning, laboratory investigations of core, description of thin sections, mathematical-statistical analysis, the classification of Danhem.

### REFERENCES

- Shkolle F. *Glubokoe obuchenie na Python* [Deep learning in Python]. St-Petersburg, Piter Publ., 2018. 400 p.
- Gurbatova I.P., Melekhin S.V., Yurev A.V. Features of the study of petrophysical and elastic properties of the core in complex reservoirs of oil and gas in the modeling of thermobaric reservoir conditions. *Geology, Geophysics and development of oil and gas fields*, 2010, no. 5, pp. 67–72. In Rus.
- Kostin N.G., Gubaydullin M.G. Vliyanie razmerov issleduemykh obraztsov kerna na velichinu koeffitsienta poristosti karbonatnykh i terrigenykh kollektorov [Influence of the sizes of the studied core samples on the porosity coefficient of carbonate and terrigenous reservoirs]. *Geologicheskoe opasnosti. Materialy XV Vserossiyskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Geological hazards. Proc. of the XV all-Russian conference with international participation]. Arkhangelsk, 2009. pp. 248–250.
- Petersile V.I., Rabc E.G., Belov Yu.Ya. *Metody i apparatura dlya izucheniya filtratsionno-enkostnykh svoystv porod-kollektorov na obrazcah bolshogo razmera* [Methods and equipment for studying filtration-capacitance properties of reservoir rocks on large samples]. Moscow, Nedra Publ., 1980. 53 p.
- Aleksin G.A., Kleshchev A.A., Rossihin Yu.A. *Perspektivy poiskov nefii i gaza na severe Timano-Pechorskoy provintsii* [Prospects for oil and gas exploration in the North of the Timan-Pechora province]. Moscow, VNIIOENG Publ., 1982. 44 p.
- Ruth D., Arajmaloei R. Reconsidering Klinkenberg's permeability data. *Petrophysics*, 2019, vol. 60, Iss. 03. Web of conferences. Available at: <https://www.onepetro.org/journal-paper/SPWLA-2019-v60n3a5> (accessed 12 December 2020).
- Arabjamaloei R., Daniels D., Ebeltoft E., Petersen E., Pitman R.J., Ruth D. Validation of permeability and relative permeability data using mercury injection capillary pressure data. *E3S Web Conf.* 2019, vol. 89. *The 2018 International Symposium of the Society of Core Analysts (SCA 2018)*. Web of conferences. Available at: [https://www.e3sconferences.org/articles/e3sconf/abs/2019/15/e3sconf\\_sca2018\\_01001/e3sconf\\_sca2018\\_01001.html](https://www.e3sconferences.org/articles/e3sconf/abs/2019/15/e3sconf_sca2018_01001/e3sconf_sca2018_01001.html) (accessed 12 December 2020).
- Shaw D., Mostaghimi P., Hussain F., Armstrong R.T. Insights, trends and challenges associated with measuring coal relative permeability. *E3S Web Conf.* 2019, vol. 89. *The 2018 International Symposium of the Society of Core Analysts (SCA 2018)*. Web of conferences. Available at: <https://www.e3sconferences.org/>

- articles/e3sconf/abs/2019/15/e3sconf\_sca2018\_01004/e3sconf\_sca2018\_01004.html (accessed 12 December 2020).
9. Pruno S., Rodvelt H.E., Skjæveland O. Measurement of spontaneous imbibition capillary pressure, saturation and resistivity index by counter current technique at net reservoir stress and elevated temperature. E3S Web Conf. 2019, vol. 89. *The 2018 International Symposium of the Society of Core Analysts* (SCA 2018). Web of conferences. Available at: [https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2019/15/e3sconf\\_sca2018\\_02002/e3sconf\\_sca2018\\_02002.html](https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2019/15/e3sconf_sca2018_02002/e3sconf_sca2018_02002.html) (accessed 12 December 2020).
  10. Faurissoux P., Lutui-Tefuka M., Caubit C., Lalanne B., Nicot B. A fast method for trapped gas determination. E3S Web Conf. 2019, vol. 89. *The 2018 International Symposium of the Society of Core Analysts* (SCA 2018). Web of conferences. Available at: [https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2019/15/e3sconf\\_sca2018\\_02004/e3sconf\\_sca2018\\_02004.html](https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2019/15/e3sconf_sca2018_02004/e3sconf_sca2018_02004.html) (accessed 12 December 2020).
  11. Gurbatova I.P., Mikhaylov N.N. Izuchenie anizotropii slozhnopostroennykh karbonatnykh kollektorov laboratornymi metodami [The study of the anisotropy of structurally complex carbonate reservoirs in the laboratory]. *Aktualnaya problema razvitiya neftegazovogo kompleksa Rossii. Sbornik tezisev dokladov VIII Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Actual problem of development of oil and gas complex of Russia. Collection of abstracts of VIII all-Russian scientific and technical conference]. Moscow, 2010. P. 1, pp. 94–95.
  12. Gurbatova I.P., Kuzmin V.A., Mihaylov N.N. Influence of the pore space structure on the scale effect in the study of filtration-capacitance properties of complex carbonate reservoirs. *Geology of oil and gas*, 2011, no. 2, pp. 74–82. In Rus.
  13. Gurbatova I.P., Gushkov D.V., Rekhachev P.N., Melekhin S.V., Popov N.A. *Osobennosti izucheniya karbonatnykh porod-kollektorov laboratornymi metodami; Fil. OOO «LUKOIL-Inzhiniring» «PermNIPneft» v g. Permi* [Features of the study of carbonate reservoir rocks by laboratory methods; Affiliate Branch of OOO LUKOIL-Engineering PermNIPneft in Perm]. Perm, Aster Didzhital Publ., 2017. 264 p.
  14. Mikhaylov N.N., Gurbatova I.P. Large-scale effect in laboratory determination of filtration-capacitance properties of complex carbonate reservoirs. *Oil and gas technologies*, 2011, no. 4 (75), pp. 32–35. In Rus.
  15. Putilov I.S., Rekhachev P.N., Gurbatova I.P., Barkovskiy N.N., Yakimov O.I., Morozuk O.A. The era of full-size core in laboratory studies of enhanced oil recovery technologies. *PNRPU Bulletin. Geology. Oil and gas mining*, 2016, vol. 15, no. 19, pp. 155–164. DOI: 10.15593/2224-9923/2016.19.6 In Rus.
  16. Suhodanova S.S. *Sozdanie 3D-modeli zalezhi s karbonatnymi treshchinovatyimi kollektorami na osnove kompleksirovaniya gidrodinamicheskikh, geofizicheskikh, seismicheskikh i promyslovykh dannyykh (na primere nizhnepermiskikh otlozheniy Varandeyevskogo mestorozhdeniya)*. Dis. Kand. nauk [Creation of a 3D model of a deposit with carbonate fractured reservoirs based on the integration of hydrodynamic, geophysical, seismic and field data (on the example of the lower Permian deposits of the Varandey Deposit)]. Cand. Diss. Moscow, 2016. 157 p.
  17. Worthington P.F. Advances in core evaluation. Accuracy and precision in reserves estimation. *Reviewed Proceedings of the First Society of Core Analysts European Core Analysis Symposium*. London, 1990. 567 p.
  18. *GOST 26450.1-85. Porody gornye. Metod opredeleniya koeffitsienta otkrytoy poristosti zhidkostenasyshcheniem* [State Standard 26450.1-85. Rocks mountain. Method for determination of open porosity coefficient by liquid saturation]. Moscow, Izdatelstvo standartov Publ., 1985. 7 p.
  19. *MR-ISM-03-OLFI-046-2013. Gornye porody. Opredelenie koeffitsienta otkrytoy poristosti gazovolyumetricheskim metodom* [MR-ISM-03-OLFI-046-2013. Rock. Determination of open porosity coefficient by gas-volumetric method]. Perm, Filial OOO «LUKOIL-Inzhiniring» «PermNIPneft» v g. Permi, 2013. 22 p.
  20. *Metodicheskie rekomendatsii po podschetu geologicheskikh zapasov obemnymi metodami* [Guidelines for calculation of geological reserves by volumetric methods]. Eds. V.I. Petersile, V.I. Poroskun, G.G. Yatsenko. Moscow, Tver, VNIGNI, NPTS «TverGeofizika» Publ., 2003. 130 p.
  21. Dementev L.F. *Statisticheskie metody obrabotki i analiza promyslovo-geologicheskikh dannyykh* [Statistical methods of processing and analysis of geological data]. Moscow, Nedra Publ., 1966. 206 p.
  22. Mirzadzhanzade A.Kh., Stepanova G.S. *Matematicheskaya teoriya eksperimenta v dobyche nefii i gaza* [Mathematical theory of experiment in oil and gas production]. Moscow, Nedra Publ., 1977. 228 p.
  23. Chini R.F. *Statisticheskie metody v geologii* [Statistical methods in geology]. Moscow, Mir Publ., 1986. 189 p.
  24. Sharapov I.P. *Primenenie matematicheskoy statistiki v geologii* [Application of mathematical statistics in Geology]. Moscow, Nedra Publ., 1965. 260 p.
  25. Johnson N.L., Leone F.C. *Statistics and experimental design*. New York, London, Sydney, Toronto, John Wiley & Sons, 1977. 606 p.
  26. Montgomery D.C., Peck E.A. *Introduction to liner regression analysis*. New York, John Wiley & Sons, 1982. 504 p.
  27. Watson G.S. *Statistic on spheres*. New York, John Wiley and Sons, Inc., 1983. 238 p.
  28. Yarus J.M. *Stochastic modeling and geostatistics*. Tulsa, Oklahoma, John Wiley & Sons, 1994. 231 p.
  29. *Painter by Numbers (Kaggle)*. Available at: <https://inejc.github.io/kaggle/2016/11/17/painter-by-numbers-competition-on-kaggle/> (accessed 12 December 2020).

Received: 3 June 2020.

#### Information about the authors

**Nikita A. Popov**, head of the department of complex core studies, Affiliate Branch of OOO LUKOIL-Engineering PermNIPneft in Perm.

**Ivan S. Putilov**, Dr. Sc., deputy director for scientific work in the field of geology Affiliate Branch of OOO LUKOIL-Engineering PermNIPneft in Perm.

**Anastasiya A. Gulyaeva**, engineer of the 2<sup>nd</sup> category, Affiliate Branch of OOO LUKOIL-Engineering PermNIPneft in Perm.

**Ekaterina V. Vinokurova**, chief specialist, Affiliate Branch of OOO LUKOIL-Engineering PermNIPneft in Perm.



УДК 622.411

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ТУПИКОВЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК С ИСТОЧНИКОМ ВЫДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОТЫ

Казаков Борис Петрович<sup>1</sup>,  
aero\_kaz@mail.ru

Шалимов Андрей Владимирович<sup>1</sup>,  
shalimovav@mail.ru

<sup>1</sup> Горный институт УрО РАН филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН,  
Россия, 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78а.

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью снижения температуры воздуха в тупиковых горных выработках при ведении работ, связанных с выделением большого количества теплоты. Разработка способов нормализации термодинамических параметров рудничного воздуха в забоях на основе построения прогнозных математических моделей изменения теплового режима является необходимым условием обеспечения безопасности труда в горнодобывающей промышленности. **Цель:** получение зависимостей для определения скорости повышения температуры воздуха в тупиковой выработке при известных величинах интенсивности выделения теплоты и скорости её отведения вентиляционной струёй.

**Объекты:** тупиковые выработки и окружающий породный массив.

**Методы:** решение задачи нестационарного теплообмена рудничного воздуха и породного массива в сопряжённой постановке с помощью преобразований Лапласа; оценка безопасности по газовому фактору интенсификации выноса теплоты из горной выработки путём увеличения подачи воздуха в забой за счёт частично-повторного использования воздуха.

**Результаты.** Проведён анализ проблемы отвода теплоты, выделяющейся при работе оборудования в замкнутом пространстве горных выработок. Показано, что процессов поглощения теплоты породным массивом и её отведения за счёт проветривания может быть недостаточно для обеспечения нормативных значений температуры воздуха. Разработана математическая модель сопряжённого теплообмена воздуха и породного массива, позволяющая прогнозировать повышение температуры с течением времени в зависимости от длины выработки и суммарной интенсивности выделения теплоты в ней. Установлено, что теплообменные процессы продолжительностью в несколько часов могут моделироваться в приближении малых времён, что значительно упрощает расчётные зависимости. Произведён расчёт динамики теплового режима при характерном для шахтных условий наборе физических параметров задачи, результаты которого явились обоснованием сделанного приближения и подтвердили опасность быстрого увеличения температуры воздуха при недостаточной скорости выноса теплоты из выработки вентиляционной струёй. Доказано, что при необходимости дополнительного отведения теплоты можно применять источники тяги высокой производительности с частично-повторным использованием исходящего воздуха без риска увеличения содержания газов в тупиковых выработках.

### Ключевые слова:

Теплообмен, тупиковая выработка, породный массив, преобразования Лапласа, проветривание, частично-повторное использование воздуха.

### Введение

При работе механизмов часть потребляемой ими энергии переходит в теплоту, которая приводит к нагреву окружающего воздуха. На поверхности земли этот нагрев, как правило, проблем не создаёт, т. к. имеет место естественный конвективный теплообмен с атмосферой. В замкнутом же подземном пространстве возникает проблема теплоотведения, которое осуществляется движущимся по выработкам вентиляционным воздухом и теплообменом с породным массивом [1, 2]. Способ отвода теплоты с помощью проветривания является более эффективным [3], однако в некоторых случаях интенсивность проветривания оказывается недостаточной для нормализации температурных параметров воздуха [4, 5]. Так, при работе комбайна в забое тупиковой выработки количество выделяемой теплоты может превышать количество выносимой из забоя. В результате температура воздуха после начала работы комбайна будет постоянно повышаться, спустя некоторое время достигнет величин, недопустимых по правилам безопасности [6], и приведёт к риску возникновения аварийных

ситуаций, связанных с ухудшением состояния горнорабочих [7, 8].

Скорость повышения температуры воздуха в пространстве тупиковой выработки зависит также и от интенсивности поглощения теплоты горными породами [9]. Оценить теплоотводящий потенциал породного массива при недостаточном проветривании тупиковой выработки можно на основе решения задачи сопряжённого теплообмена и в результате определить время непрерывной работы комбайна, в течение которого не будут нарушены нормы безопасного ведения горных работ по тепловому фактору.

### Математическая модель теплообмена между воздухом и породным массивом

Тупиковая выработка моделируется цилиндрической полостью радиусом  $r_0$ , м, и длиной  $L \gg r_0$ , м. Теплообмен воздуха с массивом через боковые стенки не рассматривается, поскольку площадь их в данном приближении значительно меньше цилиндрической поверхности полости. Площадь поверхности теплообмена и объём полости составляют  $S = 2\pi r_0 L$  м<sup>2</sup> и

$V = 2\pi r_0^2 L \text{ м}^2$ , соответственно, источник теплоты задаётся интенсивностью тепловыделения в единицу времени на единицу объёма воздуха  $W$ , Вт/м<sup>3</sup>. В расчётной модели принято, что полость замкнута и выноса теплоты из неё нет, но если требуется учесть такой вынос теплоты  $W'$ , Вт/м<sup>3</sup>, то источником тепла следует считать  $W - W'$ , Вт/м<sup>3</sup>. Коэффициент теплоотдачи между массивом и воздухом предполагается равным бесконечности [10], также считается, что распространение теплоты внутри полости происходит мгновенно, т. е. температура воздуха в любой момент времени по всей длине одинакова. Данное приближение является корректным в случае быстрого турбулентного перемешивания воздуха, которое в шахтных условиях, безусловно, реализуется по причине интенсивного проветривания выработки и мощной тепловой адвекции, препятствующей образованию горизонтальной тепловой стратификации плотности воздуха. Это позволяет рассматривать процесс распространения теплоты только в породном массиве, а в воздушной среде учитывать лишь изменение теплоемкости в целом.

Предполагается, что температуры воздуха и массива изначально одинаковы и равны температуре породы  $T_\infty$ , °С на удалении от поверхности теплового контакта, на котором температурными изменениями можно пренебречь. Требуется определить скорость увеличения температуры воздуха в полости после появления источника выделения теплоты  $W$ . Нестационарные задачи теплообмена такого типа, как правило, решаются методами, основанными на введении модельной характеристики, именуемой «коэффициент нестационарного теплообмена» [11]. Однако, как было установлено в [12], подобные методы имеют значительную погрешность при проведении расчётов на малых временах теплообмена порядка нескольких часов. Поскольку непрерывное время работы комбайна является величиной именно такого порядка, то используется другая, более точный, метод расчёта нестационарного теплообмена рудничного воздуха с породным массивом, предложенный в работе [12].

Уравнение теплопроводности в массиве в цилиндрических координатах имеет вид:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \chi_m \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right),$$

где  $T = T(r, t)$  – температура массива как функция радиальной координаты  $r$ , м (от  $r_0$  до  $\infty$ ), и времени  $t$ , с;  $\chi_m$  – температуропроводность массива, м<sup>2</sup>/с. Плотность теплового потока из воздуха в массив, Вт/м<sup>2</sup>:

$$j = -c_v^m \chi_m \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=r_0},$$

где  $c_v^m$  – объёмная теплоёмкость массива, Дж/(м<sup>3</sup>·°С). Скачок температуры на границе раздела «массив–воздух» отсутствует, поскольку коэффициент теплоотдачи предполагается равным бесконечности. Изменение теплосодержания  $Q$ , Дж, воздуха в полости происходит в результате уменьшения теплоты за счёт  $j$  и прибыли тепла за счёт  $W$ :

$$\frac{dQ}{dt} = -jS + W \frac{V}{S}. \quad (1)$$

$Q = c_v^B T|_{r=r_0} V$ , где  $c_v^B$  – объёмная теплоёмкость воздуха, Дж/(м<sup>3</sup>·°С). При подстановке  $Q$ ,  $V$ ,  $S$ , выраженных через  $r_0$ , и  $j$  в (1) получается:

$$\left( -\frac{W}{c_v^B} + \frac{\partial T}{\partial t} \right) \Big|_{r=r_0} = \frac{2c_v^m \chi_m}{c_v^B r_0} \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=r_0}. \quad (2)$$

После ввода безразмерных переменных:  $[r] = r_0$  и  $[t] = r_0^2 / \chi_m$  уравнение (2) принимает вид:

$$\left( -a + \frac{\partial T}{\partial t} \right) \Big|_{r=1} = b \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=1}, \quad (3)$$

где выделены два безразмерных комплекса:

$$\frac{W r_0^2}{c_v^B \chi_m} \equiv a \quad \text{и} \quad \frac{2c_v^m}{c_v^B} \equiv b.$$

Уравнение теплопроводности в безразмерных переменных  $r$  и  $t$ :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right). \quad (4)$$

В начальном условии  $T$  отсчитывается от  $T_\infty$ :

$$T(r, t = 0) = 0. \quad (5)$$

Для решения уравнения теплопроводности (4) с граничным условием (3) и начальным условием (5) используется метод преобразования Лапласа, в котором производится замена  $T(r, t)$  на функцию-изображение  $\tau(r, p) = \int_0^{+\infty} e^{-pt} T(r, t) dt$ , что позволяет понизить размерность задачи. Сходимость интеграла обеспечивается положительным знаком комплексного параметра  $p$  ( $Re(p) > 0$ ). После проведения стандартной процедуры перехода от  $T$  к  $\tau$  с использованием (5) для (4) и (3) получается:

$$\begin{cases} \tau'' + \frac{1}{r} \tau' - p\tau = 0 \\ \left( -\frac{a}{p} + p\tau \right) \Big|_{r=1} = b\tau' \Big|_{r=1} \end{cases}, \quad (6)$$

где введены обозначения

$$\frac{d\tau}{dr} \equiv \tau' \quad \text{и} \quad \frac{d^2\tau}{dr^2} \equiv \tau''.$$

Общее решение обыкновенного дифференциального уравнения второго порядка для  $\tau$  в (6) имеет вид:

$$\tau(r, p) = c_1 J_0(r\sqrt{-p}) + c_2 N_0(r\sqrt{-p}), \quad (7)$$

где  $J_0$  и  $N_0$  – функции Бесселя и Неймана 0-го порядка. Поскольку на бесконечности массив всегда остаётся «непотревоженным», то  $T \rightarrow 0$  при  $r \rightarrow \infty$ , значит и  $\tau \rightarrow 0$  при  $r \rightarrow \infty$ , что связывает между собой коэффициенты  $c_1$  и  $c_2$ :

$$\frac{c_2}{c_1} = -\lim_{r \rightarrow \infty} \frac{J_0(\sqrt{-pr})}{N_0(\sqrt{-pr})} \equiv -k. \quad (8)$$

Из асимптотических разложений функций  $J_0$  и  $N_0$  при  $r \rightarrow \infty$  следует, что в (8)  $k=-i$  при  $\text{Im}(\sqrt{-p})>0$  и  $k=i$  при  $\text{Im}(\sqrt{-p})<0$ , где  $i$  – мнимая единица. Оставшийся неизвестный коэффициент находится в результате подстановки (7) в граничное условие для  $\tau$  в (6). В итоге функция-изображение  $\tau$  на границе раздела принимает следующий вид:

$$\tau(r=1, p) = \frac{a/p}{p + b\sqrt{-p} \frac{J_1(\sqrt{-p}) - kN_1(\sqrt{-p})}{J_0(\sqrt{-p}) - kN_0(\sqrt{-p})}}, \quad (9)$$

где  $J_1$  и  $N_1$  – функции Бесселя и Неймана 1-го порядка, полученные в результате дифференцирования  $J_0$  и  $N_0$ . Обратное преобразование Лапласа

$$T(r=1, t) = \frac{1}{2\pi i} \int_{x-i\infty}^{x+i\infty} e^{pt} \tau(r=1, p) dp \quad (10)$$

восстанавливает искомое значение функции-оригинала  $T(r=1, t)$ . Поскольку температура  $T$  ограничена, то  $x$  может быть любым вещественным положительным числом. Для лучшей сходимости процесса численного интегрирования оптимальной является величина  $x \sim 1/t$ , при которой показатель экспоненты в (10) имеет величину порядка единицы. Реальное время непрерывной работы комбайна имеет порядок нескольких часов, и при численном расчёте оказывается, что величина  $1/t$  настолько велика, что позволяет существенно упростить выражение для функции-изображения  $\tau$  с помощью асимптотических разложений функций Ганкеля  $H_n^{(1)}(z) = J_n(z) + iN_n(z)$  и  $H_n^{(2)}(z) = J_n(z) - iN_n(z)$  при больших значениях аргумента  $z$  [13]. В результате формула (9) принимает вид:

$$\tau(r=1, p) = \frac{a/p}{p + b\sqrt{-p}}.$$

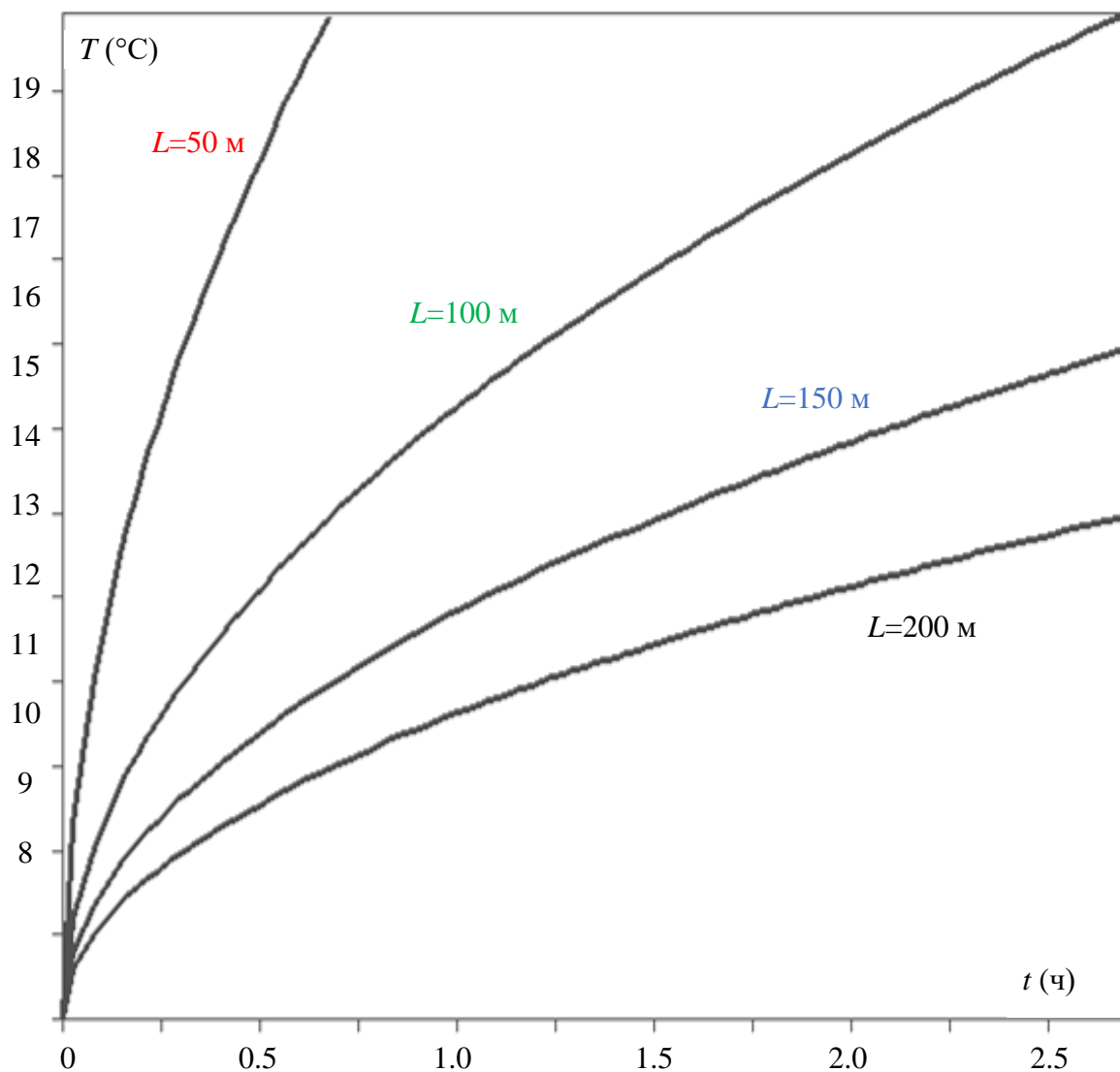


Рис. 1. Возрастание температуры воздуха со временем в зависимости от длины тупиковой выработки

Fig. 1. Increase in air temperature over time depending on the length of the dead-end workings

Это упрощение позволяет значительно улучшить сходимость процесса численного интегрирования и увеличить скорость счёта при незначительном увеличении погрешности. Следует заметить, что данное приближение годится только для малых времён, если же рассматриваемое время теплообмена составляет несколько дней и более, то следует использовать формулу (9).

Численный расчёт температуры воздуха в зависимости от времени производился при следующем характерном наборе параметров:  $c_v^M=1750$  кДж/(м<sup>3</sup>·°C),  $c_v^B=1300$  кДж/(м<sup>3</sup>·°C),  $\chi_M=5 \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с,  $r_0=2$  м,  $WV=500$  кВт. На рис. 1 представлены расчётные значения температуры при четырёх различных длинах полости  $L$ , м: 50, 100, 150 и 200, из которых видно, что температура воздуха в течение одного–двух часов поднимается на величину порядка 10 °C.

Интенсивность проветривания тупиковых выработок устанавливается, как правило, в соответствии с нормами безопасного содержания вредных примесей в рудничном воздухе [14]. В случае интенсивного

тепловыделения, на примере приведённого выше расчёта, тепловой фактор может оказаться критичнее и потребовать большей подачи воздуха для выноса теплоты либо его предварительного охлаждения в системах кондиционирования воздуха [15, 16]. При этом дополнительная подача воздуха с использованием части исходящей струи не должна приводить к ухудшению газовой обстановки в выработке.

#### Частично-повторное использование воздуха для интенсификации процесса выноса теплоты из тупиковой горной выработки

Рассматривается система, состоящая из двух горных выработок: тупиковой горной выработки и соединённой с ней сквозной горной выработки (рис. 2). В сквозной выработке задан некоторый постоянный расход воздуха  $Q$ . Проветривание тупиковой выработки осуществляется за счет работы вентилятора местного проветривания, установленного в сквозной выработке и имеющего вентиляционный трубопровод, протянутый до тупикового забоя.

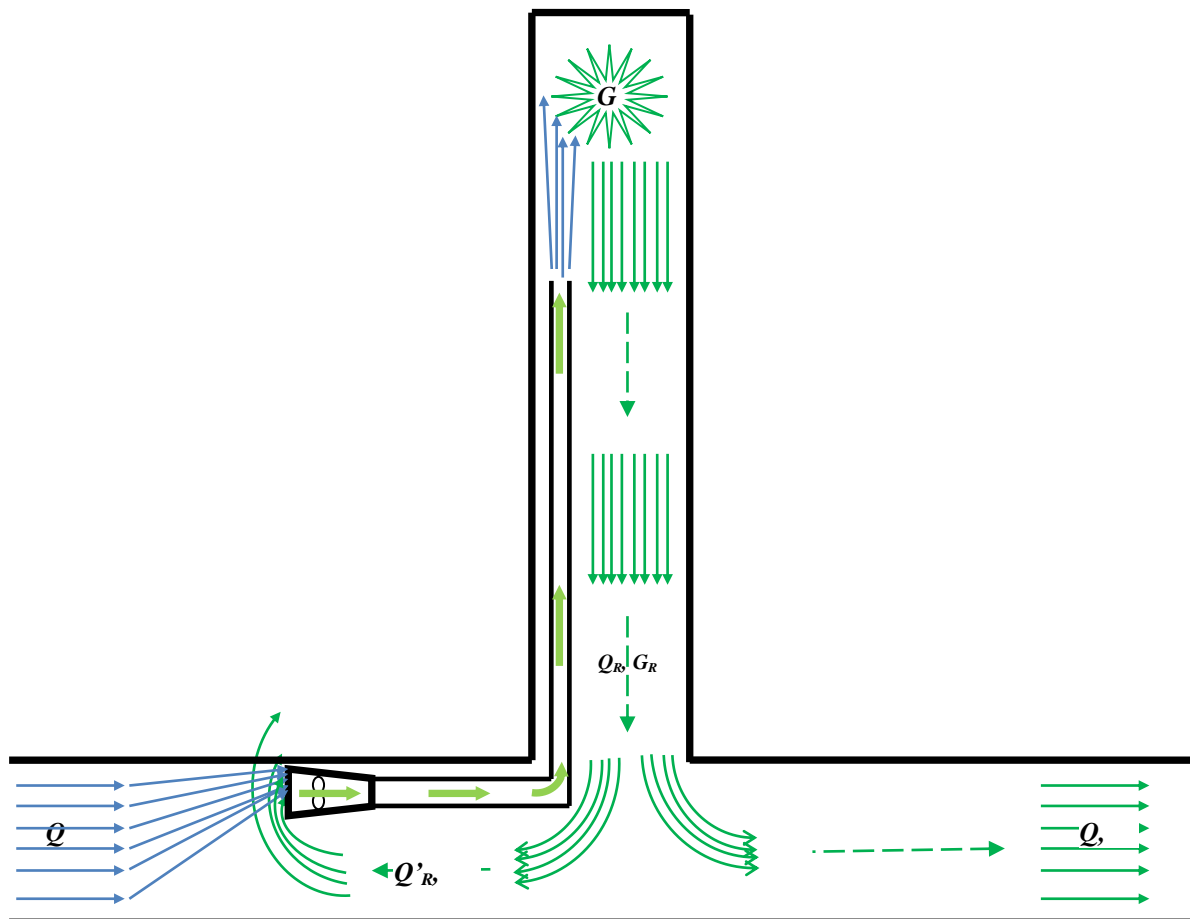


Рис. 2. Проветривание тупиковой выработки с использованием части исходящей струи

Fig. 2. Ventilation of dead-end workings using part of the outgoing jet

Согласно правилам безопасности, вентилятор местного проветривания: 1) должен быть установлен на расстоянии не менее 10 м от исходящей из устья тупиковой выработки струи отработанного (загазованного) воздуха и 2) не должен иметь производи-

тельность более 70 % от расхода свежего воздуха, поступающего по сквозной горной выработке. Такие ограничения введены в целях недопущения попадания исходящего воздуха обратно на всас вентилятора [17]. Действительно, при размещении вентилятора в

устье или в самой тупиковой выработке возникнет рециркуляция с коэффициентом тем большим, чем ближе к забою расположен вентилятор. Справедливость первого ограничения не вызывает сомнений, однако целесообразность второго неочевидна. Вероятно, имеется в виду, что если производительность вентилятора приближается к общему расходу воздуха  $Q$  и превышает его, то на всас вентилятора начинает поступать часть отработанного воздуха, что недопустимо по правилам безопасности [18]. Однако это не обосновано в случае, если расход свежего воздуха, подаваемого в призабойное пространство тупиковой выработки, достаточен для проветривания его по газовому фактору [19], но нет маломощного вентилятора с таким дебитом, либо требуется больше воздуха для выноса теплоты. В этом случае можно воспользоваться более мощным источником тяги, который в качестве недостающего воздуха использует часть исходящей воздушной струи. При этом концентрация вредных примесей в тупиковой выработке увеличиваться не будет, т. к. расход свежего воздуха и интенсивность газовыделений не изменяются. Этот очевидный факт можно, в качестве доказательства, наглядно продемонстрировать на основе следующей математической модели [20] рециркуляционного проветривания тупиковой выработки в нестационарной постановке (рис. 2).

В начальный момент времени  $t$ , с, производительность вентилятора в точности равна расходу поступающего свежего воздуха в сквозной выработке  $Q$ , м<sup>3</sup>/с. При этом выделение газа  $G$ , м<sup>3</sup>/с, в тупиковой выработке таково, что его концентрация в исходящей струе  $C_R = G/Q$  не превышает предельно допустимой величины. В следующий момент времени производительность вентилятора увеличивается на величину расхода  $Q'_R$ , м<sup>3</sup>/с, который подсасывается вентилятором из исходящей струи. Требуется выяснить, как будет изменяться концентрация газа в забое. В реальных условиях объём газа в воздухе намного меньше объёма чистого воздуха, поэтому изменение объёмного расхода воздуха при добавлении в него газа можно не учитывать  $Q + G \approx Q$ .

Нестационарная задача распространения газа решается при следующих начальных условиях.

- Начальный момент времени  $t=0$  – момент увеличения производительности источника тяги, т. е. в момент времени  $t=0$  вентилятор работает в обычном режиме,  $Q'_R=0$  и  $Q=Q_R$ , а в следующий момент времени  $t=+0$  – в режиме с повышенной производительностью,  $Q'_R \neq 0$  и  $Q_R = Q + Q'_R$ . Подача свежего воздуха  $Q$  при этом не изменяется.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Разработка энергосберегающих технологий обеспечения комфортных микроклиматических условий при ведении горных работ / Б.П. Казаков, Л.Ю. Левин, А.В. Шалимов, А.В. Зайцев // Записки Горного института. – 2017. – Т. 223. – С. 116–124.
2. McPherson M.J. Subsurface ventilation and environmental engineering. – London: Chapman & Hall, 2009. – 824 p.
3. Бокий Б.В., Алабьев В.Р., Тынына С.В. Методика обоснования параметров способа снижения температуры воздуха шахтной атмосферы призабойной зоны тупиковых подготовительных

- Концентрация газа в исходящей струе воздуха в начальный момент времени задана  $C_R^{(0)} = G/Q$ .

Решение задачи производится методом дискретизации, при котором время  $t$  разбивается на интервалы, за которые воздух совершает целое количество оборотов по замкнутому рециркуляционному контуру  $T$ , с:  $t_0=0$ ,  $t_1=T$ ,  $t_2=2T$ , ...,  $t_n=nT$ . В момент времени  $t_0=0$  –  $C_R^{(0)} = G/Q$ , при  $t_1=T$ , концентрация газа будет складываться из двух составляющих: 1) смешивания двух потоков – чистого и загазованного воздуха и 2) газовыделения в поток воздуха с увеличенным расходом:

$$C_R^{(1)} = \frac{Q \cdot 0 + Q'_R \cdot C_R^{(0)}}{Q + Q'_R} + \frac{G}{Q + Q'_R} = \frac{Q'_R \cdot C_R^{(0)}}{Q + Q'_R} + \frac{Q \cdot C_R^{(0)}}{Q + Q'_R} = C_R^{(0)},$$

что и требовалось доказать – концентрация газа не изменилась. На всех последующих интервалах времени будет то же самое – концентрация газа в тупиковой выработке при увеличении производительности вентилятора с подсосом исходящей струи не меняется.

#### Заключение

На основании результатов проведённого анализа можно сделать вывод, что теплоотводящий потенциал породного массива не высок и приводит к быстрому увеличению температуры воздуха в тупиковой выработке с мощным источником тепловыделения. Величина расхода воздуха для выноса вредных примесей может быть недостаточна для нормализации теплового режима. В этом случае целесообразно использование вентилятора местного проветривания с производительностью, превышающей подачу свежего воздуха, которое не приводит к увеличению загазованности тупиковой выработки, несмотря на то, что часть исходящей струи направляется обратно. Концентрация газа остаётся такой же, как в случае работы вентилятора с производительностью, равной расходу свежего воздуха, проходящего по сквозной горной выработке. При этом интенсивность выноса теплоты даже с учётом частично-повторного использования воздуха возрастает в результате теплообмена со встречным воздушным потоком.

Представленные в статье результаты моделирования тепловой и газовой обстановки в тупиковой выработке могут быть использованы для прогнозирования скорости возрастания температуры воздуха в забое при работе комбайна, а также для оценки необходимого количества вентиляционного воздуха для нормализации проветривания выработки по тепловому фактору.

выработок // Вестник Забайкальского государственного университета. – 2014. – № 12 (115). – С. 4–11.

4. Казаков Б.П., Шалимов А.В., Исаевич А.Г. Адвективное проветривание тупиковой выработки // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – № S7. – С. 76–82.
5. Amano K., Mizuta Y., Hiramatsu Y. An improved method of predicting underground Climate // International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts. – 1982. – № 19. – P. 31–83.

6. Вишневецкая Н.Л., Лискова М.Ю., Плахова Л.В. Проветривание тупиковых горных выработок как способ нормализации условий труда // Актуальные проблемы охраны труда и безопасности производства, добычи и использования калийно-магниевых солей: Материалы I Международной научно-практической конференции / под ред. Г.З. Файнбурга. – Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2018. – С. 344–350.
7. Analysis of regularities and reasons of accidents / W. Sheng, Z. Sheng, M. Gao, L. Yang // Progress in Mine Safety Science and Engineering II. – USA: CRC Press, 2014. 800 p.
8. Kirsch P., Shi M., Sprott D. Riskgate: industry sharing risk controls across Australian coal operations // Australian Journal of Multi Disciplinary Engineering. – 2014. – V. 11. – Iss. 1. – P. 47–58.
9. McPherson M.J. The analysis and simulation of heat flow into undergrounds airways // International Journal of Mining and Geological Engineering. – 1984. – V. 4. – P. 165–196.
10. Construction of air flow heat transfer coefficient and calculation of airflow temperature in mine wet roadway / Z. Li, T. Wang, M. Zhang, J. Jia, L. Lin // Meitan Xuebao. – 2017. – V. 42. – № 12. – P. 3176–3181.
11. Кремнёв О.А. Теплообмен между вентиляционной струёй и горными массивами старых шахт и выработок // Труды Института теплоэнергетики Академии наук УССР. – 1954. – № 10. – С. 12–17.
12. Казаков Б.П., Шалимов А.В., Гришин Е.Л. Теплообмен вентиляционного воздуха с крепью воздухоподающего ствола и породным массивом // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2011. – № 5. – С. 92–100.
13. Соболев С.Л. Уравнения математической физики. – М.: Наука, 1950. – 424 с.
14. Ермолаев А.М., Адамков А.В., Ермолаев А.А. Аэрогазодинамика тупиковой выработки // Вестник Научного центра Востока по промышленной и экологической безопасности. – 2018. – № 2. – С. 66–72.
15. Мартынов А.А., Майбенко Н.И., Плотникова Ю.А. Программное обеспечение расчетов температуры воздуха в тупиковых выработках глубоких шахт // Безопасность жизнедеятельности. – 2018. – № 2 (206). – С. 32–42.
16. Mackay L., Bluhm S., Van Rensburg J. Refrigeration and cooling concepts for ultra-deep platinum mining // Platinum in transition «Boom or Bust» – The Southern African Institute of Mining and Metallurgy: the 4<sup>th</sup> International Platinum Conference. – South Africa, 2010. – P. 35–39.
17. Локальная рециркуляция при работе вентилятора местного проветривания / А.И. Петров, Н.И. Алыменко, А.А. Каменских, А.В. Николаев // Актуальные проблемы повышения эффективности и безопасности эксплуатации горношахтного и нефтепромыслового оборудования. – 2016. – № 1. – С. 202–208.
18. Моряков П.В. Численное моделирование процесса перепуска отработавших газов дизельной энергоустановки в тупиковую выработку // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета. – 2011. – № 3 (26). – С. 37–41.
19. Comprehensive and integrated mine ventilation consultation model / Cheng Jianwei, Wu Yan, Xu Haiming, Liu Jin, Yang Yekang, Deng Huangjun, Wang Yi // Tunneling and Underground Space Technology. – 2015. – V. 45. – P. 166–180.
20. Красноштейн А.Е., Казаков Б.П., Шалимов А.В. Моделирование нестационарных процессов распространения газовых примесей по выработкам рудника в условиях рециркуляционного проветривания // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2006. – № 1. – С. 95–101.

*Поступила: 13.10.2019 г.*

#### Информация об авторах

**Казаков Б.П.**, доктор технических наук, главный научный сотрудник отдела аэрологии и теплофизики Горного института УрО РАН филиала Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН.

**Шалимов А.В.**, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник отдела аэрологии и теплофизики Горного института УрО РАН филиала Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН.

UDC 622.411

## SIMULATION OF THERMAL REGIME DYNAMICS OF DEAD-END MINE WORKINGS WITH HEAT RELEASE SOURCE

**Boris P. Kazakov<sup>1</sup>,**  
aero\_kaz@mail.ru

**Andrey V. Shalimov<sup>1</sup>,**  
shalimovav@mail.ru

<sup>1</sup> Mining Institute UB RAS,  
78-A, Sibirskaya street, Perm, 614007, Russia.

**The relevance** of the research is caused by the need to reduce the air temperature during mining operations in dead-end workings associated with the release of a large amount of heat. Development of ways to normalize the thermodynamic parameters of mine air in the faces based on the construction of predictive mathematical models of change of the thermal regime is a necessary condition for safety in the mining industry.

**The aim** of the research is to obtain dependences for determining the rate of air temperature increase in a dead-end mine at known values of the intensity of heat release and its removal by a ventilation jet.

**Objects:** dead-end workings and the surrounding rock mass.

**Methods:** solution of the problem of non-stationary heat transfer of mine air and rock mass in the conjugate formulation using Laplace transformations; safety assessment on the gas factor of intensification of heat removal from the production by increasing the air supply to the bottom using recirculation.

**Results.** The authors have analyzed the problem of heat removal, released during the operation of mining equipment in a confined space of mine workings. It is shown that heat absorption by the rock mass and its removal due to ventilation may not be enough to prevent excessive overheating of the air. A mathematical model of the conjugate heat exchange of air and rock is developed, which allows predicting the temperature increase over time depending on the length of production and the total intensity of heat release in it. It is established that heat exchange lasting several hours can be modeled in the approximation of small times, which greatly simplifies the calculated dependences. The calculation of the dynamics of the thermal regime under a set of physical parameters characteristic of mine conditions of the problem, the results of which were the basis of the approximation made and confirmed the danger of a rapid increase in air temperature with insufficient intensity of heat removal from the workings of the ventilation jet. It is proved that if additional heat removal is necessary, it is possible to use traction sources with a large flow rate and air recirculation, without fear of increasing gas content in the bottom hole.

### Key words:

Heat transfer, dead-end mining, rock mass, Laplace transformations, ventilation, recirculation.

### REFERENCES

- Kazakov B.P., Levin L.Yu., Shalimov A.V., Zaitsev A.V. Development of energy-saving technologies for providing comfortable microclimatic conditions in mining operations. *Notes of the Mining Institute*, 2017, vol. 223, pp. 116–124. In Rus.
- McPherson M.J. *Subsurface ventilation and environmental engineering*. London, Chapman & Hall, 2009. 824 p.
- Bokiy B.V., Alabyev V.R., Tynina S.V. The methodology for substantiating the parameters of the method for reducing the air temperature of the mine atmosphere of the bottomhole zone of the deadlock preparatory workings. *Bulletin of the Transbaikalian State University*, 2014, no. 12 (115), pp. 4–11. In Rus.
- Kazakov B.P., Shalimov A.V., Isaevich A.G. Advective airing of a dead-end mine. *Mountain Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*, 2015, no. S7, pp. 76–82. In Rus.
- Amano K., Mizuta Y., Hiramatsu Y. An improved method of predicting underground Climate. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts*, 1982, no. 19, pp. 31–83.
- Vishnevskaya N.L., Liskova M.Yu., Plakhova L.V. Provetriwanie tupikovykh gornyykh vyrabotok kak sposob normalizatsii usloviy truda [Airing of dead-end mine workings as a way to normalize working conditions]. *Aktualnye problemy okhrany truda i bezopasnosti proizvodstva, dobychi i ispolzovaniya kaliynomagnievykh soley. Materialy I Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Actual problems of labor protection and safety of manufacturing, production and use of potassium-magnesium salts. Materials of the I International Scientific and Practical Conference]. Ed. by G.Z. Feinburg. Perm, Perm National Research Polytechnic University, 2018. pp. 344–350.
- Sheng W., Sheng Z., Gao M., Yang L. Analysis of regularities and reasons of accidents. *Progress in Mine Safety Science and Engineering II*. USA, CRC Press, 2014. 800 p.
- Kirsch P., Shi M., Sprott D. Riskgate: industry sharing risk controls across Australian coal operations. *Australian Journal of Multi Disciplinary Engineering*, 2014, vol. 11, Iss. 1, pp. 47–58.
- McPherson M.J. The analysis and simulation of heat flow into undergrounds airways. *International Journal of Mining and Geological Engineering*, 1984, vol. 4, pp. 165–196.
- Li Z., Wang T., Zhang M., Jia J., Lin L. Construction of air flow heat transfer coefficient and calculation of airflow temperature in mine wet roadway. *Meitan Xuebao*, 2017, vol. 42, no. 12, pp. 3176–3181.
- Kremnev O.A. Teploobmen mezhdru ventilyatsionnoy struey i gornymi massivami starykh shakht i vyrabotok [Heat exchange between a ventilation stream and mountain massifs of old mines and workings]. *Trudy Instituta teploenergetiki Akademii nauk USSR*, 1954, no. 10, pp. 12–17.
- Kazakov B.P., Shalimov A.V., Grishin E.L. Heat exchange of ventilation air with the support of the air supply trunk and rock mass. *Physical and technical problems of mining*, 2011, no. 5, pp. 92–100. In Rus.
- Sobolev S.L. *Uravneniya matematicheskoy fiziki* [Equations of mathematical physics]. Moscow, Nauka Publ., 1950. 424 p.
- Ermolaev A.M., Adamkov A.V., Ermolaev A.A. Aerogas dynamics of dead-end production. *Bulletin of the Scientific Center of VostNII on industrial and environmental safety*, 2018, no. 2, pp. 66–72. In Rus.
- Martynov A.A., Maybenko N.I., Plotnikova Yu.A. Software for calculating air temperature in dead-end workings of deep mines. *Life Safety*, 2018, no. 2 (206), pp. 32–42. In Rus.

16. Mackay L., Bluhm S., Van Rensburg J. Refrigeration and cooling concepts for ultra-deep platinum mining. *The 4<sup>th</sup> International Platinum Conference. Platinum in transition «Boom or Bust» – The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. South Africa, 2010. pp. 35–39.
17. Petrov A.I., Alymenko N.I., Kamenskikh A.A., Nikolaev A.V. Local recirculation during operation of the local ventilation fan. *Actual problems of increasing the efficiency and safety of mining and oilfield equipment*, 2016, no. 1, pp. 202–208. In Rus.
18. Moryakov P.V. Numerical simulation of the process of transferring exhaust gases from a diesel power plant to a dead end. *Bulletin of the Moscow Automobile and Road State Technical University*, 2011, no. 3 (26), pp. 37–41. In Rus.
19. Cheng Jianwei, Wu Yan, Xu Haiming, Liu Jin, Yang Yekang, Deng Huangjun, Wang Yi Comprehensive and integrated mine ventilation consultation model. *Tunneling and Underground Space Technology*, 2015, vol. 45, pp. 166–180.
20. Krasnoshtein A.E., Kazakov B.P., Shalimov A.V. Modeling of unsteady processes of the distribution of gas impurities in the mine workings in the conditions of recirculation ventilation. *Physical and technical problems of mining*, 2006, no. 1, pp. 95–101. In Rus.

*Received: 13 October 2019.*

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

**Boris P. Kazakov**, Dr. Sc., chief researcher, Mining Institute UB RAS.

**Andrey V. Shalimov**, Dr. Sc., leading researcher, Mining Institute UB RAS.



УДК 622.276

## РАСЧЕТ PVT-СВОЙСТВ ДОБЫВАЕМОЙ ПРОДУКЦИИ ПО ДЛИНЕ ПОДЪЕМНИКА

Яхин Артур Рамилевич<sup>1</sup>,  
9406622@mail.ru

Назифуллина Ляйсан Халяфовна<sup>1</sup>,  
lyaisan0220@gmail.com

Газизова Эльвина Рустамовна<sup>1</sup>,  
gazizowa.elwina@yandex.ru

<sup>1</sup> Уфимский государственный нефтяной технический университет,  
Россия, 450062, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

**Актуальность.** Все технологические процессы, происходящие в пласте, стволе скважины и в системе сбора и подготовки нефти, газа и газоконденсата, требуют знания физико-химических свойств добываемой скважинной продукции. С этими параметрами связаны запасы углеводородов, изменение состава пластовой смеси, темп вторжения воды в залежь, парциальное давление отдельных компонентов, конструкция скважин, гидравлические потери, подбор оптимального режима эксплуатации и т. д. Все технологические процессы добычи, сбора, подготовки и транспортировки сопровождаются непрерывным изменением давления и температуры, которые непосредственно влияют на свойства продукции, «PVT-свойства». Отсутствием представлений о физико-химических свойствах и фазовых превращениях, протекающих при изменении термобарических условий в многокомпонентных системах, приводят к принятию неверных технологических решений, возникновению осложнений в процессе эксплуатации скважин и, как следствие, снижению эффективности разработки месторождения. Поэтому так важно уметь прогнозировать изменение давления и температуры и рассчитывать PVT-свойства по пути движения флюидов.

**Целью** данной работы является расчет и анализ изменения PVT-свойств добываемой продукции и температуры по длине скважины.

**Методы.** Для расчета плотности и вязкости нефти, объемного коэффициента нефти, растворимости и коэффициента сверхсжимаемости применена методика М.Б. Стэндинга, разработанная в США в результате многочисленных исследований проб нефти и газа, для расчета кривой изменения температуры по глубине скважины был использован метод И.Н. Алвеса.

**Выводы.** Растворимость газа линейно увеличивается с ростом давления, который также вызывает увеличение газосодержания и, соответственно, объемного коэффициента. В свою очередь, повышение газосодержания нефти приводит к плавному снижению плотности. С ростом температуры по стволу скважины происходит снижение вязкости нефти. Изменение термобарических условий обуславливает снижение коэффициента сверхсжимаемости по глубине скважины. Методика Алвеса не позволяет точно спрогнозировать изменение температуры по стволу скважины, что объясняется сложностью учета теплофизических свойств горных пород и флюидов.

### Ключевые слова:

Физико-химические свойства, температура по стволу скважины, давление в скважине, методика Стэндинга, метод Алвеса.

### Введение

Для наиболее точного расчета PVT-свойств нефти и газа по длине подъемника могут быть использованы лабораторные исследования, моделирующие изменение давления и температуры по длине подъемника. Подобные эксперименты трудоемки, и их сложно реализовать в условиях промысла. Поэтому эту задачу решают аналитически с применением корреляций.

Рассчитаем PVT-свойства добываемой продукции по длине подъемника на примере промысловых данных со скважин Восточного участка Оренбургского нефтегазоконденсатного месторождения.

Учитывая сложный состав пластовых флюидов по всему месторождению и среднюю глубину залегания продуктивных горизонтов, можно прийти к выводу о том, что в процессе извлечения продукции залежей протекают фазовые превращения и происходит непрерывное изменение ее свойств.

Согласно исходным данным, скважина 147 является нефтяной, фонтанирующей, безводной, значит, ее продукция содержит только две фазы: нефть и попутный газ. Давление на забое ниже давления насыщения,

следовательно, в скважине по всей длине происходит выделение газа и, как следствие, непрерывное изменение состава и свойств жидкой и газообразной фаз, что влияет на режим работы скважины, гидравлические потери по длине подъемника и в целом на показатели разработки. Из этого вытекает необходимость прогнозирования PVT-свойств нефти и газа в скважине [1–9]. Также корректное определение термобарических условий по глубине может повлиять на прогноз коррозии и изнашивания обсадной колонны и инструмента в процессе эксплуатации и бурения [10–12].

### Результаты расчетов

Расчет растворимости газа

Растворимость увеличивается по мере роста давления и становится постоянной при достижении давления насыщения.

Эмпирическая корреляция Стэндинга [13] позволяет определить растворимость газа и предполагает протекание контактного разгазирования, при котором газ испаряется с межфазной поверхности по мере того, как падение давления продолжает соответствовать

давлению нефти. Согласно этой методике растворимость  $R_s$  ( $\text{м}^3/\text{м}^3$ ) может быть определена по формуле:

$$R_s = 0,178\gamma_g \cdot \left[ \left( \frac{p}{1,254} + 1,4 \right) 10^{0,0125\gamma_{API} - 0,00163p - 0,02912} \right]^{1,2048},$$

где  $p$  – давление в смеси, бар;  $T$  – температура, °С;  $\gamma_g$  – удельная плотность газа:  $\gamma_g = 0,7$ ;  $\gamma_{API}$  – плотность нефти в градусах API:

$$\gamma_{API} = \frac{141,5}{\gamma_o} - 131,5 = \frac{141,5}{0,83921} - 131,5 = 37,11,$$

где  $\gamma_o$  – удельная плотность дегазированной нефти в  $\text{г}/\text{см}^3$  при 15,6 °С:

$$\gamma_o = \gamma_o^{20^\circ\text{C}} - \zeta(15,6 - 20) = 836 - 0,72984(-4,4) = 839,21 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3},$$

где  $\gamma_o^{20^\circ\text{C}}$  – плотность нефти в стандартных условиях:  $\gamma_o^{20^\circ\text{C}} = 836 \text{ кг}/\text{м}^3$ ;  $\zeta$  – температурная поправка:

$$\zeta = 1,825 - 0,00131\gamma_o^{20^\circ\text{C}} = 0,72984.$$

Распределение температуры и давления по стволу скважины, а также результаты расчета растворимости представлены на рис. 1.

Растворимость газа по глубине скважины линейно увеличивается, что объясняется значительным ростом давления по сравнению с ростом температуры, приводящим к снижению растворимости.

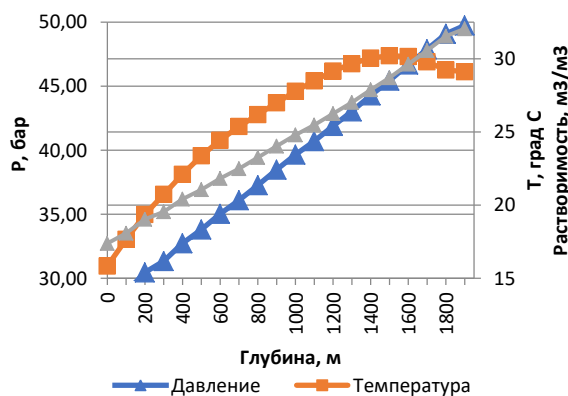


Рис. 1. Распределение температуры, давления и растворимости газа по длине подъемника

Fig. 1. Distribution of temperature, pressure and gas solubility along the lift length

Расчет объемного коэффициента нефти

Чем больше газа растворяется в нефти, тем выше значение объемного коэффициента нефти. Так происходит до тех пор, пока давление не достигнет точки насыщения. Когда давление превысит давление насыщения, газ перестает растворяться в нефти, а значение объемного коэффициента нефти начинает снижаться вследствие сжимаемости жидкости. Отметим, что значение объемного коэффициента нефти рассчитывается по разным уравнениям при давлении как ниже, так и выше давления насыщения. Согласно промышленным данным, давление насыщения  $P_{\text{нас}} = 202$  атм, значит,

давление в скважине по всей длине подъемника ниже  $P_{\text{нас}}$ . Корреляция Стэндинга для объемного коэффициента нефти при этих условиях имеет вид:

$$B_o = 0,9759 + 0,00012 \left[ 5,618R_s \left( \frac{\gamma_g}{\gamma_o} \right)^{0,5} + 2,25T + 40 \right]^{1,2}.$$

Результаты расчета приведены на рис. 2.

Объемный коэффициент увеличивается по мере роста глубины, что объясняется увеличением растворимости, а, следовательно, и газосодержания скважинной продукции; характер изменения коэффициента близок по форме к графику корневой функции.

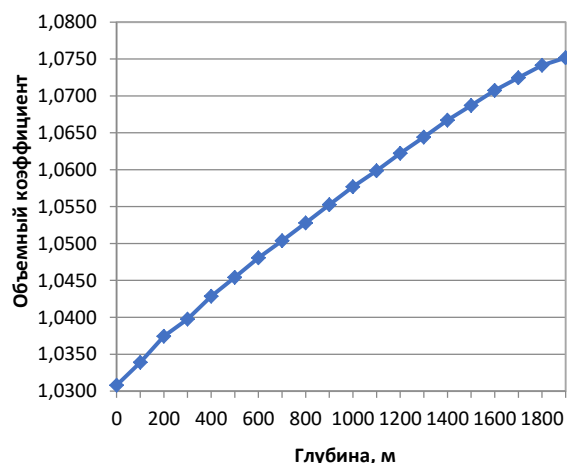


Рис. 2. Изменение объемного коэффициента по глубине скважины

Fig. 2. Oil volume factor change by well depth

Расчет плотности нефти

Для вычисления плотности насыщенной сырой нефти, давление которой ниже давления насыщения, необходимо знать значения растворимости газа  $R_s$ , объемного коэффициента нефти  $B_o$  и удельной плотности растворенного газа  $\gamma_{gd}$  [14]:

$$\rho_o = 16,02 \frac{62,4\gamma_o + 0,0764\gamma_{gd}}{B_o}.$$

Удельная плотность растворенного газа  $\gamma_{gd}$  рассчитывается по диаграмме Д.Л. Каца, которая иллюстрирует зависимость данного параметра от плотности сырой нефти (в градусах API) и растворимости газа.

Результаты вычислений представлены на рис. 3.

Плотность нефти снижается, что объясняется повышением газосодержания; зависимость от глубины близка к параболической.

Расчет вязкости нефти

Важным параметром в гидродинамических расчетах перепада давления для потока в трубах или пористой среде является вязкость сырой нефти, содержащей растворенный газ.

При построении эмпирических корреляций определяют вязкость дегазированной нефти. После того как будет установлено значение вязкости дегазированной

ванной нефти оно корректируется с учетом давления в пластовых условиях. Вязкость дегазированной нефти измеряют в лабораторных условиях.

М.Б. Стэндинг дал математические интерполяции, соответствующие графической корреляции Била [15] для вязкости в условиях атмосферного давления и заданной температуры  $T$  (в градусах Кельвина):

$$\mu_{od} = \left( 0,32 + \frac{1,8 \cdot 10^7}{\gamma_{API}^{4,53}} \right) \left( \frac{360}{1,8T - 260} \right)^a,$$

где

$$a = 10^{\left( \frac{0,43 + \frac{8,33}{\gamma_{API}}}{\gamma_{API}} \right)}.$$

Расчетные значения вязкости сведены в рис. 3.

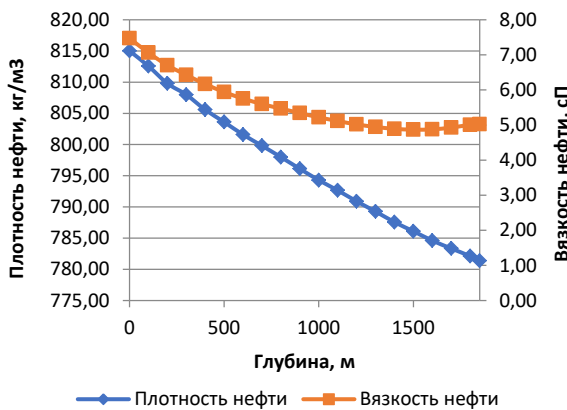


Рис. 3. Расчет плотности и вязкости нефти по глубине скважины

Fig. 3. Calculation of oil density and viscosity by well depth

Вязкость по глубине скважины значительно уменьшается за счет роста температуры, вогнутый участок графика свидетельствует о скачке температуры.

Расчет коэффициента сверхсжимаемости газа

Природные многокомпонентные газы – это реальные газы, для которых не действуют стандартные допущения. На основе результатов эмпирических исследований уравнение состояния идеального газа было модифицировано для реального газа – в него ввели коэффициент отклонения, т. е. коэффициент сверхсжимаемости  $Z$ .

М.Б. Стэндинг и Д.Л. Кац [16] совместно разработали номограмму для коэффициента  $Z$ , зависящего от псевдоприведенных температур  $T_{pr}$  и давлений  $p_{pr}$ . Для определения последних необходимо вычислить псевдокритическую температуру  $T_{pc}$  и давление  $p_{pc}$ . Стэндинг получил ряд эмпирических корреляций для этих величин:

$$T_{pc} = (168 + 325\gamma_g - 12,5\gamma_g^2) / 1,8 = 216,319^\circ K$$

$$p_{pc} = 0,0689(677 + 15\gamma_g - 37,5\gamma_g^2) = 46,103 \text{ бар}.$$

Номограмме Стэндинга и Каца эквивалентна корреляция Дранчака и Абу-Кассема:

$$Z = \left( 0,3265 + \frac{-1,07}{T_{pr}} + \frac{-0,5339}{T_{pr}^3} + \frac{0,01569}{T_{pr}^4} + \frac{-0,05165}{T_{pr}^5} \right) \rho_r + \left( 0,5475 + \frac{-0,7361}{T_{pr}} + \frac{0,1844}{T_{pr}^2} \right) \rho_r^2 - 0,1056 \left( \frac{-0,7361}{T_{pr}} + \frac{0,1844}{T_{pr}^2} \right) \rho_r^5 + 0,6134(1 + 0,721\rho_r^2) \frac{\rho_r^2}{T_{pr}^3} \exp(-0,721\rho_r^2) + 1,$$

где  $\rho_r$  – приведенная плотность газа:

$$\rho_r = \frac{0,27 p_{pr}}{Z T_{pr}}.$$

Результаты расчета приведены на рис. 4.

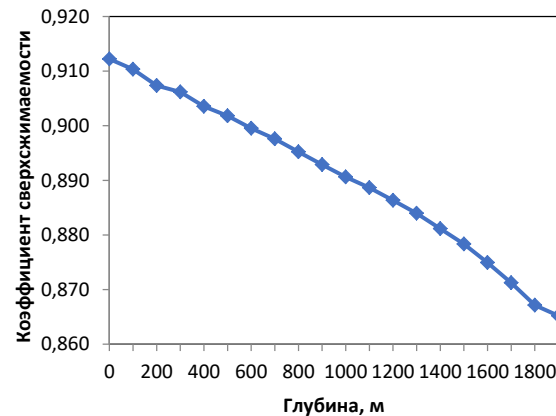


Рис. 4. Распределение коэффициента сверхсжимаемости по длине подъемника

Fig. 4. Distribution of the supercompressibility factor along the length of the lift

Коэффициент сверхсжимаемости уменьшается, что объясняется изменением термобарических условий.

Расчет кривой изменения температуры по глубине скважины

Задача прогнозирования распределения температуры в скважинах связана с применением законов сохранения массы, импульса и энергии. Иногда удобнее пользоваться уравнениями градиентов давления и энтальпии. Поскольку уравнения на их основе являются достаточно сложными, невозможно получить их точное аналитическое решение. Однако И.Н. Алвесу удалось разработать приближенный аналитический метод решения рассматриваемой задачи для потока в трубах при любом угле их наклона [17–20]. Решение выглядит следующим образом:

$$T_f = (T_{ei} - g_G L \sin \theta) + (T_i - T_{ei})^{-L/A} + g_G \sin \theta (1 - e^{-L/A}) A + \frac{1}{J \rho_L C_p} \frac{dp}{dL} \phi A (1 - e^{-L/A}),$$

где параметр  $A$  определяется согласно корреляции Шю-Беггза по формуле:

$$A = 96,8 \cdot 10^{-8} \omega^{0,5253} d_{ti}^{-0,2904} \gamma_{API}^{0,2608} \gamma_g^{4,4146} \rho_L^{2,9303},$$

$\omega$  – массовый расход, кг/с;  $d_{ii}$  – диаметр НКТ, м;  $\rho_L$  – плотность флюида по длине подъемника, кг/м<sup>3</sup>;  $T_f$  – температура флюида на глубине  $L$  (м), К;  $T_i$  – температура на входе в трубу, К;  $T_{ei}$  – температура пласта, К;  $g_G$  – градиент геотермальной температуры, К/м;  $\theta$  – угол между осью скважины и горизонталью, °;  $\frac{dp}{dL}$  – градиент давления, Па/м;  $C_p$  – теплоемкость, Дж/(кг·К);  $\phi$  – безразмерный коэффициент.

В условии задачи принимаем  $T_i=T_{ei}$  и пренебрегаем трением, т. е.  $\phi=0$ . Тогда уравнение примет вид:

$$T_f = (T_{ei} - g_G L \sin \theta) + g_G \sin \theta (1 - e^{-L/\Lambda}) \Lambda.$$

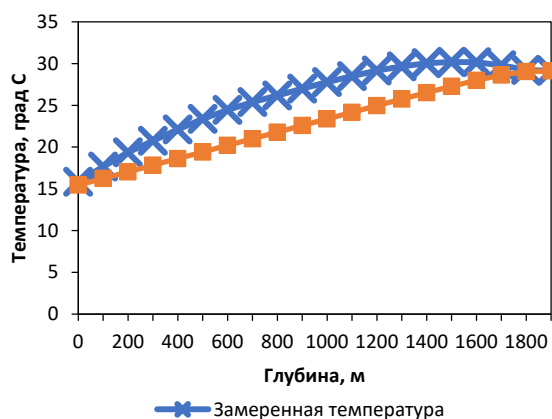


Рис. 5. Распределение температуры в стволе скважины  
 Fig. 5. Temperature distribution in the wellbore

Согласно исходным данным, массовый расход жидкости  $Q_{ж.мас}=23,01$  т/сут;  $d_{ii}=0,062$  м;  $g_G=0,008$  К/м;  $T_{ei}=(29612+273615)К=302,27К$ ;  $\theta=0^\circ$ .

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брилл Дж.П., Муерджи Х. Многофазный поток в скважинах. – М.; Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2006. – 384 с.
2. Индикаторная кривая для случая трехфазной фильтрации при забойном давлении ниже давления насыщения // М.Н. Харисов, Э.А. Юнусова, Э.А. Харисова, Р.А. Майский, С.Б. Будю // Нефтегазовое дело. – 2018. – № 1. – С. 32–37.
3. Особенности свойств нефти двухфазных залежей на примере пласта ПК1-3 Восточно-Мессояхского месторождения / И.О. Промзелев, Д.Н. Купоросов, А.И. Брусилковский, Е.Р. Чухланцева, Е.В. Тихомиров // PRONEFTЬ. Профессионально о нефти. – 2017. – № 1 (3). – С. 50–53.
4. Гиматулинов Ш.К. Физика нефтяного и газового пласта. – М.: Недра, 1971. – 312 с.
5. Мищенко И.Т. Расчеты при добыче нефти и газа. – М.: Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2008. – 296 с.
6. Дуношкин И.И., Мищенко И.Т., Елисеева Е.И. Расчеты физико-химических свойств пластовой и промысловой нефти и воды. – М.: ФГУП Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2004. – 448 с.
7. Буровой комплексный реагент для промывочных жидкостей на водной основе: пат. 2590254 Рос. Федерация. № 2015110263/03; заявл. 23.03.2015, опубл. 15.06.2016, Бюл. № 19. – 6 с.
8. Ященко И.Г., Полищук Ю.М. Физико-химические свойства трудноизвлекаемых нефтей Российской Арктики // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 6. – С. 64–71.

$$\omega = \frac{Q_{ж.мас} \cdot 10^3}{24 \cdot 60 \cdot 60} = \frac{23,01 \cdot 10^3}{86400} = 0,266 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Результаты расчета представлены на рис. 5.

Сравнение фактических и вычисленных значений температуры по стволу скважины позволяет сделать вывод о том, что метод Алвеса не учитывает термические свойства различных горных пород, что особенно важно в случае сложного геологического строения месторождения. В результате мы получаем значительную погрешность в определении температуры по длине подъемника.

#### Заключение

Анализируя полученные результаты по расчету PVT-свойств по методикам Стэндинга, можно судить о том, что по мере подъема скважинной продукции происходит уменьшение растворимости газа, причем закон изменения по глубине соответствует линейной функции. В свою очередь снижается газосодержание и объемный коэффициент, плотность смеси увеличивается, причем зависимости этих параметров от глубины представляют собой степенные функции. Вязкость и коэффициент сжимаемости с падением температуры скважинной продукции увеличиваются.

Разработка аналитических методов прогнозирования температуры в скважине по глубине осложнена необходимостью учета теплотехнических свойств различных горных пород, пластовых флюидов, которыми приходится пренебрегать, как и в случае с методикой Алвеса. Это неизбежно приводит к появлению расхождений между фактическими и теоретическими значениями температуры.

9. Cawkwell M.G., Charles M.E. Pressures, temperatures predicted for two-phase pipelines // Oil & Gas Journal. – 1985. – V. 83 (21). – P. 101–107.
10. Исследование износостойкости замков буровых труб при трении о горную породу в различных средах / А.Р. Яхин, Г.В. Конесев, Ф.Н. Янгиров, А.М. Фролов // Территория Нефтегаз. – 2014. – № 6. – С. 30–35.
11. Возможности рентгенофлуоресцентного спектрального метода при определении элементного состава ядерного материала / А.Д. Бадикова, Ф.Х. Кудашева, Г.А. Тенгерова, А.Р. Яхин, Л.Р. Мухаматдинова, Р.А. Ялалова, Н.А. Якунова, И.Е. АLEXИНА // Вестник Башкирского университета. – 2015. – Т. 20. – № 4. – С. 1189–1192.
12. Упрочнение поверхностей для повышения ресурса работы буровых труб / А.Р. Яхин, Р.А. Исмаков, Р.Р. Гарифуллин, Ф.Н. Янгиров // Нефтегазовое дело. – 2014. – № 4. – С. 381–399.
13. Standing M.B. Volumetric and phase behavior of oil field hydrocarbon systems. – Dallas: Society of Petroleum Engineers, 1977. – 142 p.
14. Standing M.H., Katz D.L. Density of natural gases // Transactions of the Metallurgical Society of AIME. – 1942. – V. 146. – P. 140–142.
15. Яркеева Н.Р., Ишбулатов И.А. К вопросу об эффективности технологии низкотемпературной сепарации // Нефтегазовое дело. – 2019. – Т. 17. – № 1. – С. 13–23.
16. Dranchuk P.M., Abu-Kassem J.H. Calculation of Z-factors for natural gases using equations-of-state // Journal of Canadian Petroleum Technology – 1975. – V. 34. – P. 14–16.
17. Alves I.N., Albanati F.J.S., Shoham O. Unified model for predicting flowing temperature distribution in wellbores and pipelines // Society of Petroleum Engineers. – 1992. – V. 7. – P. 363–367.

18. Ramey H.J. Jr. Wellbore heat transmission // Journal of Petroleum Technology. – 1962. – V. 427. – P. 225–228.
19. Coulter D.M., Bardon M.F. Revised equation improves flowing gas temperature prediction // Oil & Gas Journal. – 1979. – V. 107. – P. 78–81.
20. Shin K.C., Beggs H.D. Predicting temperatures in flowing wells // Journal of Energy Resources Technology. – 1980. – V. 102. – P. 2–7.

Поступила 03.06.2020 г.

#### **Информация об авторах**

**Яхин А.Р.**, кандидат технических наук, доцент кафедры бурения нефтяных и газовых скважин, Уфимский государственный нефтяной технический университет.

**Назифуллина Л.Х.**, студентка кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газонефтяных месторождений, Уфимский государственный нефтяной технический университет.

**Газизова Э.Р.**, студентка кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газонефтяных месторождений, Уфимский государственный нефтяной технический университет.

UDC 622.276

## CALCULATION OF BOREHOLE PRODUCTS PVT-PROPERTIES ALONG THE LIFT LENGTH

Artur R. Yakhin<sup>1</sup>,  
9406622@mail.ru

Lyaisan Kh. Nazifullina<sup>1</sup>,  
lyaisan0220@gmail.com

Elvina R. Gazizova<sup>1</sup>,  
gazizowa.elvina@yandex.ru

<sup>1</sup> Ufa State Oil Technical University,  
1, Kosmonavtov street, Ufa, 450062, Russia.

**Relevance.** All technological processes occurring in the reservoir, wellbore and in the system for collecting and preparing oil, gas and gas condensate require knowledge of the physicochemical properties of the well production. These parameters are associated with hydrocarbon reserves, changes in composition of the reservoir mixture, the rate of water intrusion into the reservoir, partial pressure of individual components, well construction, hydraulic losses, selection of the optimal operation mode, etc. All technological processes of extraction, collection, preparation and transportation are accompanied by continuous changes in pressure and temperature, which directly affect the properties of products, «PVT-properties». The lack of ideas about the physicochemical properties and phase transformations occurring when the temperature and pressure conditions change in multicomponent systems leads to adoption of incorrect technological decisions, occurrence of complications during the well operation and, consequently, decrease in the efficiency of field development. Therefore, it is important to be able to predict the change in pressure and temperature and calculate the PVT-properties along the fluid flow path.

**The aim** of this work is to calculate and analyze changes in the PVT-properties of the produced products and the temperature along the well length.

**Methods.** The Standing method, developed in the USA as a result of numerous studies of oil and gas samples, was used to calculate oil density and viscosity, oil volume factor, solubility, and supercompressibility factor; the Alves method was used to calculate the temperature change curve over the well depth.

**Findings.** The solubility of gas increases linearly with rising pressure, which also leads to growth in gas content and, accordingly, the volume factor. The increase in oil gas content results in its turn in density gradual decrease. Temperature grows along the wellbore leads to decrease of oil viscosity. The development of analytical methods for predicting temperature in a well over depth is complicated by the need to take into account the thermophysical properties of rocks, reservoir fluids, which have to be neglected, as is the case with the Alves method. This inevitably results in discrepancies between actual and theoretical temperature values.

**Key words:**

Physicochemical properties, wellbore temperature, well pressure, Standing technique, Alves method.

## REFERENCES

1. Brill Dzh.P., Mukerdzhi H. *Mnogofazny potok v skvazhinakh* [Multiphase flow in wells]. Moscow, Izhevsk, Computer research institute Publ., 2006. 384 p.
2. Kharisov M.N., Yunusova E.A., Kharisova E.A., Mayskiy R.A., Budo S.B. The inflow performance relationship for the three-phase flow. *Neftegazovoe delo*, 2018, no. 1, pp. 32–37. . In Rus.
3. Promzelev I.O., Kuporosov D.N., Brusilovskiy A.I., Chukhlantseva E.R., Tikhomirov E.V. Peculiarities of reservoir oil properties of two-phase deposits on the example of the PK1-3 layer Vostochno-Messoyakhskoe field. *PRONEFT. Professionalno o nefii*, 2017, no. 1 (3), pp. 50–53. In Rus.
4. Gimatudinov Sh.K. *Fizika neftyanogo i gazovogo plasta* [Oil and gas reservoir physics]. Moscow, Nedra Publ., 1971. 312 p.
5. Mishchenko I.T. *Raschety pri dobyche nefi i gaza* [Calculations in oil and gas production]. Moscow, Neft i gaz» RGU nefi i gaza im. I.M. Gubkina Publ., 2008. 296 p.
6. Dunyushkin I.I., Mishchenko I.T., Eliseeva E.I. *Raschety fiziko-khimicheskikh svoystv plastovoy i promyslovoy nefi i vody* [Calculations of physical and chemical properties of reservoir and field oil and water]. Moscow, Neft i gaz RGU nefi i gaza im. I.M. Gubkina Publ., 2004. 448 p.
7. Konesev V. G. *Burovoy kompleksny reagent dlya promyvochnykh zhidkostey na vodnoy osnove* [Drilling complex reagent for water-based flushing water]. Patent RF 2590254, 2016.
8. Yashchenko I.G., Polishchuk Yu.M. Physicomchemical properties of hard-to-recover oils of Russian Arctic. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 6, pp. 64–71. In Rus.
9. Cawkwell M.G., Charles M.E. Pressures, temperatures predicted for two-phase pipelines. *Oil & Gas Journal*, 1985, vol. 83 (21), pp. 101–107.
10. Yakhin A.R., Konesev G.V., Yangirov F.N., Frolov A.M. Study of drill pipe joint wear resisting properties under friction against rock in various media. *Territoriya Neftegaz*, 2014, no. 6, pp. 30–35. In Rus.
11. Badikova A.D., Kudasheva F.H., Teptereva G.A., Yakhin A.R., Muhamatdinova L.R., Yalalova R.A., Yakunova N.A., Alekhina I.E. The possibilities of x-ray fluorescence spectral method in the determination of the elemental composition of core material. *Vestnik Bashkirskogo universiteta*, 2015, vol. 20, no. 4, pp. 1189–1192. In Rus.
12. Yakhin A.R., Ismakov R.A., Garifullin R.R., Yangirov F.N. Surface hardening for drill pipe life improvement. *Elektronny nauchny zhurnal Neftegazovoe delo*, 2014, no. 4, pp. 381–399. In Rus.
13. Standing M.B. *Volumetric and phase behavior of oil field hydrocarbon systems*. Dallas, Society of Petroleum Engineers, 1977. 142 p.
14. Standing M.H., Katz D.L. Density of natural gases. *Transactions of the Metallurgical Society of AIME*, 1942, vol. 146, pp. 140–142.
15. Yarkeeva N.R., Ishbulatov I.A. To the question of low-temperature separation technology efficiency. *Neftegazovoe delo*, 2019, vol. 17, no 1, 13–23. In Rus.
16. Dranchuk P.M., Abu-Kassem J.H. Calculation of Z-factors for natural gases using equations-of-state. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 1975, vol. 34, pp. 14–16.

17. Alves I.N., Albanati F.J.S., Shoham O. Unified model for predicting flowing temperature distribution in wellbores and pipelines. *Society of Petroleum Engineers*, 1992, vol. 7, pp. 363–367.
18. Ramey H.J. Jr. Wellbore heat transmission. *Journal of Petroleum Technology*, 1962, vol. 427, pp. 225–228.
19. Coulter D.M., Bardon M.F. Revised equation improves flowing gas temperature prediction. *Oil & Gas Journal*, 1979, vol. 107, pp. 78–81.
20. Shin K.C., Beggs. H.D. Predicting temperatures in flowing wells. *Journal of Energy Resources Technology*, 1980, vol. 102, pp. 2–7.

*Received: 3 June 2020.*

**Information about the authors**

**Artur R. Yakhin**, Cand. Sc., associate professor, Ufa State Petroleum technical University.

**Lyaisan Kh. Nazifullina**, student, Ufa State Petroleum technical University.

**Elvina R. Gazizova**, student, Ufa State Petroleum technical University.

УДК 621.316.72

## ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ ГРУПП ТОЧЕК ПОСТАВКИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ГАРАНТИРУЮЩИХ ПОСТАВЩИКОВ ВТОРОГО УРОВНЯ

**Хомутов Станислав Олегович<sup>1</sup>,**  
homutov.so@yandex.ru

**Сташко Василий Иванович<sup>1</sup>,**  
altgtu@mail.ru

**Серебряков Николай Александрович<sup>1</sup>,**  
na\_serebryakov@altke.ru

<sup>1</sup> Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,  
Россия, 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46.

**Актуальность** обусловлена необходимостью повышения точности краткосрочного прогнозирования электропотребления групп точек поставки электроэнергии гарантирующих поставщиков второго уровня. Результаты данного прогноза используются системным оператором при формировании диспетчерского графика выработки и потребления электроэнергии. Ошибки прогнозирования, как правило, приводят к увеличению расхода первичных энергоресурсов на выработку электроэнергии за счет необоснованных пусков и остановов генерирующего оборудования, а также к увеличению потерь при передаче электроэнергии, вследствие выбора неоптимальной схемы электрических сетей. Так как потребление электроэнергии зависит от множества факторов, задача краткосрочного прогнозирования данного временного ряда является слабоформализуемой. В данных условиях традиционные средства математической статистики и имитационного моделирования не позволяют строить адекватные прогнозные модели. До недавнего времени единственным адекватным методом прогнозирования потребления электроэнергии был метод экспертных оценок. В настоящее время для краткосрочного прогнозирования электропотребления энергосистемы региона страны или группы точек поставки электроэнергии гарантирующего поставщика первого уровня все большее применение находят инструменты нейронных сетей. Однако разработанные модели мало пригодны для прогнозирования почасового потребления электрической энергии групп точек поставки электроэнергии гарантирующих поставщиков второго уровня. Краткосрочное прогнозирование потребления электроэнергии данных объектов осложнено тем, что, помимо стандартных временных и метеорологических факторов, необходимо учитывать надежность электросетевого оборудования 6–110 кВ, режим работы потребителей электрической энергии с мощностью 670–10000 кВт, а также наличие центрального отопления и горячего (холодного) водоснабжения в населенном пункте, питающемся от группы точек поставки электроэнергии. Для них остается открытым вопрос выбора оптимальной архитектуры и конфигурации нейросетевой модели, а также алгоритма ее обучения, при использовании которых достигается требуемая точность прогнозирования.

**Цель:** повышение точности краткосрочного прогнозирования электропотребления групп точек поставки электроэнергии гарантирующего поставщика второго уровня с помощью инструментов нейронных сетей и глубокого машинного обучения.

**Методы:** методы корреляционного и факторного анализа, теории искусственных нейронных сетей и машинного обучения. Программная реализация теоретических выкладок выполнена с помощью библиотеки глубокого машинного обучения Tensor flow Keras на языке программирования Python 3.6.

**Результаты.** Разработан нейросетевой алгоритм краткосрочного прогнозирования электропотребления групп точек поставки электроэнергии гарантирующего поставщика второго уровня с адаптивными в процессе обучения параметрами скорости обучения и момента инерции. Выполнена программная реализация данного алгоритма в библиотеке глубокого машинного обучения Tensor flow Keras. Использование данной искусственной нейронной сети позволило снизить среднемесячную относительную ошибку прогнозирования на 5,14 %.

### **Ключевые слова:**

Краткосрочное прогнозирование электропотребления, искусственные нейронные сети, алгоритм обучения, оптовый рынок электроэнергии и мощности, группа точек поставки электроэнергии, градиентный спуск.

### **Введение**

В настоящее время на выработку электроэнергии потребляется огромное количество первичных энергоресурсов, таких как уголь, нефть, газ. Немалая часть из них расходуется на пуски генерирующего оборудования. Для минимизации необоснованных пусков генерирующего оборудования формируется диспетчерский график производства и потребления электроэнергии. Системный оператор использует результаты краткосрочного прогнозирования электропотребления (short-term load forecasting – STLF) крупных потребителей электроэнергии при формиро-

вании диспетчерского графика. То есть точность STLF влияет на режим функционирования электроэнергетических систем. Ошибки прогнозирования, как правило, приводят к необоснованным пускам и остановам генерирующего оборудования, а также к выбору неоптимальной схемы электрических сетей. Это, в свою очередь, приводит к снижению эффективности функционирования энергосистемы, за счёт увеличения расхода первичных энергоресурсов на выработку электрической энергии, а также к увеличению потерь при ее передаче. Заблаговременная оценка надежности является необходимым условием для



функционирования и развития современных электроэнергетических систем (ЭЭС), которые характеризуются развитием распределенной генерации, возобновляемых источников энергии, интеллектуализацией, что усложняет ЭЭС и вносит свои коррективы в процесс оценки надежности ЭЭС [1]. Кроме того, растущая доступность возобновляемых источников энергии увеличивает нестабильность баланса мощности энергосистемы, поскольку появляется дополнительная неопределенность на стороне производства электроэнергии [2, 3]. Совокупность данных факторов делают краткосрочное прогнозирование электропотребления критическим аспектом обеспечения надежности и эффективности энергосистемы [2].

Ценовая конъюнктура на оптовом рынке электроэнергии и мощности (ОРЭМ) складывается так, чтобы стимулировать крупных покупателей электроэнергии, таких как гарантирующие поставщики электроэнергии (ГП), придерживаться собственных прогнозов. Для достижения адекватных финансовых результатов ГП необходимо прогнозировать собственное почасовое потребление электроэнергии по всем группам точек поставки электроэнергии (ГТП) на ОРЭМ с высокой точностью. Достижение высокой точности прогнозирования затруднено наличием множества факторов, влияющих на электрическую нагрузку [4].

На сегодняшний день энергосбытовыми компаниями в основном используются интуитивные методы прогнозирования электропотребления. Вследствие человеческого фактора и ряда других причин использование данных методов не позволяет уменьшить ошибку прогноза ниже определенного значения. Наиболее эффективным путем повышения качества STLF является формализация данного процесса. Однако наличие множества факторов, влияющих на потребление электроэнергии, а также стохастический характер некоторых из них делает задачу STLF слабоформализуемой. В условиях неопределенности традиционные методы математической статистики или имитационного моделирования не позволяют строить адекватные модели объектов [5]. В настоящее время стремительно развиваются методы искусственного интеллекта и глубокого машинного обучения. Данные методы являются эффективным инструментом решения слабоформализуемых или неформализуемых задач. Несмотря на то, что теоретическая основа для применения нейросетевых алгоритмов была разработана еще во второй половине XX в., до недавнего времени применение инструментов машинного обучения для решения задачи STLF сдерживалось недостатком вычислительной мощности ЭВМ.

За последние несколько десятилетий ученые разработали множество методов повышения точности STLF, которые можно разделить на: методы, основанные на математической статистике, методы искусственного интеллекта и гибридные методы [2, 4]. Независимо от большого количества существующих алгоритмов краткосрочного прогнозирования электропотребления, ни один из них нельзя назвать универсальным. Разработанные методы предназначены либо для прогнозирования электрической нагрузки энерго-

системы региона страны или ГТП гарантирующего поставщика первого уровня [6], либо для прогнозирования электропотребления конечных потребителей, таких как здания или промышленные предприятия [7–10]. Однако данные модели непригодны для прогнозирования почасового потребления электрической энергии ГТП гарантирующих поставщиков второго уровня. Краткосрочное прогнозирование потребления электроэнергии данных объектов осложнено, помимо стандартных временных и метеорологических факторов, надежностью электросетевого оборудования 6–110 кВ, режимом работы потребителей электрической энергии с мощностью 670–10000 кВт, а также наличием центрального отопления и горячего (холодного) водоснабжения в населенных пунктах, относящихся к ГТП.

С учетом дополнительных факторов при STLF остаются открытыми вопросы выбора оптимальной архитектуры и конфигурации нейросетевой модели, при которых достигается максимальная точность прогнозирования. В то же время до сих пор не существует формализованных методов проектирования и настройки параметров искусственных нейронных сетей (ИНС). Под каждую конкретную задачу необходимо разрабатывать собственную нейронную сеть, для которой оптимальное значение всех гиперпараметров подбирается на основе многочисленных опытов с обучающей и тестовой выборкой.

Так как гарантирующие поставщики второго уровня имеют до нескольких десятков групп точек поставки электроэнергии на ОРЭМ, для каждой из которых ежедневно необходимо составить прогноз электропотребления на следующие сутки, для них особое значение приобретает скорость обучения прогнозной модели на свежих статистических данных. Для данной категории объектов прогнозирования необходимо, по возможности, выбирать модели не слишком требовательные к вычислительным мощностям.

Стоит также отметить, что точность краткосрочного прогнозирования зависит не только от математической модели, но также от набора связанных статистических данных [10]. В случае, если исходные данные для прогнозирования сильно зашумлены, или учтены не все влияющие факторы, результаты прогнозирования будут неудовлетворительными. Следовательно, формирование обучающей выборки на основе статистических данных, наряду с проектированием прогнозной модели, является важнейшей составляющей STLF.

#### **Анализ основных факторов, влияющих на потребление электроэнергии ГТП ГП второго уровня**

Слово «прогноз» в буквальном переводе с греческого означает «перед знанием», т. е. до того, как появится реальное знание (наблюдение) предмета или явления, до того, как событие наступит [11]. Прогнозирование электропотребления позволяет инфраструктурным организациям моделировать и прогнозировать нагрузки для поддержания баланса между производством и спросом, снижать себестоимость продукции, оценивать реальную цену на электроэнергию, а также управлять режимом и планировать ве-

дение будущих мощностей. В литературе хорошо освещен вопрос краткосрочного прогнозирования спроса на электроэнергию. Данный вид прогнозирования важен при управлении энергосистемой, пусках энергоблоков, экономической диспетчеризации, а также на рынках электроэнергии [7].

Предварительным этапом прогнозирования любого временного ряда является анализ факторов, влияющих на поведение данной функциональной зависимости. В случае краткосрочного прогнозирования временного ряда электропотребления ГТП гарантирующего поставщика второго уровня с помощью инструментов ИНС данный анализ приобретает особое значение. Выбор высококоррелированных входных данных имеет ключевое значение для моделей прогнозирования потребления электроэнергии, построенных на основе искусственного интеллекта [8]. К ним можно отнести временные факторы, метеорологические факторы, факторы надежности питающей сети и режима работы крупных потребителей электроэнергии ГТП, а также факторы наличия центрального отопления и горячего (холодного) водоснабжения в населенных пунктах, относящихся к ГТП. Детальное понимание факторов, влияющих на спрос на электроэнергию, может помочь смягчить последствия от нестабильности производства электроэнергии за счёт тарифного стимулирования потребления электроэнергии в определенные часы суток [3].

#### **Анализ влияния временных факторов на поведение временного ряда потребления электроэнергии ГТП**

Временные факторы обусловлены наличием циклических закономерностей в поведении временного ряда электрической нагрузки ГТП ГП различной длительности (сутки, неделя, год). Данная группа факторов обуславливает основные тенденции изменения суточного графика электрической нагрузки (СГЭН) в течение определенного интервала времени. Знание динамики поведения временного ряда в ту или иную фазу цикла позволяет производить более качественную кластеризацию исходных данных при STLF. Целью кластеризации является разбиение исходных данных в однородные подмножества, называемые кластерами. Однородность измеряется в соответствии с различными критериями, такими как внутриклассовые и межклассовые отклонения или меры различия [12].

При анализе суточных изменений графика электрической нагрузки ГТП гарантирующего поставщика второго уровня можно отметить, что имеет ярко выраженные утренний и вечерний пики, между которыми располагается зона относительной просадки электропотребления, а также значительное снижение потребления электроэнергии в ночные часы суток. Эти характерные особенности СГЭН обусловлены повседневным ритмом жизни людей, режимом работы предприятий и т. д.

При рассмотрении недельного цикла можно утверждать, что форма графиков электропотребления сильно коррелирована с повседневным образом жизни людей и режимом работы предприятий. В течение рабочей недели форма СГЭН практически не изменяется.

Небольшие отличия имеют СГЭН в начале и конце рабочей недели. Значительное изменение формы СГЭН происходит в выходные дни вследствие остановки некоторой части оборудования промышленных предприятий, отсутствия необходимости подготовки к следующему рабочему дню у части населения.

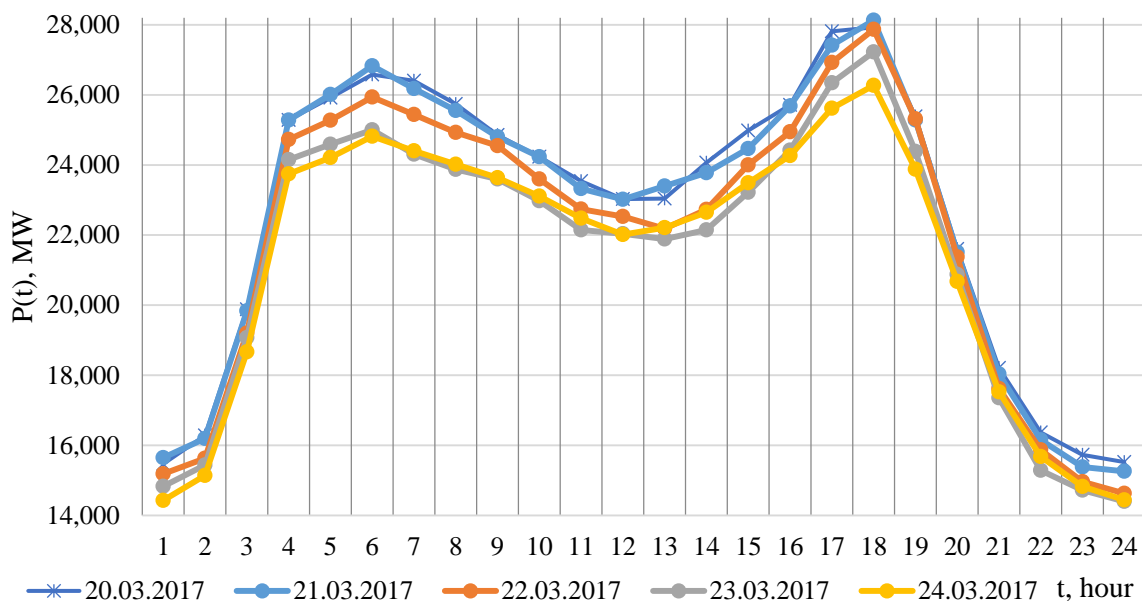
В течение года суточные графики потребления электроэнергии ГТП ГП постоянно изменяют свою форму. Это обусловлено постоянным изменением температуры воздуха, длительности светового времени суток, сезонными работами и т. д. В целом тенденции изменения суточного потребления электроэнергии повторяются из года в год. При рассмотрении цикла длительностью в один год необходимо учитывать, что праздничные дни характеризуются значительной просадкой электропотребления, а также ростом электрической нагрузки в дневные часы суток, предшествующим празднованию. Учет признаков праздничных и предпраздничных дней позволяет избежать значительных отклонений фактического потребления электроэнергии от прогнозного в период праздничных суток.

#### **Влияние метеорологических факторов на временной ряд электрической нагрузки ГТП гарантирующего поставщика**

Помимо внутренних тенденций поведение временного ряда потребления электроэнергии в краткосрочной перспективе определяется группой метеорологических факторов. Погодные условия являются наиболее влиятельными экзогенными переменными при краткосрочном прогнозировании электрической нагрузки [13].

На основании схожих исследований [14] можно сделать вывод, что между временными рядами потребления электроэнергии и температуры воздуха имеется сильная отрицательная корреляционная связь. Отрицательная корреляция сохраняется до наступления периода экстремально высоких температур. При среднесуточной температуре воздуха выше комфортных 20 °С появляется необходимость включения дополнительного климатического оборудования, которое увеличивает потребление электроэнергии. На рис. 1 представлены суточные графики электрической нагрузки группы точек поставки электроэнергии «Кулундинская» в период 20–24 марта 2017.

В период 20–24 марта 2017 произошло резкое повышение температуры в городе Славгороде с –13,3 °С 20.03.2017 до –2 °С 23.03.2017 и 24.03.2017. Графики на рис. 1 хорошо иллюстрируют сильную зависимость почасовых объемов электропотребления ГТП ГП второго уровня от температуры наружного воздуха. Также стоит отметить, что изменение объемов потребления электроэнергии, вызванное изменением температуры, имеет некоторую инерционность. Данное явление обусловлено тем, что изменение температуры в отапливаемых помещениях запаздывает по отношению к изменениям температуры наружного воздуха. Предлагается учитывать инерционность при STLF с помощью фактора дисперсии выборки из 24-х предыдущих значений температуры:



**Рис. 1.** Суточные графики электрической нагрузки группы точек поставки электроэнергии «Кулундинская» в период 20–24 марта 2017

**Fig. 1.** Daily load curve of delivery point cluster «Kulundinskaya» in the period 20–24 March 2017

$$D = \frac{1}{24} \sum_{i=1}^{24} (t_i - \bar{t})^2, \quad (1)$$

где  $D$  – выборочная дисперсия последних 24-х значений температуры воздуха;  $t_i$  – температура воздуха в час  $i$ ;  $\bar{t}$  – выборочное среднее.

Рост дисперсии  $D$  из выражения (1) будет сигнализировать о серьезных изменениях температурного режима. Так как дисперсия рассчитывается на основании выборки из 24-х значений, кратковременные перепады температуры наружного воздуха не будут вызывать ее значительного роста.

Влияние ветровой нагрузки на потребление электроэнергии ГТП невозможно оценить однозначно. В работе [9] говорится, что использование скорости ветра как отдельного фактора при STLF снижает точность прогнозирования. Однако однозначно можно говорить о том, что ветер влияет на субъективное ощущение человеком температуры наружного воздуха, а также увеличивает теплопотери в отапливаемых помещениях. Величины температуры наружного воздуха и скорости ветра можно одновременно учесть с помощью ветро-холодового индекса Стедмана (The Steadman Wind Chill) [15]:

$$T_{WC} = 1,41 - 1,162V + 0,98T + 0,0124V^2 + 0,0185TV, \quad (2)$$

где  $T_{WC}$  – ветро-холодовой индекс;  $V$  – скорость ветра, м/с;  $T$  – температура воздуха, °С.

Ветро-холодовой индекс представляет собой регрессионную модель второго порядка, полученную на основании статистических данных о биометрических измерениях, производившихся во многих странах с 1940 по 1994 гг. Использование ветро-холодового индекса при STLF позволяет уменьшить размерность факторного пространства без потери полезной информации, описывающей поведение временного ряда потребления электроэнергии ГТП.

Следующим по степени влияния на электрическую нагрузку метеорологическим фактором является естественная освещенность. Значительное снижение естественной освещенности происходит только при наличии дождевых облаков нижнего яруса. Также нельзя говорить, что уменьшение освещенности неизменно влечет увеличение электропотребления ГТП. В летнее время года снижение освещенности сопровождается снижением электрической нагрузки. Данное обстоятельство объясняется тем, что в дождливую погоду отключается часть климатического оборудования, а также отпадает необходимость полива сельскохозяйственных культур. На основании вышеизложенного, а также в связи с проблематичностью получения статистических данных о естественной освещенности по всем районам из зоны деятельности гарантирующего поставщика можно сделать вывод о целесообразности применения фактора наличия осадков при STLF.

Учет влияния остальных метеорологических факторов необоснованно увеличит размерность факторного пространства, при том что увеличения точности прогнозирования это не повлечет.

#### Учёт случайных воздействий на временной ряд потребления электроэнергии

Не все данные, необходимые для составления прогноза потребления электроэнергии, являются детерминированными. К стохастическим факторам, которые оказывают влияние на результаты STLF, можно отнести аварийные отключения на электросетевом оборудовании, а также поломки основного оборудования крупных потребителей электроэнергии ГТП гарантирующего поставщика второго уровня. Темой отдельного исследования является прогнозирование отказов элементов электросетевого оборудования с помощью аппарата нейронных сетей [16].

Однако существуют данные, необходимые для составления STLF, которые не являются детерминированными, но в то же время вероятность их возникновения достаточно велика. К ним можно отнести информацию о плановых ремонтных работах на электросетевом оборудовании, данные о режиме работы крупных потребителей электроэнергии ГТП ГП, данные о начале и конце отопительного периода, данные об отключениях горячего и холодного водоснабжения. Данные факторы создают дополнительную неопределенность при составлении прогноза. Однако без их учета резко снижается точность STLF.

АО «Алтайкрайэнерго» является гарантирующим поставщиком электроэнергии второго уровня на части территории Алтайского края. В литературе хорошо освещен вопрос разработки моделей краткосрочного прогнозирования электропотребления энергосистемы субъекта РФ [6]. При краткосрочном прогнозировании электрической нагрузки таких крупных объектов можно не учитывать ремонтные работы на сетевом оборудовании ниже 220 кВ, а также режим работы большинства потребителей электроэнергии. В то же время отключения на сетевом оборудовании 6–110 кВ режим работы потребителей электроэнергии мощностью свыше 670 кВт в значительной степени сказывается на потреблении электроэнергии ГТП ГП второго уровня. На рис. 2 представлены суточные графики потребления электроэнергии ГТП «Корчинская» при плановых ремонтах на сетевом оборудовании филиала ПАО «МРСК Сибири» – «Алтайэнерго».

26.04.2017 на подстанциях «Романовская» и «Мамонтовская», входящих в ГТП «Корчинская», проводились плановые работы по чистке изоляции. Как мы видим из рис. 2, потребление электроэнергии ГТП «Корчинская» в часы ремонтных работ уменьшилось в среднем на 69,77 %, а после подачи напряжения произошел скачок электрической нагрузки. Во избе-

жание больших отклонений фактического потребления электроэнергии от прогнозного необходимо учитывать все плановые работы на сетевом оборудовании, обеспечивающем транспорт электрической энергии до конечного потребителя.

При прогнозировании почасовых объемов электропотребления ГТП гарантирующих поставщиков второго уровня необходимо учитывать режим работы крупных потребителей электроэнергии с мощностью свыше 670 кВт, так как электрическая нагрузка данных потребителей соизмерима с нагрузкой всей ГТП. Учет режима работы более мелких потребителей электроэнергии ГТП ГП значительно усложнит архитектуру модели прогнозирования без увеличения точности STLF.

Таким образом, к основным факторам, оказывающими решающее воздействие на поведение временного ряда электропотребления ГТП ГП второго уровня в краткосрочной перспективе, можно отнести:

- порядковый номер дня в году;
- порядковый номер дня в неделе;
- длина светового дня;
- признак предпраздничного дня;
- признак праздничного дня;
- признак каникул в образовательных учреждениях;
- признак наличия центрального отопления;
- признак наличия горячего водоснабжения;
- признак наличия холодного водоснабжения;
- почасовые значения ветро-холодового индекса, °С;
- дисперсия 24-х предыдущих значений температуры наружного воздуха, °С;
- количество осадков, мм;
- режим работы всех потребителей электроэнергии ГТП с мощностью свыше 670 кВт;
- режим работы всех фидеров, питающих потребителей электроэнергии ГТП.

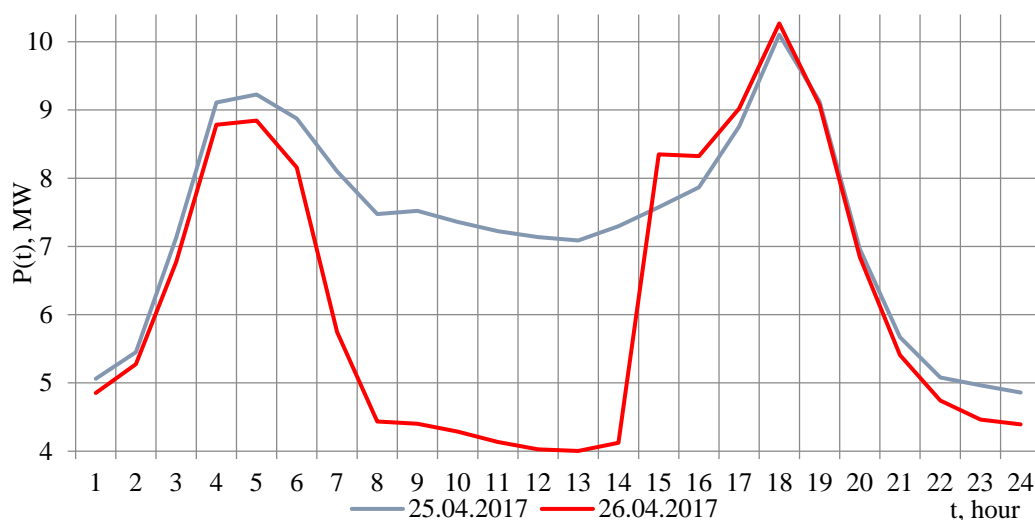


Рис. 2. Суточные графики потребления электроэнергии группы точек поставки «Корчинская» при плановых ремонтных на сетевом оборудовании филиала ПАО «МРСК Сибири» – «Алтайэнерго»

Fig. 2. Daily load curve of delivery point cluster «Korchinskaya» with scheduled repairs on electric grid equipment of the branch of PJSC «IDGC of Siberia» – «Altaienergo»

На основании набора факторов формируется выборка, предназначенная для обучения и тестирования ИНС. Из множества параметров, определяющих электрическую нагрузку, выбираются те, которые могут быть внесены в обучающую выборку, то есть доступные в открытых источниках или вычисляемые на основании открытой информации [6].

**Проектирование искусственной нейронной сети для решения задачи прогнозирования электропотребления ГТП «на сутки вперед»**

STLF является сложной задачей. В настоящее время для решения подобных задач используется аппарат искусственных нейронных сетей. Способность к обобщению информации, описывающей нелинейные зависимости в сложных объектах, процессах и явлениях, неотъемлемая черта ИНС, присущая ей по внутренней природе – по структуре и по способу функционирования на основе обучения [17].

Проектирование ИНС начинается с выбора парадигмы обучения. Для решения задачи STLF ГТП ГП второго уровня хорошо подходит парадигма обучения с учителем, так как при возможности формирования желаемого отклика из данных тренировочной выборки ИНС, обучаемые с учителем, достигают более высокой точности прогноза по сравнению с нейронными сетями, обучаемыми на основе самоорганизации.

В процессе обучения ИНС с учителем все параметры в модели, управляемой данными (Data-driven models), изменяются на основании систематического сравнения отклика модели со статистическими данными [18]. То есть целью обучения является получение отклика ИНС наиболее статистически схожего с желаемым:

$$\begin{cases} e(n) = d(n) - y(n); \\ E(n) = \frac{1}{2} e^2(n), \end{cases} \quad (3)$$

где  $e(n)$  – абсолютная ошибка ИНС на шаге обучения  $n$ ;  $d(n)$  – желаемый отклик ИНС;  $y(n)$  – фактический отклик сети ИНС;  $E(n)$  – функция потерь.

Только после того, как выходная ошибка сети становится ниже требуемого значения, модель может быть пригодна для практического применения со свежими входными данными [19].

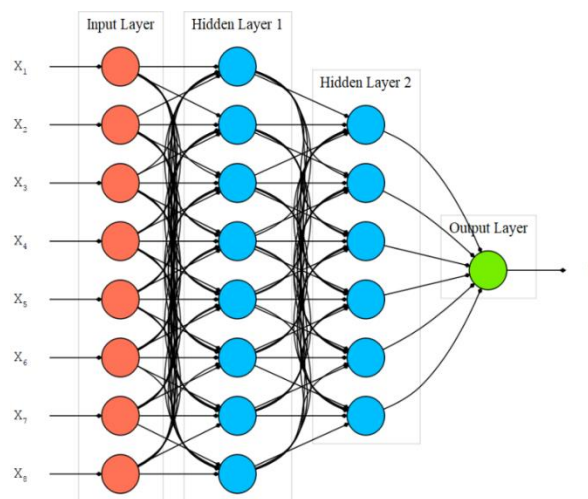
На следующем этапе выбирается архитектура нейронной сети, которая связана с алгоритмом обучения. Методы глубокого обучения широко и успешно применяются для ряда задач, таких как классификация и распознавание объектов [20]. В отличие от обычных структур ИНС, глубокая нейронная сеть (DNN) имеет больше одного скрытого слоя. Многослойная структура вычислительных слоев увеличивает способность сети к абстрагированию признаков, что делает их более эффективными в изучении сложных нелинейных моделей [7].

К ИНС, построенным на методах глубокого машинного обучения, можно отнести сети прямого распространения, такие как многослойные перцептроны и сверточные нейронные сети, рекуррентные нейронные сети [7] и скрытые Марковские сети. Многослу-

пенчатые системы, связанные с цепями Маркова, описывают широкий спектр механических, физических и экономических процессов [21]. Для прогнозирования состояния таких систем хорошо подходят сети Маркова [19]. Ограничением применения рекуррентных нейронных сетей и скрытых сетей Маркова для решения задачи STLF ГТП гарантирующего поставщика второго уровня являются большие затраты вычислительных мощностей на обучение данных сетей. Это, в свою очередь, вызывает значительное увеличение времени обучения ИНС. Так как ГП второго уровня могут иметь более десяти ГТП на ОРЭМ (в частности, АО «Алтайкрайэнерго» имеет 15 ГТП), по которым ежедневно формируется прогноз электропотребления «на сутки вперед», скорость обучения прогнозной модели является критичным параметром.

При решении схожих с STLF задач – распознавании рукописного текста и объектов на изображении, хорошо зарекомендовали себя сети прямого распространения. Ограничением применения сверточных ИНС является сложность представления входных данных, так как сверточные слои оперируют с двух- и трехмерными массивами данных, в то время как обучающая выборка представляет собой одномерный вектор-столбец. На основании вышеизложенного можно сделать вывод о том, что многослойный перцептрон является оптимальной архитектурой ИНС для решения задачи краткосрочного прогнозирования почасового потребления электроэнергии ГТП гарантирующего поставщика второго уровня. Обучение многослойных перцептронов происходит на основании алгоритма обратного распространения ошибки.

На рис. 3 представлена структурная схема многослойного перцептрона.



**Рис. 3. Структурная схема многослойного перцептрона**  
**Fig. 3. Structural diagram of a multilayer perceptron**

В рассматриваемой структуре нейроны регулярным образом организованы в слои. Слой содержит совокупность нейронов с едиными входными сигналами [22]. Нейронная сеть, изображенная на рис. 3, состоит из: входного слоя сенсорных элементов, нескольких скрытых слоев, в которых происходят ос-

новные вычисления в ИНС, и выходного слоя, формирующего итоговый отклик ИНС на входное воздействие.

#### Выбор оптимального значения гиперпараметров ИНС

Нейронные сети прямого распространения характеризуются набором гиперпараметров: значение момента инерции и скорости обучения ИНС на каждой итерации обучающего цикла, количество скрытых слоев, а также нейронов в каждом скрытом слое, наличие смещения функции активации. Выбор оптимального значения гиперпараметров ИНС напрямую влияет на способность ИНС адекватно описывать поведение временного ряда почасовых объемов электропотребления ГТП. В настоящее время не существует формализованных методов определения оптимального значения гиперпараметров. Преодоление вышеприведенных недостатков на практике достигается перебором различных вариантов архитектур, типов нейронов, начальных условий, методов обучения и дальнейшим выбором наиболее удачного решения [23].

Количество нейронов во входном и выходном слоях определяется на основании размера векторов входных данных и желаемого отклика ИНС:

$$\begin{cases} m_0 = 24 \cdot f \\ m_3 = 24 \end{cases}, \quad (4)$$

где  $m_0$  – размер входного сенсорного слоя ИНС;  $24 \cdot f$  – суточные значения величин основных влияющих факторов;  $m_3$  – размер выходного слоя, соответствующий 24-м значениям прогнозного СГЭН на следующие сутки.

Размер и количество скрытых слоев напрямую влияет на ассоциативную память нейронной сети. Очень важно определить оптимальное количество нейронов в каждом скрытом слое, так как малое количество нейронов не позволит ИНС извлечь всю полезную информацию из данных обучающей выборки, а сеть со слишком большим количеством нейронов в скрытых слоях будет склонна к переобучению. В настоящее время существуют только практические рекомендации по выбору оптимального размера скрытых слоев [24]:

$$\begin{cases} m_1 = m_3 \cdot \left( \sqrt[3]{\frac{m_0}{m_3}} \right)^2 \\ m_2 = m_3 \cdot \sqrt[3]{\frac{m_0}{m_3}} \end{cases}, \quad (5)$$

где  $m_1$  – количество нейронов в первом скрытом слое;  $m_2$  – количество нейронов во втором скрытом слое.

Однако оптимальный размер скрытых слоев определяется исключительно на основании многочисленных экспериментов с обучающей и тестовой выборкой.

Остальные гиперпараметры ИНС вытекают из принципа функционирования искусственного нейрона и алгоритма обучения ИНС. Искусственный нейрон – это математическая модель, имитирующая биологический нейрон центральной нервной системы, который имеет нелинейную реакцию на входные сиг-

налы [25]. Математическим описанием функционирования является выражение:

$$\begin{cases} u_k = \sum_{j=1}^m w_{kj} x_j \\ v_k = u_k + b_k \\ y_k = \varphi(v_k) \end{cases}, \quad (6)$$

где  $u_k$  – взвешенная сумма входных воздействий на нейрон  $k$ ;  $w_{kj}$  – вес синаптической связи, соединяющей нейрон  $k$  и нейрон  $j$ ;  $x_j$  – входной сигнал нейрона  $k$  от нейрона  $j$ ;  $v_k$  – индуцированное локальное поле нейрона  $k$ ;  $b_k$  – порог активации нейрона  $k$ ;  $y_k$  – отклик на входные воздействия нейрона  $k$ ;  $\varphi(v_k)$  – функция активации.

Алгоритм обратного распространения ошибки предполагает прямой и обратный проходы вычислений. При прямом проходе веса синаптических связей не изменяются, а функциональный сигнал, передающийся от слоя к слою, формирует итоговый отклик сети на основании выражения (6). При обратном проходе вычисляется функция потерь для каждого нейрона скрытых и выходного слоев на основании выражения (3). Вычисляется сумма энергий ошибки по всем нейронам выходного слоя:

$$E_c(n) = \frac{1}{2} \sum_{j \in C} e_j^2(n), \quad (7)$$

где  $C$  – множество нейронов выходного слоя.

Из выражений (3), (6), (7) видно, что функция энергии ошибки зависит только от свободных параметров ИНС (весов синаптических связей и порогов активации). Обучение сети заключается в определении составляющих вектора весов ее синаптических связей, доставляющих минимум суммарной квадратичной ошибки сети (7) [26]. Геометрической интерпретацией функции потерь является поверхность ошибки в пространстве свободных параметров ИНС. То есть в процессе обучения необходимо произвести итеративную коррекцию свободных параметров ИНС с целью нахождения глобального минимума на поверхности ошибки.

Последовательная выпуклая оптимизация играет ключевую роль в решении задач, где постоянно обновляется статистическая информация [27]. То есть имеется целевая функция, для которой необходимо найти максимум или минимум за счёт оптимизации некоторых ее скалярных параметров. Если целевая функция дифференцируема по своим параметрам, то градиентный спуск является относительно эффективным методом оптимизации [28]. Поиск глобального минимума на поверхности ошибки с помощью метода градиентного спуска (SGD) происходит на основании цепного правила:

$$\begin{aligned} \frac{\partial E(n)}{\partial w_{kj}(n)} &= \frac{\partial E(n)}{\partial e_k(n)} \frac{\partial e_k(n)}{\partial y_k(n)} \frac{\partial y_k(n)}{\partial v_k(n)} \frac{\partial v_k(n)}{\partial w_{kj}(n)} = \\ &= -e_k(n) \varphi'(v_k(n)) x_j(n) = -\delta_k(n) x_j(n), \end{aligned} \quad (8)$$

где  $\delta_k(n)$  – локальный градиент нейрона  $k$  на шаге обучающего цикла  $n$ .

Исходя из выражения (8), в случае использования сигмоидальной функции активации, коррекция веса синаптической связи принимает вид:

$$\Delta w_{kj}(n) = \eta \delta_k(n) x_j(n) + \alpha \Delta w_{kj}(n-1), \quad (9)$$

где  $\Delta w_{kj}(n)$  – корректировка веса взаимодействия между нейронами  $k$  и  $j$  на шаге обучения  $n$ ;  $\eta$  – параметр скорости обучения;  $\alpha$  – параметр момента инерции;  $\Delta w_{kj}(n-1)$  – корректировка веса взаимодействия между нейронами  $k$  и  $j$  на шаге обучения  $n-1$ .

На основании выражения (9) можно сделать вывод, что параметры скорости обучения и момента инерции на каждой итерации обучающего цикла влияют на способность алгоритма к сходимости к глобальному минимуму на поверхности ошибки, в области которого функция потерь (7) принимает минимальное значение.

Алгоритм обратного распространения ошибки, с помощью которого обучается ИНС, при всех его достоинствах, связанных со скоростью работы, простотой и т. д., имеет существенный недостаток, заключающийся в том, что при обучении ИНС за счет минимизации ошибки методом градиентного спуска можно получить не абсолютное (глобальное) значение минимума, а локальное (т. е. данная нейронная сеть будет недоучена). Современные алгоритмы обучения ИНС, такие как ADAM [28], позволяют преодолеть данный недостаток за счет применения адаптивных параметров скорости обучения и постоянной момента инерции. ADAM является алгоритмом оптимизации первого порядка, основанным на градиентном спуске. Он эффективен в вычислительном отношении и подходит для оптимизации моделей с большим набором параметров [29]. Адаптивные методы обучения позволяют осуществить градиентный спуск к глобальному минимуму практически при любом «ландшафте» поверхности ошибки за счет эффективного прохождения локальных минимумов и «плоских» участков на поверхности ошибки.

#### **Способы усиления алгоритма обучения и борьбы с переобучением ИНС**

Глубокие нейронные сети с большим количеством свободных параметров являются очень мощными системами машинного обучения. Однако в таких сетях переобучение является серьезной проблемой [12]. Переобучение можно определить по кривой обучения (learning curve), которая описывает частоту появления ошибок в зависимости от количества эпох. Переобучение соответствует точке, в которой ошибка тестирования начинает увеличиваться, в то время как ошибка обучения продолжает уменьшаться. Это означает, что модель запоминает данные из обучающей выборки, но не может предсказать поведение объекта. Таким образом, излишнее обучение со сложной моделью прогнозирования приводит к ухудшению обобщающей способности сети. Существует несколько методов предотвращения переобучения, таких как отключение случайных нейронов скрытых слоев (Dropout) или ранняя остановка (early stopping) [23, 30].

Для контроля обобщающей способности ИНС необходимо производить перекрестную проверку сети (cross-validation) после каждой итерации обучающего цикла. Для этого статистические данные некоторым образом разделяются на обучающую и тестовую выборки. Перцептрон обучается на данных из обучающей выборки, а обобщающая способность оценивается с помощью тестового множества, образцы из которого неизвестны сети в течение цикла обучения.

Эффективность ранней остановки алгоритма обучения (early stopping) определяется тем, что исходное значение весов синаптических связей и порогов активации ИНС имеет случайное распределение по нормальному закону. То есть невозможно заранее определить «ландшафт» поверхности ошибки и количество эпох обучающего цикла, за которые рабочая точка алгоритма обучения достигнет окрестности глобального минимума. Соответственно, возникает необходимость остановить алгоритм обучения сразу после достижения максимума обобщающей способности ИНС. Признаком того, что рабочая точка алгоритма достигла окрестности глобального минимума, является малое изменение абсолютной ошибки в течение эпохи обучения:

$$\frac{1}{C} \sum_{j \in C} \Delta e_j(n) \leq 0.005 - 0.01, \quad (10)$$

где  $\Delta e_j(n)$  – изменение абсолютной ошибки нейрона  $j$  выходного слоя в течение эпохи обучения  $n$ .

Модели прогнозирования электропотребления могут быть классифицированы на две категории: одиночные модели прогнозирования и ансамбли из нескольких моделей [8]. Использование композиционных методов является одним из самых действенных подходов к решению задачи классификации образов. Композиционные методы (или ансамбли) классификации формируют набор различных моделей классификации для достижения лучшей точности, чем у каждой модели в отдельности [31]. Ансамбль представляет собой ассоциативную машину, состоящую из нескольких параллельно работающих ИНС. Отклики каждой нейронной сети, входящей в ансамбль, некоторым образом комбинируются, формируя итоговый отклик ассоциативной машины. Использование ансамблей нейронных сетей при STLF рассмотрено в [8, 32]. Особо важное значение имеет способ получения итогового отклика ассоциативной машины. В настоящее время хорошо зарекомендовали себя ансамбли ИНС одинаковой архитектуры с различной начальной конфигурацией, которые начинают обучение из различных положений на поверхности ошибки. Для получения итогового выходного сигнала используется блок усреднения по ансамблю.

#### **Прогнозирование почасовых объемов электропотребления ГТП второго уровня с помощью многослойного перцептрона**

Прогнозирование потребления электроэнергии является сложной задачей, так как оно зависит от сложного поведения электрической нагрузки зданий (сооружений) и неопределенности влияющих факторов,

что, в свою очередь, приводит к частым колебаниям спроса на электроэнергию. Эти колебания обусловлены архитектурой зданий и тепловыми свойствами используемых материалов, поведением жителей, климатическими условиями и подуровнем системной компоненты, таким как освещение или HVAC (отопление, вентиляция, и кондиционирование) [33]. Прогнозирование почасового электропотребления ГТП гарантирующего поставщика второго уровня с помощью инструментов нейросетевого анализа начинается с подготовки выборки, необходимой для обучения и тестирования обобщающей способности ИНС. Для формирования обучающей выборки используются статистические данные о фактическом потреблении ГТП и величинах всех влияющих факторов с 01.04.2016. Использование более ранних статистических данных ухудшает результаты прогнозирования вследствие того, что 27.03.2016 произошел последний переход на летнее время (существенно изменилась форма суточных графиков потребления электроэнергии). Далее база статистических данных о фактических величинах влияющих факторов кодируется для удобства представления ИНС. Наконец, статистический ряд данных об электрической нагрузке и величине основных влияющих факторов должен быть нормализован к диапазону [0; 1] [34], который соответствует области определения сигмоидальной функции активации. Также для ускорения сходимости алгоритма необходимо сдвинуть границы диапазона нормализации из зоны насыщения логистической функции вблизи границ области определения:

$$x_{\text{норм}} = \frac{x - x_{\text{min}}}{x_{\text{max}} - x_{\text{min}}} \cdot 0,9 + 0,05, \quad (11)$$

где  $x_{\text{норм}}$  – нормализованное значение входных данных;  $x$  – фактическое значение входных данных;  $x_{\text{min}}$ ,  $x_{\text{max}}$  – минимальное и максимальное значения ряда входных данных. В табл. 1 представлен фрагмент нормализованных данных обучающей выборки. Нормализация данных производится на основании выражения (11).

Один обучающий пример (training sample) представляет собой массив  $13 \times 24$  элемента, соответствующий суточным значениям всех влияющих факторов

из табл. 1. Перед подачей на вход ИНС данный массив преобразуется в одномерный вектор-столбец  $1 \times 312$  элементов. Желаемый отклик ИНС представляет собой вектор-столбец размером  $1 \times 24$  элемента, соответствующий суточным значениям электропотребления ГТП (столбец 3, табл. 1).

Массив обучающих данных произвольным образом делится на обучающую и тестовые выборки в соотношении 9:1. Для более точной оценки обобщающей способности ИНС данные тестовой выборки должны изменяться после каждой итерации обучающего цикла.

Практическая реализация прогнозной модели осуществлена с помощью библиотеки глубокого машинного обучения Tensorflow Keras на языке программирования Python 3.6. Построен ансамбль, состоящий из трех четырехслойных перцептронов, обучение которых происходит с помощью алгоритма ADAM. В соответствии с выражениями (4), (5), размер входного слоя каждой ИНС, входящей в ассоциативную машину,  $m_0=312$ , размер первого скрытого слоя  $m_1=139$ , размер второго скрытого слоя  $m_2=58$ , размер выходного слоя  $m_3=24$ . Для получения итогового отклика ассоциативной машины используется блок усреднения по ансамблю.

Обучение ИНС происходит в последовательном режиме, когда свободные параметры ИНС корректируются после подачи каждого примера из обучающей выборки. Максимальное количество эпох обучающего цикла составляет 100. Инструментарий Tensorflow Keras позволяет реализовать функцию ранней остановки алгоритма обучения для борьбы с переобучением ИНС. Критерием остановки является выполнение условия выражения (10) в течение пяти итераций обучающего цикла.

После окончания обучения свободные параметры ИНС «замораживаются». Для получения прогноза электропотребления на следующие сутки необходимо произвести опрос ИНС примером данных, соответствующих суткам, на которые осуществляется прогнозирование. В табл. 2 представлены результаты почасового прогноза электропотребления ГТП «Влассиха» на следующие сутки в период 1–30 июня 2019.

**Таблица 1.** Фрагмент нормализованных данных обучающей выборки

**Table 1.** Detail of normalized training data

Номер дня в году Number of a day in a year	Час суток/Hour	Электропотребление Electro consumption	Ветро-холодовой индекс Wind-chill index	Дисперсия температуры Temperature dispersion	День недели/Day of week	Праздник/Holiday	Каникулы/Vacation	Количество осадков/Rain-fall	Длина светового дня Day length	Наличие центрального отопления Central heating	Наличие горячей воды Hot water	Режим работы крупного потребителя Э/Э Operation schedule of large consumer
Относительные единицы/Rel. units												
0,277	0,05	0,19	0,591	0,104	0,95	0,35	0,95	0,05	0,581	0,95	0,95	0,95
0,277	0,089	0,204	0,581	0,103	0,95	0,35	0,95	0,05	0,581	0,95	0,95	0,95



**Таблица 2.** Результаты почасового прогноза электропотребления группы точек поставки электроэнергии «Власиха» на следующие сутки в период 1–30 июня 2019

**Table 2.** Result of hourly load forecasting for the next day of delivery point cluster «Vlasikha» in period 1–30 June 2019

Месяц, год Month, year	Ошибка метода экспертных оценок Error of Delhi approach, %	Ошибка ансамбля нейронных сетей Error of ensemble neural network, %
Июнь 2019 June 2019	3,07	2,92

### Заключение

В исследовании произведен анализ факторов, влияющих на поведение временного ряда электропотребления. Выяснено, что поведение временного ряда электропотребления группы точек поставки электроэнергии в краткосрочной перспективе в основном определяют временные и метеорологические факторы. Для группы точек поставки электроэнергии гарантирующих поставщиков второго уровня также необхо-

димо учитывать факторы надежности питающей электросети и режим работы крупных потребителей электроэнергии группы точек поставки электроэнергии, а также наличие центрального отопления и горячего (холодного) водоснабжения в населенных пунктах.

На основе исходной статистической информации разработан нейросетевой алгоритм краткосрочного прогнозирования электропотребления групп точек поставки электроэнергии гарантирующего поставщика второго уровня. Для улучшений сходимости алгоритма обучения используются адаптивные в процессе обучения параметры скорости обучения и момента инерции. Программная реализация данного алгоритма выполнена с помощью библиотеки глубокого машинного обучения Tensor flow Keras на языке программирования Python 3.6. Использование данной искусственной нейронной сети позволило снизить, по сравнению с методом экспертных оценок, среднемесячную относительную ошибку прогнозирования на 5,14 %.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бояркин Д.А., Крупнев Д.С., Якубовский Д.В. Использование методов машинного обучения при оценке надежности электроэнергетических систем методом Монте-Карло // Вестник ЮУрГУ. Серия «Математическое моделирование и программирование». – 2018. – Т. 11. – № 4. – С. 146–153.
- Empirical comparison of neural network and auto-regressive models in short-term load forecasting / M. López, C. Sans, S. Valero, C. Senabre // *Energies*. – 2018. – V. 11. – P. 1–19. DOI: 10.3390/en11082080.
- Tureczek A., Nielsen P., Madsen H. Electricity consumption clustering using smart meter data // *Energies*. – 2018. – V. 11. – P. 1–18. DOI: 10.3390/en11040859.
- Zheng H., Yuan J., Chen L. Short-term load forecasting using EMD-LSTM neural networks with a XGBOOST algorithm for feature importance evaluation // *Energies*. – 2017. – V. 10. – P. 1–20. DOI: 10.3390/en10081168.
- Katasev A.S. Neuro-fuzzy model of fuzzy rules formation for objects state evaluation in conditions of uncertainty // *Computer research and modeling*. – 2019. – V. 11. – № 3. – P. 477–492. DOI: 10.20537/2076-7633-2019-11-3-477-492.
- Иванин О.А., Директор Л.Б. Применение искусственных нейронных сетей для прогнозирования энергетических нагрузок обособленных потребителей // Теплоэнергетика. – 2018. – № 5. – С. 17–26. DOI: 10.1134/S0040363618050041.
- Optimal deep learning LSTM model for electric load forecasting using feature selection and genetic algorithm: comparison with machine learning approaches / S. Bouktif, A. Fiaz, A. Ouni, M. Serhani // *Energies*. – 2018. – V. 11. – P. 1–20. DOI: 10.3390/en11071636.
- Wang Z., Srinivasan R. A review of artificial intelligence based building energy use prediction: contrasting the capabilities of single and ensemble prediction models // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2017. – V. 75. – P. 796–808.
- Operational supply and demand optimisation of a multi-vector district energy system using artificial neural networks and a genetic algorithm / J. Reynolds, M.W. Ahmad, Y. Rezgui, J. Hippolyte // *Applied Energy*. – 2019. – V. 235. – P. 699–713.
- Hybridizing chaotic and quantum mechanisms and fruit fly optimization algorithm with least square support vector regression model in electric load forecasting / M.W. Li, J. Geng, W.C. Hong, Y. Zhang // *Energies*. – 2018. – V. 11. – P. 1–22. DOI: 10.3390/en11092226.
- Грачев В.И., Губин С.П. Научно-технологическое прогнозирование // Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии. – 2017. – Т. 9. – № 1. – С. 3–4.
- Scalable clustering of individual electrical curves for profiling and bottom-up forecasting / B. Auder, J. Cugliari, Y. Goude, J. Poggi // *Energies*. – 2018. – V. 11. – P. 1–22. DOI: 10.3390/en11071893.
- Rajan D.V., Sourav M., Thakur S.S. An efficient approach for short-term load forecasting using historical data // *International Journal of Engineering Research & Technology*. – 2012. – V. 3. – P. 1–9.
- Ruzic S., Vuckovic A., Nikolic N. Weather sensitive method for short term load forecasting in electric power Utility of Serbia // *IEEE Transactions on Power Systems*. – 2003. – V. 18. – № 4. – P. 1581–1586.
- Quayle R.G., Steadman R.G. The Steadman wind chill: an improvement over present scales // *Amer. Meteorological Soc.* – 1998. – V. 13. – P. 1187–1193.
- Карамов Д.Н., Наумов И.В., Пержабинский С.М. Математическое моделирование отказов элементов электрической сети (10 кв) автономных энергетических систем с возобновляемой распределенной генерацией // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 7. – С. 116–130.
- Третьяк А.Я., Кузнецова А.В., Борисов К.А. Определение поломок резцов РСД с помощью регрессионного и нейросетевого моделирования // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 5. – С. 169–177.
- A review of data-driven approaches for prediction and classification of building energy consumption / Y. Weia, X. Zhangb, Y. Shia, et al. // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2018. – V. 82. – P. 1027–1047.
- Hayes A. First links in the Markov chain // *American Scientist*. – 2013. – V. 101. – P. 92–97.
- Prokoptsev N.G., Alekseenko A.E., Kholodov Ya.A. Traffic flow speed prediction on transportation graph with convolutional neural networks // *Computer research and modeling*. – 2018. – V. 10. – № 3. – P. 359–367. DOI: 10.20537/2076-7633-2018-10-3-359-367.
- Timofeeva G.A. Forecasting the return of the loan portfolio on the basis of Markov model // *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mathematical Modelling, Programming & Computer Software (Bulletin SUSU MMCS)*. – 2017. – V. 10. – № 3. – P. 54–66. DOI: 10.14529/mmp170305.
- Августинович В.Г., Кузнецова Т.А., Нугуманов А.Д. Разработка нейронных систем мониторинга и управления эмиссией вредных веществ для газотурбинных газоперекачивающих агрегатов и электростанций // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 8. – С. 7–17. DOI: 10.18799/24131830/2019/8/2207.

23. Воевода А.А., Романников Д.О. Синтез нейронной сети для реализации рекуррентного метода наименьших квадратов // Научный вестник НГТУ. – 2018. – № 3 (72). – С. 33–42. DOI: 10.17212/1814-1196-2018-3-33-42.
24. Genco S., Yildiray P., Umrans S. An artificial neural network model for Na/K geothermometer // Proceedings World Geothermal Congress. – Bali, 2010. – P. 1–10.
25. Ryu S., Noh J., Kim H. Deep neural network based demand side short term load forecasting // Energies. – 2017. – V. 10. – № 3. – P. 1–20. DOI: 10.3390/en10010003
26. Использование нейро-нечетких диагностических моделей при оценке технического состояния электрооборудования тепловоза / А.В. Агунов, А.В. Грищенко, В.А. Крючек, В.В. Грачев // Электротехника. – 2017. – № 10. – С. 14–17.
27. Alkousa M.S. On some stochastic mirror descent methods for constrained online optimization problems // Computer research and modeling. – 2019. – V. 11. – № 2. – P. 205–217. DOI: 10.20537/2076-7633-2019-11-2-205-217
28. Kingma D.P., Lei Ba J. ADAM: a method for stochastic optimization // ArXiv.org. 2015. URL: <https://arxiv.org/abs/1412.6980> (дата обращения 12.12.2019).
29. Rahmana A., Srikumarb V., Smith A. Predicting electricity consumption for commercial and residential buildings using deep recurrent neural networks // Applied Energy. – 2018. – V. 212. – P. 372–385.
30. Dropout: a simple way to prevent neural networks from overfitting / N. Srivastava, G. Hinton, A. Krizhevsky, I. Sutskever, R. Salakhutdinov // Journal of Machine Learning Research. – 2014. – V. 15. – P. 1929–1958.
31. Жуков А.В., Сидоров Д.Н. Модификация алгоритма случайного леса для классификации нестационарных потоковых данных // Вестник ЮУрГУ. Серия «Математическое моделирование и программирование». – 2016. – Т. 9. – № 4. – С. 86–95. DOI: 10.14529/mmp160408.
32. Li S., Wang P., Goel L. A novel wavelet-based ensemble method for short-term load forecasting with hybrid neural networks and feature selection // IEEE Transactions on Power Systems. – 2016. – V. 31. – № 3. – P. 1788–1798.
33. Deep learning for estimating building energy consumption / E. Mocanu, P.H. Nguyen, M. Gibescu, W.L. Kling // Sustainable Energy, Grids and Networks. – 2016. – V. 6. – P. 91–99.
34. A hybrid forecasting model with parameter optimization for short-term load forecasting of micro-grids / N. Liu, Q. Tang, J. Zhang, W. Fan, J. Liu // Applied Energy. – 2014. – V. 129. – P. 336–345.

Поступила 03.06.2020 г.

#### Информация об авторах

**Хомутов С.О.**, доктор технических наук, профессор кафедры электроснабжения промышленных предприятий Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

**Сташко В.И.**, кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

**Серебряков Н.А.**, ассистент кафедры электроснабжения промышленных предприятий Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

UDC 621.316.72

## IMPROVING THE ACCURACY OF SHORT-TERM LOAD FORECASTING OF DELIVERY POINT CLUSTER OF THE SECOND LEVEL DEFAULT PROVIDER

Stanislav O. Khomutov<sup>1</sup>,  
homutov.so@yandex.ru

Vasilij I. Stashko<sup>1</sup>,  
stashko@list.ru

Nikolay A. Serebryakov<sup>1</sup>,  
na\_serebryakov@altke.ru

<sup>1</sup> Polzunov Altai State Technical University,  
46, Lenin avenue, Barnaul, 656038, Russia.

**Relevance** of the discussed issue is caused by the need to improve the accuracy of short-term load forecasting of delivery point cluster of the second level default provider. The system operator uses the result of forecast when forming power system dispatch load curve. Usually, prediction errors lead to increase of primary energy resources consumption for electric-power production, due to unjustified run and shutdown of generating equipment, as well as increasing of circuit losses, due to the choice of non-optimal scheme of electric grid. As the electricity consumption depends on many factors, the task of short-term load forecasting is poorly formalized. Under these conditions, traditional methods of mathematical statistics and simulation do not allow building the adequate forecast models. Until recently, the only fine method of load forecasting was the Delhi approach. Currently, tools of neural networks and deep machine learning are widely used for short-term load forecasting of the energy system of a region of the country or delivery point cluster of first level default provider. However, the developed models are not suitable for predicting hourly electricity consumption of delivery point cluster of the second level default provider. Short-term load forecasting of this object is complicated of reliability of electric grid 6–110 kV, the operating mode of electricity consumers with a capacity of 670–10000 kW, the presence of district heating and water supply, beside standard time and meteorological factors. For this forecasting object, the question of choosing the optimal architecture and configuration of the neural network model, as well as the learning algorithm, which can achieve the desired forecasting accuracy, remain open.

**The main aim** of the research is to improve the accuracy of short-term load forecasting of delivery point cluster of the second level default provider with the help of tools of neural networks and deep machine learning.

**The methods:** the methods of correlation and factor analysis, the theory of artificial neural networks and machine learning. Software implementation of theoretical calculations was performed with help of deep machine learning library Tensor flow Keras in the Python 3.6 programming language.

**Results.** The authors have developed the neural network algorithm for short-term load forecasting of delivery point cluster of the second level default provider with adaptive learning and momentum rate and completed the software implementation of this algorithm in deep machine learning library Tensor flow Keras. The use of this artificial neural network let to decrease in monthly average relative forecast error by 5,14 %.

### Key words:

Short-term load forecasting, artificial neural networks, learning algorithm, wholesale electricity market, delivery point cluster, gradient descent.

### REFERENCES

1. Boyarkin D.A., Krupenev D.S., Iakubovskii D.V. Machine learning in electric power systems adequacy assessment using Monte Carlo method. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mathematical Modelling, Programming & Computer Software (Bulletin SUSU MMCS)*, 2018, vol. 11, no. 4, pp. 146–153. In Rus.
2. López M., Sans C., Valero S., Senabre C. Empirical comparison of neural network and auto-regressive models in short-term load forecasting. *Energies*, 2018, vol. 11, pp. 1–19. DOI: 10.3390/en11082080.
3. Tureczek A., Nielsen P., Madsen H. Electricity consumption clustering using smart meter data. *Energies*, 2018, vol. 11, pp. 1–18. DOI: 10.3390/en11040859.
4. Zheng H., Yuan J., Chen L. Short-term load forecasting using EMD-LSTM neural networks with a XGBOOST algorithm for feature importance evaluation. *Energies*, 2017, vol. 10, pp. 1–20. DOI: 10.3390/en10081168.
5. Katasev A.S. Neuro-fuzzy model of fuzzy rules formation for objects state evaluation in conditions of uncertainty. *Computer research and modeling*, 2019, vol. 11, no. 3 pp. 477–492. DOI: 10.20537/2076-7633-2019-11-3-477-492.
6. Ivanin O. A., Direktor L. B. Application of artificial neural networks to predict energy loads of isolated consumers. *Thermal Engineering*, 2018, no. 5, pp. 17–26. DOI: 10.1134/S0040363618050041. In Rus.
7. Bouktif S., Fiaz A., Ouni A., Serhani M. Optimal deep learning LSTM model for electric load forecasting using feature selection and genetic algorithm: comparison with machine learning approaches. *Energies*, 2018, vol. 11, pp. 1–20. DOI: 10.3390/en11071636.
8. Wang Z., Srinivasan R. A review of artificial intelligence based building energy use prediction: Contrasting the capabilities of single and ensemble prediction models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, vol. 75, pp. 796–808.
9. Reynolds J., Ahmad M.W., Rezgui Y., Hippolyte J. Operational supply and demand optimisation of a multi-vector district energy system using artificial neural networks and a genetic algorithm. *Applied Energy*, 2019, vol. 235, pp. 699–713.
10. Li M.W., Geng J., Hong W.C., Zhang Y. Hybridizing chaotic and quantum mechanisms and fruit fly optimization algorithm with least square support vector regression model in electric load forecasting. *Energies*, 2018, vol. 11, vol. 2226, pp. 1–22. DOI: 10.3390/en11092226.
11. Grachev V.I., Gubin P.S. Scientific-technological forecasting. *Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*, 2017, vol. 9, no. 1, pp. 3–4. In Rus. DOI: 10.17725/rensit.2017.09.003.

12. Auder B., Cugliari J., Goude Y., Poggi J. Scalable clustering of individual electrical curves for profiling and bottom-up forecasting. *Energies*, 2018, vol. 11, pp. 1–22. DOI: 10.3390/en11071893.
13. Rajan D.V., Sourav M., Thakur S.S. An efficient approach for short-term load forecasting using historical data. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 2012, vol. 3, pp. 1–9.
14. Ruzic S., Vuckovic A., Nikolic N. Weather sensitive method for short term load forecasting in electric power Utility of Serbia. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2003, vol. 18, no. 4, pp. 1581–1586.
15. Quayle R.G., Steadman R.G. The Steadman wind chill: an improvement over present scales. *Amer. Meteorological Soc.*, 1998, vol. 13, pp. 1187–1193.
16. Karamov D.N., Naumov I.V., Perzhabinsky S.M. Mathematical modelling of failures of electrical grid (10 kV) of autonomous energy systems with renewable distributed generation. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 7, pp. 116–130. In Rus.
17. Tretyak A.Y., Kuznetsova A.V., Borisov K.A. Determination of PDC cutter breakdowns using regression and neural network modeling. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 5, pp. 169–177. In Rus.
18. Wei Y., Zhang X., Shia Y. A review of data-driven approaches for prediction and classification of building energy consumption. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, vol. 82, pp. 1027–1047.
19. Hayes A. First links in the Markov chain. *American Scientist*, 2013, vol. 101, pp. 92–97.
20. Prokoptsev N.G., Alekseenko A.E., Kholodov Ya.A. Traffic flow speed prediction on transportation graph with convolutional neural networks. *Computer research and modeling*, 2018, vol. 10, no. 3, pp. 359–367. DOI: 10.20537/2076-7633-2018-10-3-359-367.
21. Timofeeva G.A. Forecasting the return of the loan portfolio on the basis of Markov model. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mathematical Modelling, Programming & Computer Software (Bulletin SUSU MMCS)*, 2017, vol. 10, no. 3, pp. 54–66. DOI: 10.14529/mmp170305.
22. Avgustinovich V.G., Kuznetsova T.A., Nugumanov A.D. Development of neural systems for monitoring and controlling emission of gas-transmission and power gas turbine units. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 8, pp. 7–17. DOI: 10.18799/24131830/2019/8/2207. In Rus.
23. Voevoda A.A., Romannikov D.O. Synthesis of a neural network for the implementation of the recursive leastsquares method. *Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2018, no. 3 (72), pp. 33–42. In Rus. DOI: 10.17212/1814-1196-2018-3-33-42.
24. Genco S., Yildiray P., Umrans S. An artificial neural network model for Na/K geothermometer. *Proceedings World Geothermal Congress*. Bali, 2010. pp. 1–10.
25. Ryu S., Noh J., Kim H. Deep neural network based demand side short term load forecasting. *Energies*, 2017, vol. 10, no. 3, pp. 1–20. DOI: 10.3390/en10010003.
26. Agunov A.V., Grishchenko A.V., Kruchek V.A., Grachev V.V. A method of using neural fuzzy models to determine the technical state of a diesel locomotive's electrical equipment. *Russian Electrical Engineering*, 2017, vol. 88, no. 10, pp. 634–638. In Rus.
27. Alkousa M.S. On some stochastic mirror descent methods for constrained online optimization problems. *Computer research and modeling*, 2019, vol. 11, no. 2, pp. 205–217. DOI: 10.20537/2076-7633-2019-11-2-205-217.
28. Kingma D.P., Lei Ba J. ADAM: a method for stochastic optimization. *ArXiv.org*, 2015. Available at: <https://arxiv.org/abs/1412.6980> (accessed 12 December 2019).
29. Rahmana A., Srikumar V., Smith A. Predicting electricity consumption for commercial and residential buildings using deep recurrent neural networks. *Applied Energy*, 2018, vol. 212, pp. 372–385.
30. Srivastava N., Hinton G., Krizhevsky A., Sutskever I., Salakhutdinov R. Dropout: a simple way to prevent neural networks from overfitting. *Journal of Machine Learning Research*, 2014, vol. 15, pp. 1929–1958.
31. Zhukov A.V., Sidorov D.N. Modification of random forest based approach for streaming data with concept drift. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mathematical Modelling, Programming & Computer Software (Bulletin SUSU MMCS)*, 2016, vol. 9, no. 4, pp. 86–95. DOI: 10.14529/mmp160408. In Rus.
32. Li S., Wang P., Goel L. A novel wavelet-based ensemble method for short-term load forecasting with hybrid neural networks and feature selection. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2016, vol. 31, no. 3, pp. 1788–1798.
33. Mocanu E., Nguyen P.H., Gibescu M., Kling W.L. Deep learning for estimating building energy consumption. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 2016, vol. 6, pp. 91–99.
34. Liu N., Tang Q., Zhang J., Fan W., Liu J. A hybrid forecasting model with parameter optimization for short-term load forecasting of micro-grids. *Applied Energy*, 2014, vol. 129, pp. 336–345.

Received: 3 June 2020.

#### Information about the authors

**Stanislav O. Khomutov**, Dr. Sc., professor, Polzunov Altai State Technical University.

**Vasilii I. Stashko**, Cand. Sc., associate professor, Polzunov Altai State Technical University.

**Nikolay A. Serebryakov**, assistant, Polzunov Altai State Technical University.

УДК 621.314.58, 622.23.05

## ВЛИЯНИЕ ВЫСШИХ ГАРМОНИК НА РАБОТУ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ В УСЛОВИЯХ ПОДЗЕМНОГО РУДНИКА

**Егоров Айаал Николаевич<sup>1</sup>**,  
egorovan@alrosa.ru

**Харитонов Яков Станиславович<sup>1</sup>**,  
kharitonovyas@alrosa.ru

**Шевчук Владислав Алексеевич<sup>2</sup>**,  
shevchukvlal@yandex.ru

**Семёнов Александр Сергеевич<sup>3</sup>**,  
as.semenov@s-vfu.ru

<sup>1</sup> СТ «Алмазавтоматика» АК «АЛРОСА» (ПАО),  
Россия, 678170, Республика Саха (Якутия), г. Мирный, ул. Ленина, 6.

<sup>2</sup> АО «Научно-производственный центр «Полюс»,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Кирова, 56, корп. В.

<sup>3</sup> Политехнический институт (филиал) Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова,  
Россия, 678170, Республика Саха (Якутия), г. Мирный, ул. Тихонова, 5, корп. 1.

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью выявления причин выхода из строя узлов и деталей преобразователя частоты, а также конденсатора фильтрокомпенсирующего устройства в системе электропривода скиповой подъемной установки. Выход из строя этого узла при отработке алгоритма защиты приводит к наложению предохранительного тормоза на подъемную машину, обладающую достаточно большой кинетической энергией, которая в свою очередь, рассеиваясь в узлах и деталях подъемной машины, приводит к сокращению их срока службы.

**Цель:** определить степень влияния высших гармоник в системе электроснабжения подземного рудника на элементы преобразователя частоты системы электропривода скиповой подъемной установки и предложить методы по их снижению.

**Объекты:** преобразователь частоты, система электропривода подъемной установки, система электроснабжения подземного рудника, другие технологические установки и их системы электропривода, влияющие на генерацию высших гармоник.

**Методы:** инструментальный контроль показателей качества электрической энергии в соответствии с требованиями ГОСТ 32144-2013; математическая обработка и анализ полученных результатов при помощи программного обеспечения MathCAD; компьютерное моделирование режимов работы системы электропривода в среде MatLab.

**Результаты.** Дана характеристика скиповой подъемной машины слепого скипового ствола и её системы электропривода. Проанализированы результаты обследования системы электропривода, полученные как до, так и после ввода установки в промышленную эксплуатацию. Исследованы причины выхода из строя фильтрокомпенсирующего устройства, а также проанализированы причины отказов в работе преобразователя частоты. Сделаны выводы о влиянии высших гармоник на работу преобразователя частоты в условиях подземного рудника. Предложены меры защиты электроустановок от высших гармоник и методы по их снижению.

### **Ключевые слова:**

Высшие гармоники, преобразователь частоты, система электропривода, система электроснабжения, скиповая подъемная установка, подземный рудник.

### **Введение**

Бурное развитие промышленной электроники, измерительной техники и информационных технологий обуславливает совершенствование технических средств автоматизации технологических процессов промышленных предприятий [1]. Совершенствование автоматических систем управления технологическими процессами (АСУТП) направлено на улучшение режимов работы технологических установок и процессов с точки зрения обеспечения требуемой производительности и качества при минимизации эксплуатационных затрат, включая максимальное снижение энергоемкости [2, 3].

Снижение энергоемкости технологических процессов достигается за счет регулирования процессов преобразования энергии, затрачиваемой на соверше-

ние конечной полезной работы [4, 5]. На данный момент на мощных технологических установках горнодобывающих предприятий (ГП) для повышения энергоэффективности и обеспечения оптимальных режимов работы установки наиболее широкое применение находит частотно-регулируемый электропривод (ЧРП) [6, 7].

Для регулирования координат электропривода применяются преобразователи частоты (ПЧ), которые являются нелинейными устройствами, так как преобразование параметров электрической энергии в них происходит за счет коммутации полупроводниковых вентилях [8–10].

Доля нелинейных нагрузок в электрических сетях ГП неуклонно растет ввиду непрерывного увеличения номинальной мощности ПЧ. Так, на сегодняшний

день мощность отдельных подъемных машин с ЧРП достигает 2 МВт, а номинальная мощность главной вентиляторной установки – 4 МВт при суммарной установленной мощности электроприёмников рудника порядка 30 МВт. При этом мощные единичные нелинейные нагрузки вносят значительный вклад в искажение кривых напряжения и тока системы электроснабжения (СЭС) предприятия.

Разумеется, производители ПЧ проводят работу по исследованию и совершенствованию схемотехнических решений, направленных на снижение уровней высших гармонических составляющих. Тем не менее, как показывает практика, в электрических сетях с вентильными преобразователями наблюдаются высшие гармоники напряжения и тока. При этом уровень этих гармоник и их состав зависит от вида преобразователя, от топологии силовой части, от схемотехнических решений, от параметров системы управления вентилями и др. [11].

### Объект исследования

Скиповая подъемная машина слепого скипового ствола внедрена в промышленную эксплуатацию в 2017 г. Подъемная машина представляет собой однобарабанную машину компактной конструкции, которая предназначена для подземного размещения (исполнение РН, степень защиты оболочки IP 54) и используется в качестве скиповой подъемной установки. Приведение в движение установки обеспечивается одним приводным электродвигателем через редуктор. В качестве тормоза предусмотрен электрогидравлический дисковый тормозной механизм, который обеспечивает надежный останов подъемной машины. На одноконцевых подъемных машинах применяется рекуперативное торможение для обеспечения возврата энергии в сеть при спуске сосуда подъемной установки. Внешний вид такой подъемной машины показан на рис. 1.



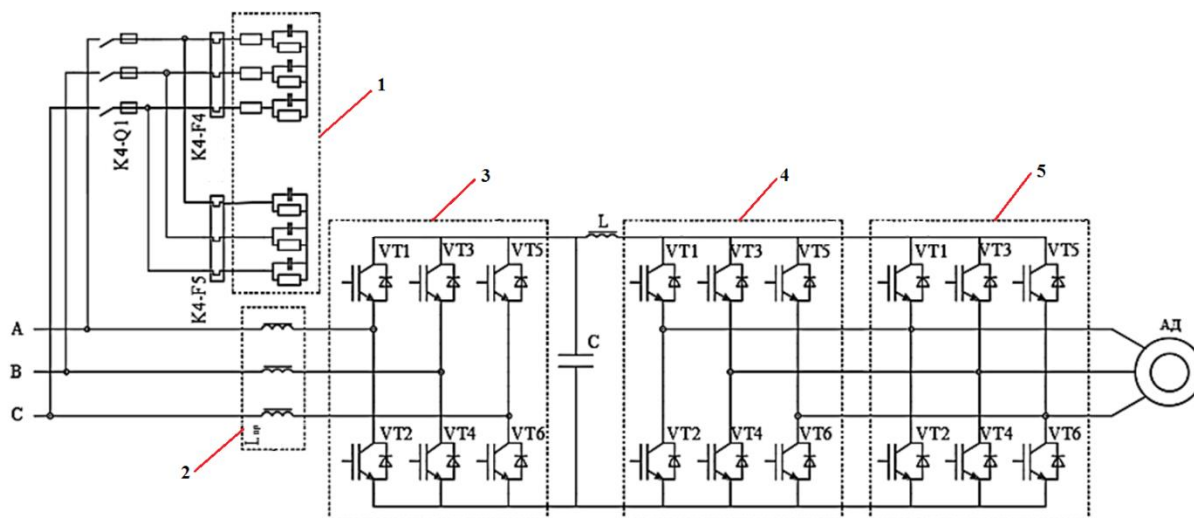
Рис. 1. Внешний вид скиповой подъемной машины подземного рудника

Fig. 1. Appearance of an underground mine skip hoist

Для регулирования скорости движения скипа подъемной машины применяется ЧРП на базе ПЧ ProCrane X2 MPR 690V PESCe производства фирмы General Electric. В качестве коммутирующих ключей в данном преобразователе, как и во всех других современных низковольтных преобразователях, применены биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT – insulated gate bipolar transistor) [12, 13]. Повсеместное применение IGBT обосновано их полной управляемостью (закрытие транзистора не требует дополнительных узлов искусственной коммутации) и значительным преимуществом по максимальной частоте коммутаций, что в купе с применением широтно-импульсной модуляции (ШИМ) позволяет получить на выходе преобразователя напряжение близкое по форме к синусоиде [14].

На рис. 2 представлена упрощенная принципиальная электрическая схема силовой части преобразователя частоты. Силовая часть преобразователя состоит из выпрямителя – 3 и двух соединенных параллельно (для увеличения мощности) автономных инверторов напряжения – 4 и 5. Также во входную цепь преобразователя подключен дроссель – 2 и фильтрокомпенсирующее устройство (ФКУ) – 1.

Для обеспечения обратного потока энергии в режимах рекуперации и выпрямитель, и инвертор преобразователя частоты выполнены на управляемых вентилях – IGBT. Последнее позволяет при обратном потоке энергии (от подъемной машины к двигателю) перевести инвертор в режим выпрямителя, а выпрямитель – в режим инвертора и тем самым обеспечить передачу выработанной подъемной машиной энергии в сеть [15, 16].



**Рис 2.** Упрощенная принципиальная электрическая схема силовой части преобразователя частоты: 1 – фильтро-компенсирующее устройство; 2 – дроссель; 3 – выпрямитель; 4 и 5 – автономные инверторы напряжения

**Fig. 2.** Simplified circuit diagram of the power section of the frequency converter: 1 – filter-compensating device; 2 – throttle; 3 – rectifier; 4 and 5 – autonomous voltage inverters

#### Постановка цели и задач исследования

С начала промышленной эксплуатации скиповой подъемной установки слепого скипового ствола подземного рудника были зафиксированы неоднократные выходы из строя узлов и деталей ПЧ. Из актов ремонтно-восстановительных работ следует, что первый выход из строя был зафиксирован до промышленной эксплуатации подъемной машины во время эксплуатации специализированным шахтно-строительным трестом.

29 августа 2018 г. зафиксирован первый выход из строя конденсатора ФКУ. Затем после передачи шахтной подъемной машины в промышленную эксплуатацию выход из строя данного конденсатора участился и повторялся неоднократно.

Кроме того, в ходе промышленной эксплуатации неоднократно фиксировался отказ в работе самого ПЧ. При этом система контроля и управления шахтной подъемной установкой работает в соответствии с алгоритмом, заложенным в программном обеспечении. Конечным итогом отработки алгоритма защиты является наложение предохранительного тормоза. Наложение предохранительного тормоза является аварийным режимом работы шахтной подъемной установки и часто происходит в моменты, когда установка обладает достаточно большой кинетической энергией. Торможение подъемной машины в этом случае требует рассеивания запасенной энергии на тормозных элементах и в узлах и деталях подъемной машины, что в свою очередь приводит к сокращению их срока службы.

В ходе изучения проектной и технической документации, а также соответствующей научно-практической литературы по расчету ФКУ авторами было сформулировано предположение о том, что причиной выхода из строя конденсаторов ФКУ является чрезмерное отклонение от ГОСТ 32144-2013 суммарного коэффициента гармонических составля-

ющих напряжения и коэффициентов отдельных гармонических составляющих кривой напряжения.

Также специалистами рудника было выдвинуто предположение о том, что установленная мощность системы электропривода недостаточна для обеспечения проектной мощности шахтной подъемной машины при углублении ствола до проектной отметки –955 м.

Исходя из вышеизложенного, целью настоящего исследования является определение степени влияния высших гармоник в СЭС подземного рудника на элементы ПЧ скиповой подъемной установки и формулирование предложений по их снижению. Достижение поставленной цели потребует решения следующих задач: проведение инструментального контроля показателей качества электрической энергии; разработка алгоритма математической обработки и анализа полученных результатов; компьютерное моделирование режимов работы системы электропривода.

#### О методике инструментального контроля

Методика исследования заключается в инструментальном контроле показателей качества электроэнергии (ПКЭ) в соответствии с ГОСТ 32144-2013 [17] в течение 7 суток с 10 минутным интервалом. Исследованию и анализу подлежит суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения и коэффициенты отдельных гармонических составляющих кривой напряжения. Контроль выполнялся с помощью анализатора качества электрической энергии типа С.А 8335 (Qualistar+). Величины допустимых отклонений вышеуказанных параметров приведены в табл. 1.

Анализатор С.А 8335 (Qualistar+) производится фирмой Chauvin Arnoux (Франция) и работает в соответствии со стандартом IEC 61010, класс S. Анализатор утвержден в качестве средства измерения в реестре федерального агентства по техническому регулированию и метрологии РФ за номером 62232-15 до

16.11.2020. К анализаторам ПКЭ применяются требования в погрешностях к точности измерений. Для исследуемых ПКЭ эти величины равны: суммарный коэффициент гармонических составляющих напря-

жения  $\pm 0,05$  % (абс.),  $\pm 5,0$  % (отн.); коэффициенты нечетных гармонических составляющих напряжения, не кратные трем  $\pm 0,15$  % (абс.),  $\pm 5,0$  % (отн.). Анализатор полностью соответствует этим параметрам.

**Таблица 1.** Максимально допустимые отклонения исследуемых показателей качества электроэнергии

**Table 1.** Maximum allowable deviations of the studied indicators of the quality of electricity

Показатель Indicator	Напряжение электрической сети, кВ Electric network voltage, kV				
	0,38		6–25		
	Максимально допустимое отклонение в течение времени измерений с усреднением в интервале 10 мин Maximum permissible deviation during the measurement time with averaging in the interval of 10 min				
	95 %	100 %	95 %	100 %	
Значение суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения, $K_U$ , % Value of the total coefficient of harmonic voltage components, $K_U$ , %	8,0	12,0	5,0	8,0	
Значения коэффициентов нечетных гармонических составляющих напряжения, не кратных трем, $K_{U(n)}$ , % Values of the coefficients of the odd harmonic components of the voltage, not a multiple of three, $K_{U(n)}$ , %					
гармоническая составляющая harmonic component	5	6,0	9,0	4,0	6,0
	7	5,0	7,5	3,0	4,5
	11	3,5	5,25	2,0	3,0
	13	3,0	4,5	2,0	3,0
	17	2,0	3,0	1,5	2,25
	19	1,5	2,25	1,0	1,5
	23	1,5	2,25	1,0	1,5
	25	1,5	2,25	1,0	1,5
>25	1,5	2,25	1,0	1,5	

### Результаты исследования

В ходе исследования авторы решили в первую очередь подтвердить или опровергнуть предположение персонала рудника о том, что система электропривода подобрана некорректно и работает в режиме перегрузок и преобразователь частоты выходит из строя по защите от перегруза. Для этого в табл. 2 представлены технические характеристики оборудования скиповой подъемной установки.

Из табл. 2 видно, что продолжительный ток перегрузки, выдерживаемый обмотками двигателя в течение 30 секунд, составляет 850 А, а преобразователя частоты – 820 А. С целью определения фактически потребляемой мощности и значений токов на входе силового канала системы электропривода, а также выявления причины отказов в работе преобразователя проводились измерения параметров потребляемой электрической энергии при интенсивной работе подъемной машины.

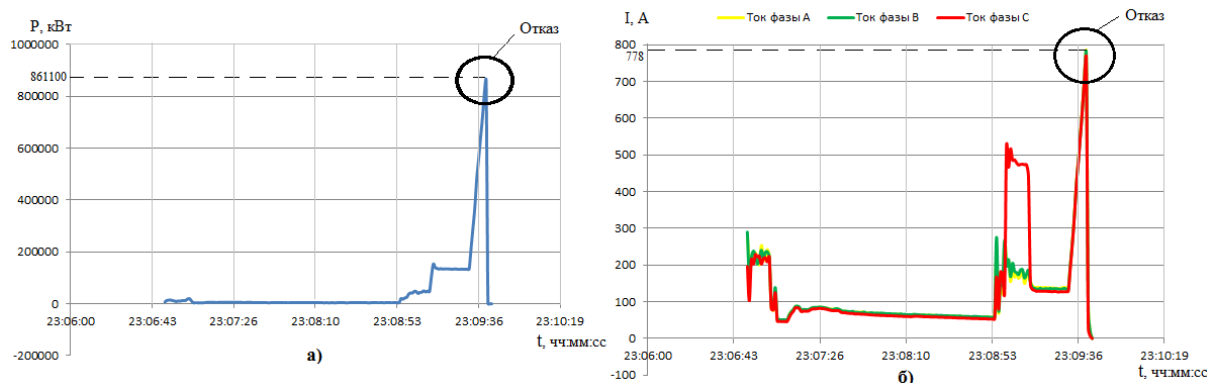
За смену (29.01.2019 г.) произошло семь отказов в работе шахтной подъемной машины, из них две ошибки по комплексу загрузки скипа и пять по преобразователю частоты. Максимальное пиковое значение потребляемой системой электропривода активной мощности за время измерений составило 861100 Вт. Как раз в этот момент пришелся один из отказов в работе шахтной подъемной машины. На рис. 3 приведены графики изменения потребляемой активной мощности (а) и фазных токов (б). На графиках показаны максимальные значения измеренных параметров на интервале наблюдения. Из графиков видно, что максимальные значения токов не превышают значения токов перегрузки преобразователя частоты и электродвигателя, указанные в табл. 2.

**Таблица 2.** Технические характеристики оборудования скиповой подъемной установки

**Table 2.** Skip hoist equipment technical specifications

Наименование параметра Parameter name	Значение параметра Parameter value
Основные параметры скиповой подъемной машины Basic parameters of a skip hoist	
Тип скипа/Skip type	СН4
Масса скипа, кг/Weight of skip, kg	5400
Грузоподъемность, кг/Load capacity, kg	6000
Масса погонного метра каната, кг Mass running meter of rope, kg	4,7
Скорость подъема, м/с/Lifting speed, m/s	5
Основные параметры электродвигателя Basic parameters of the electric motor	
Тип двигателя/Engine type	DSf 500 M 154-6
Номинальная мощность двигателя, кВт Engine rated power, kW	677
Линейное напряжение, В/Line voltage, V	690
Номинальный ток, А/Rated current, A	675
Ток перегрузки, А/Overload current, A	850
Номинальная частота вращения ротора, об/мин Nominal rotor speed, rpm	747
Коэффициент мощности/Power factor	0,87
Коэффициент полезного действия, % Engine efficiency, %	97,5
Основные параметры преобразователя частоты Basic parameters of the frequency converter	
Тип преобразователя Type of frequency converter	ProCrane X2 MPR 690 PECe
Номинальное входное линейное напряжение, В Rated input line voltage, V	690
Входная частота, Гц/Input frequency, Hz	47–63
Продолжительный ток перегрузки (30 с), А Continuous overload current (30 s), A	820
Максимальный ток (10 с), А Maximum current (10 s), A	1140
Выходная частота, Гц/Output frequency, Hz	0–300





**Рис. 3.** График изменения величины в момент возникновения отказа в работе шахтной подъемной машины: а) потребляемой активной мощности; б) фазных токов

**Fig. 3.** Graph of the value change at failure moment of the mine hoist of: a) consumed active power; b) phase currents

Таким образом, было сделано заключение, что режим критических перегрузок в работе ПЧ отсутствует и, следовательно, система электропривода выбрана корректно.

В то же время при наблюдении за работой ПЧ при интенсивной работе шахтной подъемной машины установлено, что отказ преобразователя происходит по ошибке «DC Link overvoltage», которая в журнале ошибок и предупреждений преобразователя отмечена жирным шрифтом как первичная. При этом контроль соответствующих переменных в подсистемах управления выпрямителем и инверторами показывает, что напряжение звена постоянного тока, действительно, превышает значение установленного предела 1175 В. Превышение происходит в конце разгона шахтной подъемной машины, как при подъеме, так и при её опускании. При этом увеличение напряжения звена постоянного тока в указанной точке происходит не всегда. Причинами превышения установленного предела напряжения могут быть: влияние некорректно подобранного входного ФКУ; изменение характеристик конденсаторов (внутреннее сопротивление, емкость) звена постоянного тока под действием нагрузки или температуры; изменение характеристик электродвигателя при увеличении температуры его обмоток; возможное изменение соотношения «напряжение со стороны питающей сети – ЭДС электродвигателя». Инженерами завода-изготовителя ПЧ производилась перенастройка параметров регулятора скорости с целью обеспечения плавного перехода из кривой разгона на заданную скорость. Эти мероприятия не дали результата.

Перейдем к обсуждению основной проблемы – выход из строя конденсаторов ФКУ.

С целью определения причин выхода из строя конденсаторов ФКУ проводились исследования ПКЭ СЭС рудника. В ходе этих исследований в качестве основной причины выхода из строя конденсаторов авторами было предположено значительное снижение срока службы конденсаторов под влиянием высших гармонических составляющих в питающей сети.

При расчете параметров ФКУ для ПЧ было принято условие соответствия качества электрической энергии требованиям ГОСТ 32144-2013. Последнее

обуславливает расчет параметров фильтра из условия минимизации влияний на качество электроэнергии питающей сети преобразователя, для которого ведется расчет фильтра. В данном конкретном случае завод-изготовителем были приняты трехфазные конденсаторы типа МКР (с металлизированной полипропиленовой пленкой), хорошо зарекомендовавшие себя в работе на околопромышленных частотах.

Дополнительная мощность гармонических составляющих, генерируемых другими нелинейными потребителями рудника, приводит к чрезмерному нагреву конденсаторов фильтрокомпенсирующего устройства, что обуславливает постепенную деградацию диэлектрика и в конечном счете выход из строя конденсатора. Сопротивление конденсаторов для высших гармоник высокой частоты несоизмеримо мало по сравнению с сопротивлением других потребителей системы электроснабжения, рассчитанных на промышленную частоту. Так, например, для семнадцатой и девятнадцатой гармоники сопротивления конденсатора рассчитываются следующим образом:

$$X_{c17} = \frac{1}{2\pi 17 f C} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 17 \cdot 50 \cdot 166 \cdot 10^{-6}} = 1,13 \text{ Ом},$$

$$X_{c19} = \frac{1}{2\pi 19 f C} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 19 \cdot 50 \cdot 166 \cdot 10^{-6}} = 1,01 \text{ Ом},$$

где  $f=50$  Гц – частота питающей сети;  $C=166$  мкФ – емкость конденсатора ФКУ.

Высшие гармоники в сетях электроснабжения рудника могут генерироваться преобразователями подъемных машин и вентиляторов главного проветривания. В нашем случае система электропривода вентиляторов главного проветривания рудника представлена асинхронным двигателем и преобразователем частоты Power Flex 7000 с 18-пульсным выпрямителем, а подъемные машины приводятся в движение двигателем постоянного тока с тиристорным выпрямителем фирмы АВВ типа DCS600, в котором применена 6-пульсная схема выпрямления. При этом на руднике предусмотрено распределение нелинейных нагрузок. Так, например, при работе вентилятора главного проветривания № 1 подъемные машины скипового ствола переводятся на питание от второй

секции шин, так как вентилятор главного проветривания № 1 запитан от первой секции. При переходе с вентилятора № 1 на вентилятор № 2 подъемные машины скипового ствола переводятся на питание от первой секции шин.

Подъемная машина слепого скипового ствола установлена в подземном комплексе рудника, и её электроснабжение осуществляется от первого ввода. Учитывая, что на руднике раз в месяц проводится переход с вентилятора № 1 на вентилятор № 2 и наоборот, состав и уровень высших гармоник на ПЧ подъемной установки слепого скипового ствола меняется ежемесячно. Поэтому измерения ПКЭ проводились при различных сочетаниях нелинейных нагрузок на первом вводе.

На рис. 4 приведен фрагмент упрощенной схемы СЭС центральной распределительной подстанции (ЦРП) № 1 рудника. Контроль выполнялся одновременно в трех точках. Первая точка измерений нахо-

дилась на ячейке № 9 первой секции шин ЦРП № 1. Вторая точка измерений находилась на ячейке № 2 первой секции шин РПП-3. Третья точка измерения находилась непосредственно на входе ПЧ.

Обработка и анализ измеренных данных при работе скиповой подъемной машины совместно с вентилятором главного проветривания показали, что во всех трех точках наблюдается превышение коэффициентов нелинейных гармонических искажений 17 и 19 порядков. Остальные показатели качества электрической энергии соответствуют требованиям ГОСТ 32144-2013. Математическая обработка результатов измерений по выборкам  $n$ -ой гармонической составляющей проводилась с использованием программы MathCAD. Численные характеристики параметров, такие как размерность выборки, среднее значение выборки, дисперсия, среднеквадратическое отклонение и др., рассчитывались по известным выражениям [18].

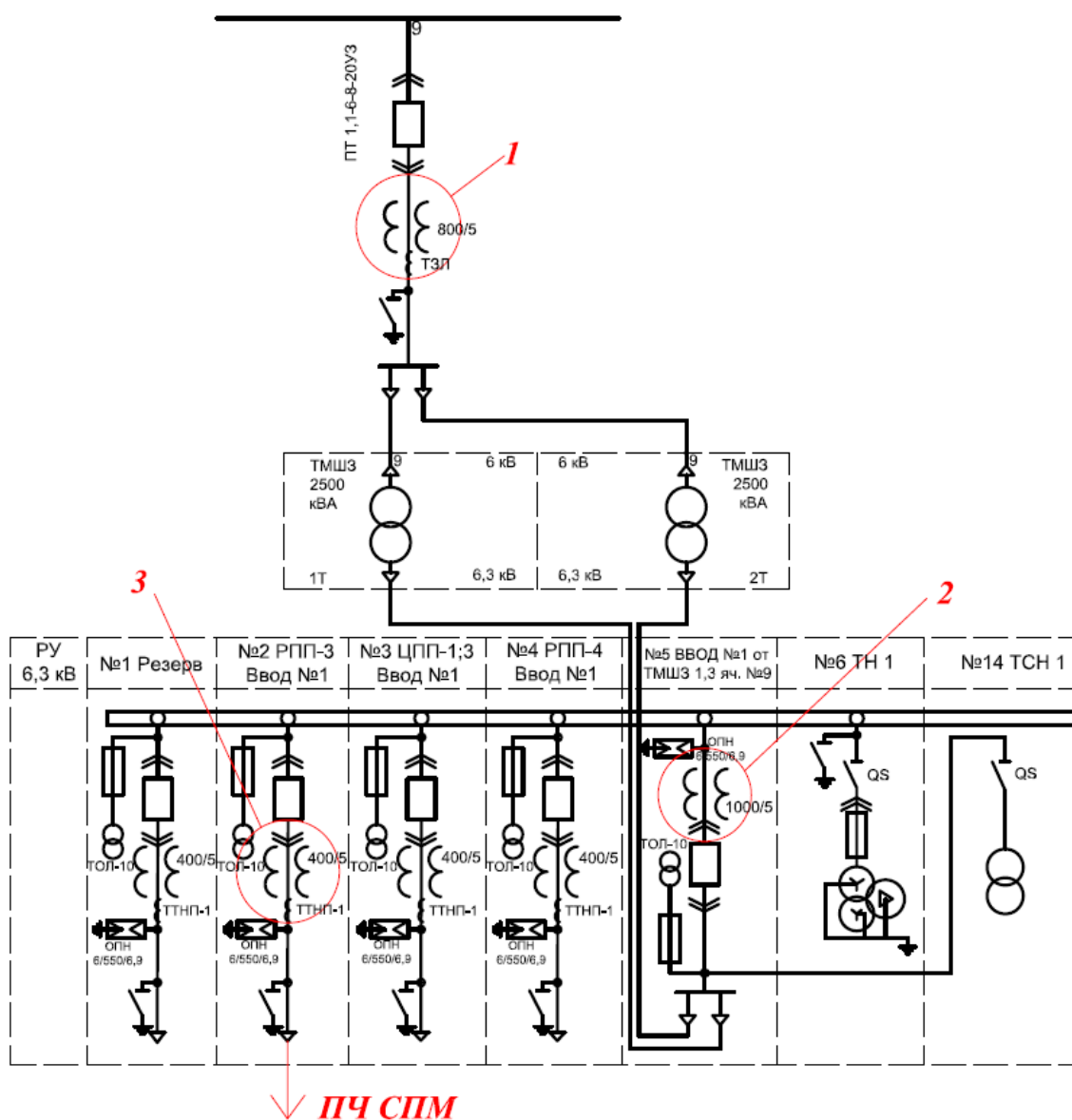


Рис. 4. Фрагмент схемы электроснабжения рудника  
 Fig. 4. Fragment of the power supply scheme of the mine

Расчет коэффициента  $n$ -ой гармонической составляющей межфазных напряжений проводился по формуле:

$$k_{U(n)} = \frac{U(n)}{U(1)} \cdot 100 \%,$$

где  $U(n)$  – действующее значение  $n$ -ой гармонической составляющей напряжения;  $U(1)$  – действующее значение напряжения основной частоты.

Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения определяется по выражению:

$$k_{(U)} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^N k_{(n)}^2}}{k_{U(1)}} \cdot 100 \%,$$

где  $n$  – порядок гармонической составляющей напряжения;  $N$  – порядок последней из учитываемых гармонических составляющих напряжений.

Для проверки корректности рассчитанных параметров авторами разработана компьютерная модель системы электропривода подъемной установки в пакете программ MatLab/Simulink/SimPowerSystems. При помощи интерактивного обозревателя Powergui FFT Analysis Tool исследованы отдельные коэффициенты нелинейных гармонических составляющих и суммарный коэффициент. Получено подтверждение

превышения ТНД, а также 17 и 19 гармоник, которые коррелируются с рассчитанными параметрами с погрешностью менее 10 %. Компьютерному моделированию системы электропривода подъемной установки будет посвящено отдельное исследование. Подробная информация о разработке компьютерных моделей систем ЭП технологических установок горных предприятий представлена в [19].

На рис. 5 приведены суточные графики изменения коэффициентов нелинейных гармонических искажений 17 и 19 порядков. По мнению авторов, именно эти гармоники являются причиной выхода из строя конденсаторов ФКУ, поскольку сопротивление конденсатора для этих гармоник в 17 и 19 раз соответственно ниже по сравнению с сопротивлением для частоты первой гармоники при той же ёмкости.

Обработка и анализ измеренных данных при работе скиповой подъемной машины слепого скипового ствола отдельно от вентилятора главного проветривания, но совместно с другими подъемными машинами рудника показал, что во всех трех точках все показатели качества электрической энергии соответствуют требованиям ГОСТ 32144-2013. Это подтверждается суточными графиками изменений коэффициентов нелинейных гармонических искажений 17 и 19 порядков, приведенных на рис. 6.

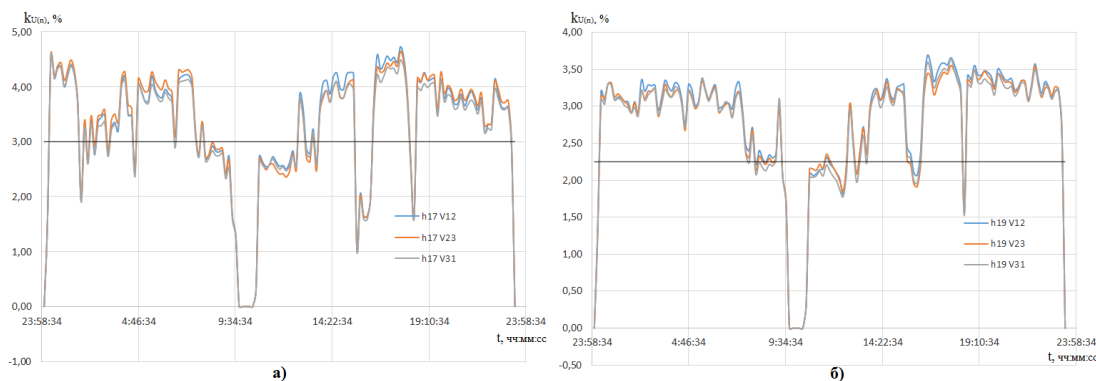


Рис. 5. Графики коэффициентов нелинейных гармонических искажений 17 (а) и 19 (б) порядков на входе преобразователя частоты

Fig. 5. Graphs of the coefficients of nonlinear harmonic distortion of 17 (a) and 19 (b) orders at the input of the frequency converter

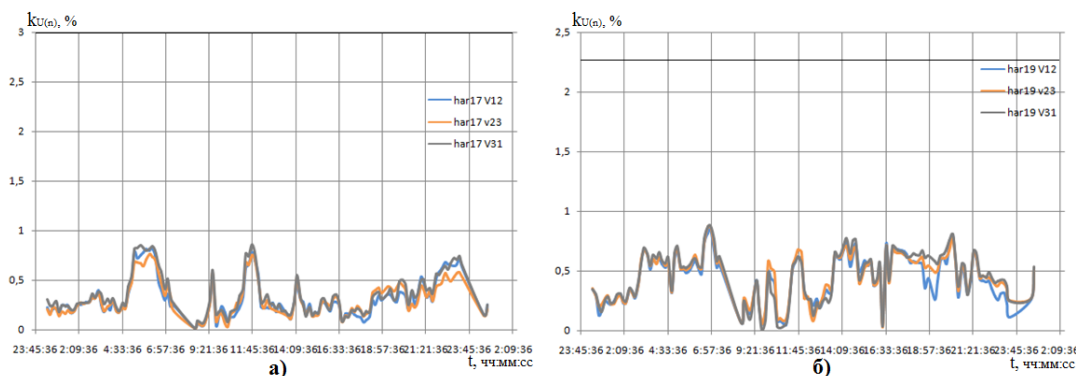


Рис. 6. Графики коэффициентов нелинейных гармонических искажений 17 (а) и 19 (б) порядков на входе преобразователя частоты при работе отдельно от вентилятора

Fig. 6. Graphs of the harmonic distortion coefficients of 17 (a) and 19 (b) orders at the input of the frequency converter when operating separately from the fan unit

Следует отметить, что при работе скиповой подъемной машины слепого скипового ствола отдельно от вентилятора главного проветривания зафиксировано значительное снижение отказов в работе ПЧ. Учитывая, что при снижении гармонических составляющих в сети электроснабжения отказы ПЧ сокращаются, можно предположить, что косвенной причиной отказов преобразователя является изменение свойств конденсатора ФКУ под действием высших гармоник. Иными словами, перенапряжение в звене постоянного тока преобразователя частоты является следствием некорректной работы конденсаторов ФКУ. Таким образом, предположение авторов было полностью подтверждено. Очевидно, высшие гармонические составляющие в сетях электроснабжения рудника влияют на работу ПЧ скиповой подъемной машины, а именно, приводят к постепенной деградации конденсаторов ФКУ ПЧ и в конечном счете к выходу из строя конденсаторов. При этом постепенное изменение параметров конденсатора влияет на интенсивность отказов в работе преобразователя.

Для компенсации высших гармонических составляющих на секции шин ЦРП 6 кВ в системе электроснабжения подземного рудника авторами предложен вариант внедрения активных фильтров (АФ) высших гармоник и проведен расчет эффективности этого метода. АФ содержит полупроводниковые ключевые элементы и работает по принципу генератора «антигармонику».

Значение сопротивления АФ для компенсации  $n$ -ой гармоники будет определяться по формуле:

$$x_{(n)} = x_{L(n)} - x_{C(n)} = n\omega L_{(n)} - \frac{1}{n\omega(C_1^{(n)} + C_2^{(n)})},$$

где  $n$  – порядок гармонической составляющей напряжения.

Эквивалентное сопротивление между секцией шин 6 кВ и системой на  $n$ -й гармонике с учетом параллельной ветви АФ будет равно:

$$x_{\text{ЭКВ}(n)} = \frac{(x_{\text{СИСТ}} + x_{\text{В}} + x_{\text{Н}} + x_{\text{П}})nx_{(n)}}{(x_{\text{СИСТ}} + x_{\text{В}} + x_{\text{Н}} + x_{\text{П}})n + x_{(n)}},$$

где  $x_{\text{СИСТ,В,Н,П}}$  – сопротивление системы, коммутационного аппарата, нагрузки и токоограничивающего реактора соответственно.

Модуль напряжения  $n$ -й гармоники будет определяться по формуле:

$$U_{(n)} = I_{(n)} \frac{\sqrt{(R_{\text{НГ}(n)}^{\text{ЭКВ}})^2 + (X_{\text{НГ}(n)}^{\text{ЭКВ}})^2}}{\sqrt{(R_{\text{НГ}(n)}^{\text{ЭКВ}})^2 + (x_{\text{ЭКВ}(n)} + X_{\text{НГ}(n)}^{\text{ЭКВ}})^2}} x_{\text{ЭКВ}(n)},$$

где  $I_{(n)}=I_1/n$ ,  $I_1$  – действующее значение тока основной частоты;  $n$  – порядок гармоники тока;  $R_{\text{НГ}}^{\text{ЭКВ}}$  и  $X_{\text{НГ}}^{\text{ЭКВ}}$  – эквивалентное сопротивление линейной и нелинейной нагрузок соответственно.

Коэффициент  $n$ -й гармонической составляющей напряжения на шине 6 кВ будет равен:

$$k_{U(n)} = \frac{\sqrt{3}U_{(n)}}{U_{\text{НОМ}}},$$

где  $U_{\text{НОМ}}$  – номинальное напряжение на секции шин.

Результаты расчета для 17 и 19 гармоник представим в табл. 3.

**Таблица 3.** Расчет коэффициентов  $n$ -й гармонической составляющей напряжения на шинах 6 кВ после установки активных фильтров

**Table 3.** Calculation of the coefficients of the  $n^{\text{th}}$  harmonic component of the voltage on the 6 kV buses after installing active filters

Расчетный параметр Design parameter	Номер гармоники Harmonic number		
	17	19	
Тип преобразователя частоты Type of frequency converter	6-пульсный+ 18-пульсный 6-pulse+18-pulse		
Суммарная мощность искажающей нагрузки, кВА Total power of the distorting load, kVA	4033,6		
Действующее значение тока высшей гармоники, А Effective value of the current of the highest harmonic, A	21,74	19,46	
Эквивалентное сопротивление линейной нагрузки, Ом Equivalent resistance of linear load, Ohm	72,3	76,4	
Эквивалентное сопротивление нелинейной нагрузки, Ом Equivalent resistance of non-linear load, Ohm	417,2	466,3	
Эквивалентное сопротивление между секцией шин и системой на $n$ -ой гармонике, Ом Equivalent resistance between the bus section and the system at the $n^{\text{th}}$ harmonic, Ohm	1,190	1,515	
Коэффициент $n$ -ой гармонической составляющей напряжения, % Coefficient of the $n^{\text{th}}$ harmonic component of the voltage, %	0,71	0,81	
Нормативные значения коэффициентов $n$ -ой гармонической составляющей напряжения, % Standard values of the coefficients of the $n^{\text{th}}$ harmonic component of the voltage, %	95 %	1,5	1,0
	100 %	2,25	1,5

Рассчитываем суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения, который будет равен  $k_{(U)}=1,64$  %. Таким образом, расчеты подтверждают, что в случае установки АФ произойдет значительное снижение высших гармоник на секции шин ЦРП № 1 6 кВ, вследствие этого снижается и суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения [20].

### Заключение

Авторами проведено исследование влияния высших гармоник на работу преобразователя частоты в условиях подземного рудника, а именно: сформулированы возможные причины выхода из строя конденсатора фильтрокомпенсирующего устройства преобразователя; проведен инструментальный контроль показателей качества электроэнергии, выявивший проблемы с высшими гармониками; применена методика математической обработки и анализа измеренных результатов; для подтверждения корректности рассчитанных параметров разработана компьютерная

модель системы электропривода подъемной установки; проведен расчет установки активных фильтров в систему электроснабжения рудника для снижения влияния высших гармоник на работу преобразователя частоты.

В результате расчетов возможной установки активных фильтров на секцию шин центральной распределительной подстанции 6 кВ получено фактическое снижение уровней коэффициентов  $n$ -й гармони-

ческой составляющей напряжения, вследствие чего снизился и суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения до нормативного значения в соответствии с ГОСТ 32144-2013. Были даны рекомендации энергослужбам предприятия по установке таких фильтров на 17 и 19 гармоники.

*Исследование выполнено при поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-50104 мол\_нр.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lodha K., Bhawalkar M.P. Robust control of DC drive using sliding mode control // 2015 International Conference on Energy Systems and Applications (ICESA). – Pune, India, 30 October–1 November, 2015. – P. 645–649. DOI: 10.1109/ICESA.2015.7503429
2. Sharygin G.S., Sharygina L.I. Siberian electronics and cultural progress in the east Russia during the last century // 2015 ICONTEC/IEEE International History of High-Technologies and their Socio-Cultural Contexts Conference (HISTELCON). – Tel-Aviv, Israel, 18–19 August, 2015. – P. 1–4. DOI: 10.1109/HISTELCON.2015.7307319
3. Family of micro switches based on silicon carbide for extreme conditions and duty / V. Luchinin, A. Afanasjev, V. Ilyin, A. Koriyakov, A. Petrov // 2017 11th International Workshop on the Electromagnetic Compatibility of Integrated Circuits (EMCCompo). – St. Petersburg, Russia, 4–8 July, 2017. – P. 97–99. DOI: 10.1109/EMCCompo.2017.7998089
4. Панихидников С.А., Новоселов С.В., Куликович А.В. Оценка и оптимизация энергетических затрат труда машинистов горно-выемочных машин очистных забоев – составная часть безопасности жизнедеятельности на шахтах России // Уголь. – 2018. – № 11 (1112). – С. 64–69. DOI: 10.18796/0041-5790-2018-11-64-69
5. Energy saving in mining production / V.I. Golik, V.I. Komashchenko, V.S. Morkun, N.V. Morkun, S.M. Hryshchenko // Science and Innovation. – 2018. – V. 14. – № 3. – P. 29–39. DOI: 10.15407/scine14.03.029
6. Электропривод вентиляторов шахтных установок / Б.И. Абрамов, Л.Х. Дацковский, И.К. Кузьмин, Ю.В. Шевырёв // Электротехника. – 2017. – № 3. – С. 67–74.
7. Змиева К.А. Моделирование сети электроснабжения промышленного предприятия с использованием постоянного тока // Электротехника. – 2015. – № 5. – С. 2–9.
8. Костыгов А.М., Кычкин А.В., Артемов С.А. Автоматизированная система удаленного энергомониторинга подвижных объектов с электроприводом // Электротехника. – 2015. – № 11. – С. 48–50.
9. Усовершенствованный электропривод шахтных установок с возможностью рекуперации электроэнергии / Э.Е. Пугачёва, В.М. Степанов, А.С. Иванов, П.Р. Нусратов, А.А. Букарев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2018. – № 6. – С. 412–418.
10. Фащиленко В.Н., Решетняк С.Н. Энергоэффективный резонансный режим электромеханических систем органов резания горных машин на базе современных структур управления // Горное оборудование и электромеханика. – 2016. – № 4 (122). – С. 41–45.
11. Исаева Т.М. О результатах исследования высших гармоник на высоковольтной подстанции // Главный энергетик. – 2016. – № 11. – С. 32–35.
12. Iwahashi Y., Mizuno Y., Hara M., Tagami R., Ishigaki M. Analysis of current distribution on IGBT under unclamped inductive switching conditions // Microelectronics Reliability. – 2012. – V. 52. – № 9–10. – P. 2430–2433. DOI: 10.1016/j.microrel.2012.06.075
13. Comparative study of MOSFET and IGBT for high repetitive pulsed power modulators / S.-R. Jang, H.-J. Ryoo, G. Goussev, G.H. Rim // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2012. – V. 40. – № 10–1. – P. 2561–2568. DOI: 10.1109/TPS.2012.2186592
14. Кодкин В.Л., Аникин А.С., Мальчер М.А. Проблемы внедрения частотного регулирования в горно-добывающей отрасли // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2012. – № 37 (296). – С. 45–49.
15. Assessment of the energy efficient of the modernized main fan unit of the underground mine / A.N. Egorov, A.S. Semenov, Yu.V. Bebikhov, A.A. Sigaenko // International Journal of Energy for a Clean Environment. – 2019. – V. 20. – № 2. – P. 153–165. DOI: 10.1615/InterJEnerCleanEnv.2019026505
16. Анализ эффективности применения частотно-регулируемого электропривода в условиях алмазодобывающих предприятий / А.Н. Егоров, А.С. Семенов, Я.С. Харитонов, О.В. Федоров // Горный журнал. – 2019. – № 2. – С. 77–82. DOI: 10.17580/gzh.2019.02.16
17. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2014. – 19 с.
18. Мониторинг показателей качества электрической энергии в системах электроснабжения горных предприятий: монография / И.И. Карташев, В.Н. Тульский, Н.М. Кузнецов, А.С. Семёнов. – М.: Изд-во «Перо», 2013. – 142 с.
19. Semenov A.S., Egorov A.N., Khubieva V.M. Assessment of energy efficiency of electric drives of technological units at mining enterprises by mathematical modeling method // 2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – Sochi, Russia, 25–29 March, 2019. – P. 1–6. DOI: 10.1109/ICIEAM.2019.8743025
20. Abramovich B.N., Sychev Y.A., Zimin R.Y. The hybrid correction system, based on active and passive filters for harmonic compensation in networks of oil enterprises // 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). – Vladivostok, Russia, 3–4 October 2018. – P. 1–4. DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602638

*Поступила 27.08.2019 г.*

#### Информация об авторах

**Егоров А.Н.**, начальник управления связи СТ «Алмазавтоматика» АК «АЛРОСА» (ПАО).

**Харитонов Я.С.**, начальник участка силовой преобразовательной техники СТ «Алмазавтоматика» АК «АЛРОСА» (ПАО).

**Шевчук В.А.**, кандидат технических наук, инженер-конструктор, АО «Научно-производственный центр «Полнос».

**Семёнов А.С.**, кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой электроэнергетики и автоматизации промышленного производства Политехнического института (филиала) Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова.

UDC 621.314.58, 622.23.05

## INFLUENCE OF HIGH HARMONICS ON A FREQUENCY CONVERTER OPERATION IN UNDERGROUND MINING

**Ayaal N. Egorov**<sup>1</sup>,  
egorovan@alrosa.ru

**Yakov S. Kharitonov**<sup>1</sup>,  
kharitonovyas@alrosa.ru

**Vladislav A. Shevchuk**<sup>2</sup>,  
shevchukvlal@yandex.ru

**Alexander S. Semenov**<sup>3</sup>,  
as.semenov@s-vfu.ru

<sup>1</sup> PJSC ALROSA,  
6, Lenin street, Mirny, Republic of Sakha (Yakutia), 678170, Russia.

<sup>2</sup> JSC Research and Production Center Polyus,  
56-B, Kirov avenue, Tomsk, 634050, Russia.

<sup>3</sup> North-Eastern Federal University n.a. M.K. Ammosov, Polytechnic institute (branch) in Mirny,  
5/1, Tikhonov street, Mirny, Republic of Sakha (Yakutia), 678170, Russia.

**The relevance** of the research is caused by the need to identify the reasons of failure of the nodes and parts of the frequency converter, as well as the capacitor of the filter compensating device in the electric drive system of the skip hoist. The failure of this unit during the development of the protection algorithm leads to application of a safety brake to the lifting machine, which has a sufficiently large kinetic energy, which, in its turn, dissipates in the components and parts of the lifting machine, leading to a reduction in their service life.

**The aim** of the research is to determine the degree of influence of higher harmonics in the power supply system of an underground mine on the elements of the frequency converter of the electric drive system of a skip hoist installation and propose methods to reduce them.

**Objects:** frequency converter, electric drive system of a lifting installation, power supply system of an underground mine, other technological installations and their electric drive systems that affect the generation of higher harmonics.

**Methods:** instrumental control of electric energy quality indicators in accordance with the requirements of GOST 32144-2013; mathematical processing and analysis of the results using the MathCAD software; computer simulation of the operation modes of the electric drive system in the MatLab environment.

**Results.** The authors have given the characteristic of a skip hoist machine for a blind skip shaft and its electric drive system and analyzed the results of inspection of the electric drive system obtained both before and after putting the unit into commercial operation. The reasons for the failure of the filter compensating device are investigated, and the causes of failures in the operation of the frequency converter are analyzed. The authors drew the conclusions on the effect of higher harmonics on a frequency converter operation in an underground mine and proposed the measures to protect electrical equipment from higher harmonics and methods for their reduction.

### Key words:

Higher harmonics, frequency converter, electric drive system, power supply system, skip hoist installation, underground mine.

*The reported study was funded by RFBR according to the research project no. 19-38-50104.*

### REFERENCES

- Lodha K., Bhawalkar M.P. Robust control of DC drive using sliding mode control. *2015 International Conference on Energy Systems and Applications (ICESA)*. Pune, India, 30 October–1 November, 2015. pp. 645–649. DOI: 10.1109/ICESA.2015.7503429
- Sharygin G.S., Sharygina L.I. Siberian electronics and cultural progress in the east Russia during the last century. *2015 ICOHTEC/IEEE International History of High-Technologies and their Socio-Cultural Contexts Conference (HISTELCON)*. Tel-Aviv, Israel, 18–19 August, 2015. pp. 1–4. DOI: 10.1109/HISTELCON.2015.7307319
- Luchinin V., Afanasjev A., Ilyin V., Korlyakov A., Petrov A. Family of micro switches based on silicon carbide for extreme conditions and duty. *2017 11<sup>th</sup> International Workshop on the Electromagnetic Compatibility of Integrated Circuits (EMCCompo)*. St. Petersburg, Russia, 4–8 July, 2017. pp. 97–99. DOI: 10.1109/EMCCompo.2017.7998089
- Panihidnikov S.A., Novoselov S.V., Kulinkovich A.V. Assessment and optimization of energy costs of the work of drivers of mining and extraction machines of coal mine face treatment – an integral part of the safety of life in the treatment areas of Coal Mines in Russia. *Ugol*, 2018, no. 11, pp. 64–69. DOI: 10.18796/0041-5790-2018-11-64-69. In Rus.
- Golik V.I., Komashchenko V.I., Morkun V.S., Morkun N.V., Hryshchenko S.M. Energy saving in mining production. *Science and Innovation*, 2018, vol. 14, no. 3, pp. 29–39. DOI: 10.15407/scine14.03.029
- Abramov B.I., Datskovskii L.K., Kuz'min I.K., Shevryev Y.V. Electric drives of mining installations. *Russian Electrical Engineering*, 2017, vol. 88, no. 3, pp. 159–165. DOI: 10.3103/S1068371217030026
- Zmieva K.A. Modeling of an industrial enterprise power supply system using direct current. *Russian Electrical Engineering*, 2015, vol. 86, no. 5, pp. 239–245. DOI: 10.3103/S1068371215050120
- Kostygov A.M., Kychkin A.V., Artemov S.A. An automated system for remote energy monitoring of mobile objects with

- electric drives. *Russian Electrical Engineering*, 2015, vol. 86, no. 11, pp. 667–669. DOI: 10.3103/S1068371215110073
9. Pugacheva E.E., Stepanov V.M., Ivanov A.S. Improved electric drive of mine installations with the possibility of recovery electricity. *News of the Tula state university. Technical sciences*, 2018, no. 6, pp. 412–418. In Rus.
  10. Fashilenko V.N., Reshetnyak S.N. Energy-efficient resonant mode of electromechanical systems of bodies cutting mining machines based on modern governance structures. *Mining Equipment and Electromechanics*, 2016, vol. 122, no. 4, pp. 41–45. In Rus.
  11. Isaeva T.M. Results of researching high harmonics at high voltage substation. *Chief Power Engineer*, 2016, no. 11, pp. 32–35. In Rus.
  12. Iwahashi Y., Mizuno Y., Hara M., Tagami R., Ishigaki M. Analysis of current distribution on IGBT under unclamped inductive switching conditions. *Microelectronics Reliability*, 2012, vol. 52, no. 9–10, pp. 2430–2433. DOI: 10.1016/j.microrel.2012.06.075
  13. Jang S.-R., Ryoo H.-J., Goussev G., Rim G.H. Comparative study of MOSFET and IGBT for high repetitive pulsed power modulators. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2012, vol. 40, no. 10–1, pp. 2561–2568. DOI: 10.1109/TPS.2012.2186592
  14. Kodkin V.L., Anikin A.S., Malcher M.A. Problems of introduction of frequency control in the mining industry. *Bulletin of South Ural State University. Series Power Engineering*, 2012, no. 37 (296), pp. 45–49. In Rus.
  15. Egorov A.N., Semenov A.S., Bebikhov Yu.V., Sigaenko A.A. Assessment of the energy efficient of the modernized main fan unit of the underground mine. *International Journal of Energy for a Clean Environment*, 2019, vol. 20, no. 2, pp. 153–165. DOI: 10.1615/InterJEnerCleanEnv.2019026505
  16. Egorov A.N., Semenov A.S., Kharitonov Ya.S., Fedorov O.V. Efficiency of variable frequency drive in diamond mining. *Gornyi Zhurnal*, 2019, no. 2, pp. 77–82. DOI: 10.17580/gzh.2019.02.16. In Rus.
  17. GOST 32144-2013. *Elektricheskaya energiya. Sovmestnost tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya* [State Standard 32144-2013. Electrical energy. The compatibility of technical means is electromagnetic. Norms of quality of electric energy in general-purpose power supply systems]. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 19 p.
  18. Kartashev I.I., Tul'skiy V.N., Kuznetsov N.M., Semenov A.S. *Monitoring pokazateley kachestva elektricheskoy energii v sistemakh elektrosnabzheniya gornykh predpriyatiy* [Monitoring of indicators of the quality of electric energy in the power supply systems of mining enterprises]. Moscow, Pero Publ., 2013. 142 p.
  19. Semenov A.S., Egorov A.N., Khubieva V.M. Assessment of energy efficiency of electric drives of technological units at mining enterprises by mathematical modeling method. *2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. Sochi, Russia, 25–29 March, 2019. pp. 1–6. DOI: 10.1109/ICIEAM.2019.8743025
  20. Abramovich B.N., Sychev Y.A., Zimin R.Y. The Hybrid Correction system, based on active and passive filters for harmonic compensation in networks of oil enterprises. *2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*. Vladivostok, Russia, 3–4 October 2018. pp. 1–4. DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602638.

Received: 27 August 2019.

#### Information about the authors

**Ayaal N. Egorov**, head of communication department, ST Almazavtomatika, PJSC ALROSA.

**Yakov S. Kharitonov**, head of VFD department, ST Almazavtomatika, PJSC ALROSA.

**Vladislav A. Shevchuk**, Cand. Sc., engineer, JSC Research and Production Center Polyus.

**Alexander S. Semenov**, Cand. Sc., associate professor, head of E&AIP department, North-Eastern Federal University n.a. M.K. Ammosov, Polytechnic institute (branch) in Mirny.

УДК 553.435

## МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ХАЛЬКОПИРИТА РУД ЮБИЛЕЙНОГО МЕДНОКОЛЧЕДАННОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (ЮЖНЫЙ УРАЛ) ПО ДАННЫМ ЛА-ИСП-МС

Целуйко Александр Сергеевич<sup>1</sup>,  
celyukoa@rambler.ru

Масленников Валерий Владимирович<sup>1</sup>,  
mas@mineralogy.ru

Аюпова Нурия Радитовна<sup>1</sup>,  
ayupova@mineralogy.ru

Масленникова Светлана Петровна<sup>1</sup>,  
svmas@mineralogy.ru

Артемьев Дмитрий Александрович<sup>1</sup>,  
artemyev@mineralogy.ru

Блинов Иван Александрович<sup>1</sup>,  
Ivan\_a\_blinov@mail.ru

<sup>1</sup> Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН,  
Россия, 456317, г. Миасс, территория Ильменского заповедника.

**Актуальность.** Исследования сульфидов методом ЛА-ИСП-МС является одним из перспективных направлений изучения рудных месторождений. Понимание трендов минералого-геохимической эволюции сульфидов позволяет интерпретировать процессы дифференциации вещества на стадиях гидротермального седиментогенеза и литогенеза колчеданных месторождений, что актуально для создания и развития минералого-геохимических моделей сульфидного аутигенеза на новом уровне.

**Цель:** сопоставление минералого-геохимической специализации генетических разновидностей халькопирита для выявления тренда эволюции сульфидных отложений Юбилейного медноколчеданного месторождения (Южный Урал).

**Методы.** Выявление морфогенетических типов халькопирита проводилось на основе рудно-фациальных исследований. Изучение минеральных особенностей халькопирита выполнено на оптическом микроскопе Olutrus BX51. Состав редких минералов получен с помощью сканирующего электронного микроскопа Tescan Vega 3 sbi. Содержания элементов-примесей в халькопирите получены методом ЛА-ИСП-МС на масс-спектрометре Agilent 7700x, оборудованного приставкой для лазерной абляции New Wave Research UP-213 в ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН. Предварительные ЛА-ИСП-МС анализы халькопирита сделаны в Тасманийском университете (г. Хобарт, Австралия).

**Результаты.** Разновидности халькопирита подразделены на две группы: гидротермальную и постседиментационную. Гидротермальная группа включает в себя субгедральные разновидности халькопирита пирит-халькопиритовых, сфалерит-пирит-халькопиритовых, и халькопирит-пирит-сфалеритовых труб палеокурильщиков. Во второй группе, сформированной по рудокластатам, выделены псевдоморфные, цементационные, конкреционные, а также прожилковые динамометаморфические разновидности халькопирита. Каждая разновидность халькопирита характеризуется своими минеральными ассоциациями и вариациями содержания элементов-примесей, отражающими различия в процессах и условиях минералообразования. В ряду от пирит-халькопиритовых к существенно сфалеритовым гидротермальным трубам палеокурильщиков наблюдается смена копьевидных и дендритовидных кристаллов халькопирита графическими и эпिताксиальными сростками халькопирита и сфалерита. В этом же направлении в гидротермальном халькопирите снижаются медианные содержания элементов высокотемпературной (Se, Bi), среднетемпературной (Te, Sb) и низкотемпературной (Tl) ассоциаций. Постседиментационные разновидности халькопирита отличаются от гидротермальных аналогов пониженными концентрациями Sn и отсутствием существенных вариаций содержания Se. Во временном ряду постседиментационного халькопирита (псевдоморфный→цементационный→конкреционный→прожилковый) постепенно убывают медианные значения содержания примесей Mn, Co, Ni, Mo, As, Tl, Au, Ag, Bi и Te.

### Ключевые слова:

Халькопирит, аутигенез, ЛА-ИСП-МС, трубы палеокурильщиков, сульфидные турбидиты, сульфидные конкреции, колчеданные месторождения, Южный Урал.

### Введение

В рудах колчеданных месторождений Урала халькопирит является третьим по распространенности рудным минералом и главным источником меди [1]. Являясь сквозным минералом в большинстве типов колчеданных руд, халькопирит образуется в широком диапазоне условий. Предполагается, что формирование халькопирита начинается с образования кристи-

фикационного халькопирита в гидротермальную стадию и продолжается при постседиментационных преобразованиях руд [1–5 и др.].

Ключом для типизации генераций халькопирита может выступать полноценная текстурно-структурная, морфологическая и геохимическая характеристика, выполненная с учетом времени, обстановок и процессов минералообразования применительно к опреде-



ленным рудным фациям. Первичный гидротермальный халькопирит, обнаруженный в фрагментах сульфидных труб колчеданных месторождений, имеет копьевидную морфологию и содержит решетчатые структуры распада, характерные для высокотемпературного халькопирита современных черных курильщиков [3, 6, 7]. Вторичный псевдоморфный халькопирит распространен в рудокластических отложениях месторождений уральского типа, где он, благодаря большей устойчивости в условиях субмаринного гипергенеза, замещает пирит и сфалерит [4, 8–10]. Придонный характер замещения халькопиритом подтверждается асимметричной минералогической зональностью сульфидных слоев, в кровле которых помимо новообразованного халькопирита концентрируются оксиды железа, кварц и/или барит [4, 8–10]. Для некоторых халькопиритовых руд, например, на Сафьяновском месторождении, предполагается гидротермально-метасоматическое происхождение [5].

Благодаря относительно низким содержаниям большинства элементов-примесей в халькопирите, подходящим методом для его изучения является масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой и лазерной абляцией (ЛА-ИСП-МС). Исследование типохимизма халькопирита рудных месторождений методом ЛА-ИСП-МС – перспективное направление исследований, активно развивающееся в последнее время [11–18]. При этом изучению химического состава гидротермального высокотемпературного халькопирита уделяется гораздо больше внимания по сравнению с постседиментационными новообразованными разновидностями. Отмечается, что гидротермально-крустификационный халькопирит относительно псевдоморфной разновидности обогащен большей частью элементов-примесей [4, 5]. Вместе с тем концентрации химических элементов в псевдоморфном халькопирите крайне непостоянны и зависят от геохимических ассоциаций замещаемых сульфидов [4, 5]. Информативными могут оказаться прожилковые, цементационные и конкреционные разновидности халькопирита, так как именно они отражают особенности геохимической дифференциации в поздние стадии преобразования колчеданных руд. Подходящим объектом для исследований выступают обломочные сульфидные отложения, комбинирующие в себе совокупность рудокластических, псевдоморфных, интерстициальных, цементационных, прожилковых и конкреционных разновидностей халькопирита. Сравнительный анализ халькопирита различного генезиса открывает путь к пониманию минералого-геохимической эволюции сульфидных отложений.

В статье на примере сульфидных отложений Юбилейного месторождения проведено сопоставление гидротермальных и постседиментационных разновидностей халькопирита с целью выявления тренда минералого-геохимической эволюции, что может быть использовано для реконструкции сульфидной залежи от стадий гидротермального рудоотложения до субмаринного гипергенеза. Фундаментальная ценность подобных исследований состоит в интерпрета-

ции процессов дифференциации вещества на различных стадиях седиментогенеза и литогенеза колчеданных месторождений. Изучение особенностей микроэлементного состава постседиментационных сульфидов необходимо для выявления критериев отличия рудоносных и безрудных горизонтов колчеданосных полей и может быть использовано как один из поисковых признаков на колчеданное оруденение при разведочных работах.

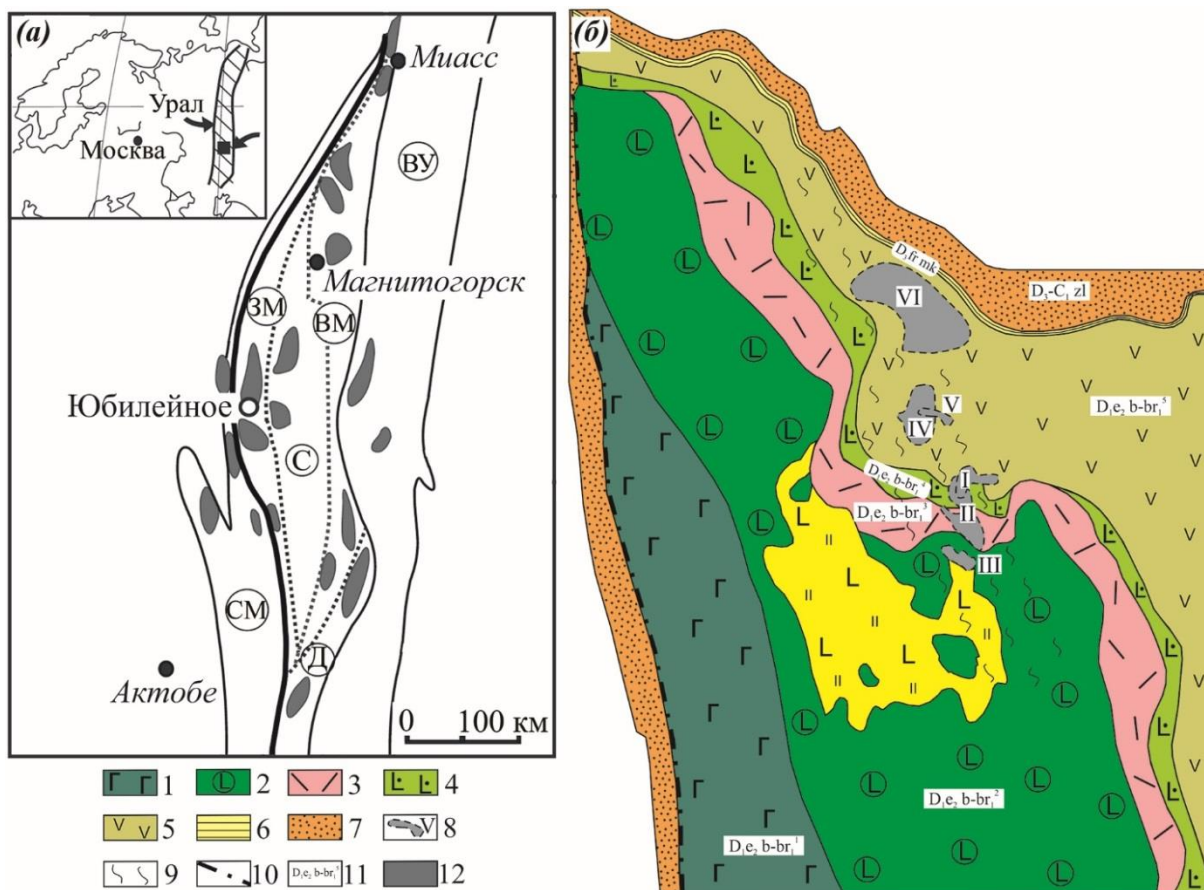
#### Геологическая характеристика месторождения

Юбилейное медноколчеданное месторождение географически расположено в 34 км к северу от с. Акъяр (Башкортостан). Месторождение приурочено к Западно-Магнитогорской палеовулканической зоне, колчеданосные комплексы которой принадлежат фронтальной части энсиматической островодужной системы [19, 20]. Шесть рудных залежей месторождения локализованы в породах баймак-бурибайской свиты, соответствующей раннедевонскому начальному циклу островодужного вулканизма ( $D_{1e2b-br}$ ) и перекрыты породами верхнетаналькского комплекса ( $D_{2e2vtn}$ ): базальтами, андезибазальтами, андезитами, дацитами, риодацитами и риолитами гомодромной известково-щелочной серии (рис. 1) [21]. В составе рудовмещающей толщи распространены натриевые магнезиальные базальты, бонинито-базальты, бониниты, андезибониниты, магнезиальные андезиты и андезидациты [22].

Запасы руд месторождения достигают 107 млн т, меди – 1655 тыс. т, цинка – 1059 тыс. т. Средние содержания меди в различных промышленных сортах руд на месторождении составляют 0,08–5,74 %, цинка – от 0,05 до 3,36 %. Месторождение относится к уральскому типу колчеданных месторождений [23]. В настоящее время ведется подземная отработка руд Первой, Четвертой и Пятой залежей.

На месторождении встречены массивные, обломочные, обломковидные, прожилковые и слоистые руды, состоящие из пирита, халькопирита и сфалерита. Редкие минералы представлены марказитом, пирротином, арсенопиритом, галенитом, а также минералами группы блеклых руд, борнитом, магнетитом, гематитом, баритом, электрумом, самородным золотом, аргентитом, алтаитом, гесситом, колорадоитом, петцитом, теллуrowисмутитом, раклиджитом, вольтинским, энаргитом, бурнонитом и германитом [19, 24, 25].

Рассматриваемые в статье руды локализованы преимущественно на флангах Второй рудной залежи, сложенных рудокластическими отложениями: сульфидными брекчиями и гравийно-песчаными и алевропесчаными сульфидными турбидитами. Горизонты обломочных руд переслаиваются с сульфидсодержащими кремнистыми и хлорит-кремнистыми алевропеллитами. Среди рудокластов в центральной и периферийной части рудной залежи встречаются фрагменты сульфидных труб палеокурильщиков различного минерального состава и пиритизированные биоморфозы по мелким трубчатым червям [25].



**Рис. 1.** Позиция месторождения на схеме палеогеодинамических зон Южного Урала (а) и схематическая геологическая карта Юбилейного медноколчеданного месторождения (б) [9, 19]. ГУР – Главный Уральский разлом, ВМ – Восточно-Магнитогорская дуга, ЗМ – Западно-Магнитогорская дуга, ВУ – Восточно-Уральское поднятие, С – Сибайский междугорной бассейн, Д – Домбаровский задуговой бассейн, СМ – Сакмарское окраинное море; 1 – диабазы; 2 – базальты; 3 – дациты и риодациты; 4 – лавы андезито-базальтового состава; 5 – андезиты и андезито-дациты; 6 – кремнистые породы Мукасовского горизонта; 7 – полимиктовые песчаники зилаирской свиты; 8 – горизонтальные проекции рудных залежей и их номера; 9 – зоны дробления и расщепления; 10 – разрывные нарушения; 11 – название геологических свит

**Fig. 1.** Position of Yubileynoe VMS deposit in paleogeodynamic regions of South Urals (a), schema of open pit (b) and geological cross-section of Second ore body (c) [9, 19]. ГУР – main Ural fault, ВМ – East Magnitogorsk arc, ЗМ – West Magnitogorsk arc, ВУ – East Uralian uplift, С – Sibai inter-arc basin, Д – Dombarovka back arc basin; СМ – Sakmara marginal sea; 1 – diabases; 2 – basalts; 3 – dacites and rhyodacites; 4 – lavas of andesite-basalt composition; 5 – andesite and andesite-dacites; 6 – siliceous rocks of the Mukasovskogo horizon; 7 – polymictic sandstones of the Zilairskoy formation; 8 – horizontal projections of ore deposits and their numbers; 9 – zones of crushing; 10 – fracture violations; 11 – the name of geological formations

#### Методы исследований

Для исследований использовался материал, отобранный в ходе полевых работ в карьере Юбилейного месторождения. Среди штучных образцов размером до 30\*20 см выделены наиболее обогащенные халькопиритом. Оптические исследования минералов проводились на микроскопе Olympus BX51. Внутреннее строение агрегатов халькопирита выявлялось с помощью травления раствором  $\text{HCl} + \text{HNO}_3$ . Диагностика редких минералов проведена с помощью сканирующего электронного микроскопа Tescan Vega 3 sbu с энергодисперсионным анализатором Oxford Instruments X-act (Институт минералогии ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН, аналитик И.А. Блинов). Предел обнаружения химических элементов не превышает 0,2 мас. %. Воспроизводимость определений составляет от 1 до 15 отн. %.

Содержания элементов-примесей в халькопирите конкреций и сульфидных турбидитов получены методом ЛА-ИСП-МС на масс-спектрометре Agilent 7700x, оборудованном приставкой для лазерной абляции New Wave Research UP-213, в Институте минералогии ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН (аналитик Д.А. Артемьев). Диаметр лазерного пучка составлял 40–60 мкм, частота 5 Гц, энергия на поверхности образца 4–5 Дж/см<sup>2</sup>. Время анализа составляло 100 с, из которых 30 с занимало измерение фона. Для градуировки и расчета использовались международные стандарты: прессованный сульфид USGS MASS-1 и стекло USGS GSD-1g. Несущий газ – He 0,6 л/мин и Ar 0,95 л/мин. Расчет проводился в программе Iolite с использованием <sup>57</sup>Fe в качестве внутреннего стандарта. Результаты анализов обработаны с использовани-

ем программ Excel 2016 и Statistica и представлены в виде таблиц и диаграмм «box&whiskers», на которых показаны квантили 25 и 75 %, медианные и ураганые значения содержаний элементов.

Дополнительные ЛА-ИСП-МС анализы халькопирита выполнены в Тасманийском университете (г. Хобарт, Австралия, аналитики В.В. Масленников, С.П. Масленникова) на лазерном микросонде New Wave Research UP-213, соединенном с масс-спектрометром Agilent 7700х. Подробно методика ЛА-ИСП-МС анализов описана в работе [26].

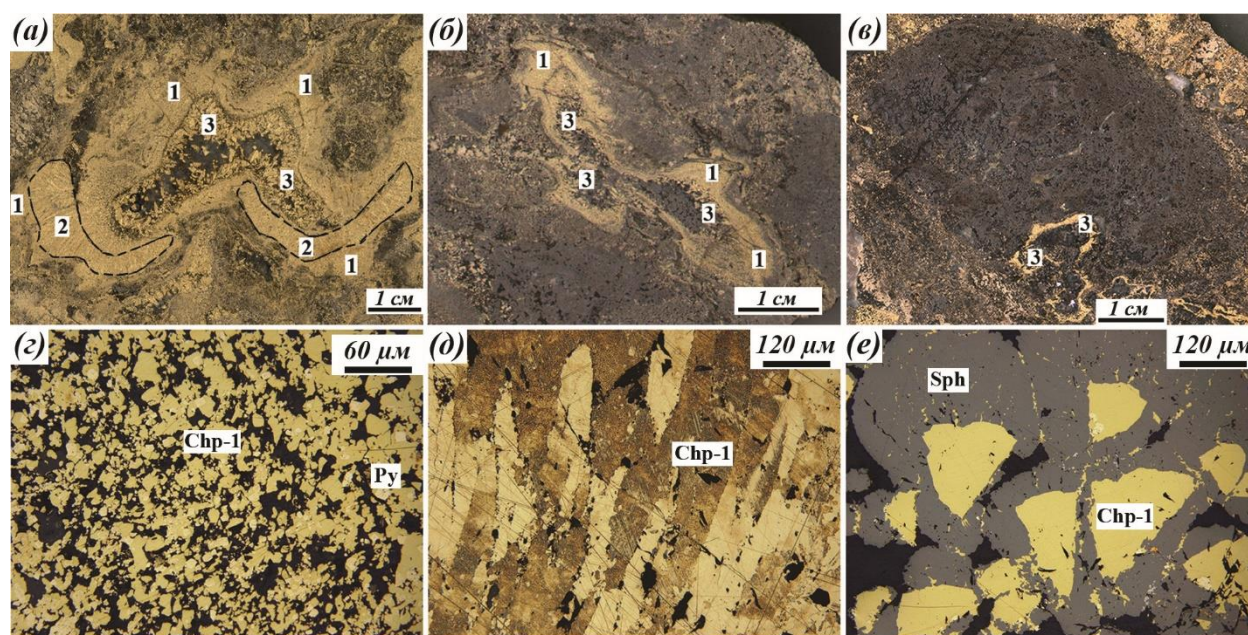
### Результаты исследований

#### Халькопирит гидротермальных труб

Гидротермальные трубы палеокурильщиков являются аналогами современных черных курильщиков и маркируют выходы высокотемпературных минерализованных растворов на поверхность морского дна. Характерными чертами труб как современных, так и древних черных курильщиков является концентрически-зональное строение, округлая или овальная форма в поперечном сечении и небольшой диаметр (до 3–4 см) одиночных трубок. Условия высокого градиента температур формирования труб обуславливают неоднородные текстурно-структурные и геохи-

мические характеристики гидротермального халькопирита [11, 12 и др.].

В колчеданных рудах Юбилейного месторождения первичный гидротермальный халькопирит участвует в строении внутренних стенок палеокурильщиков пирит-халькопиритового, сфалерит-пирит-халькопиритового и халькопирит-пирит-сфалеритового состава (рис. 2, а–в). Халькопиритовая стенка сульфидных труб обычно состоит из трех подзон: (1) внешней, контактирующей с оболочкой и содержащей включения эвгедральных зерен пирита, сфалерита и нерудных минералов (рис. 2, з); (2) центральной, в которой преобладают сростки копьевидных кристаллов размером до 1–2 мм и более (рис. 2, д) и (3) внутренней, граничащей с осевым каналом и образованной друзовидными зернами халькопирита и сфалерита, часто с кальцитом и кварцем в интерстициях (рис. 2, е). В некоторых трубах центральная халькопиритовая подзона отсутствует, а другие подзоны развиты неравномерно и часто прерываются. В целом строение халькопиритовой стенки труб палеокурильщиков Юбилейного месторождения во многом напоминает аналогичные зоны в трубах современных гидротермальных построек [12, 27 и др.].

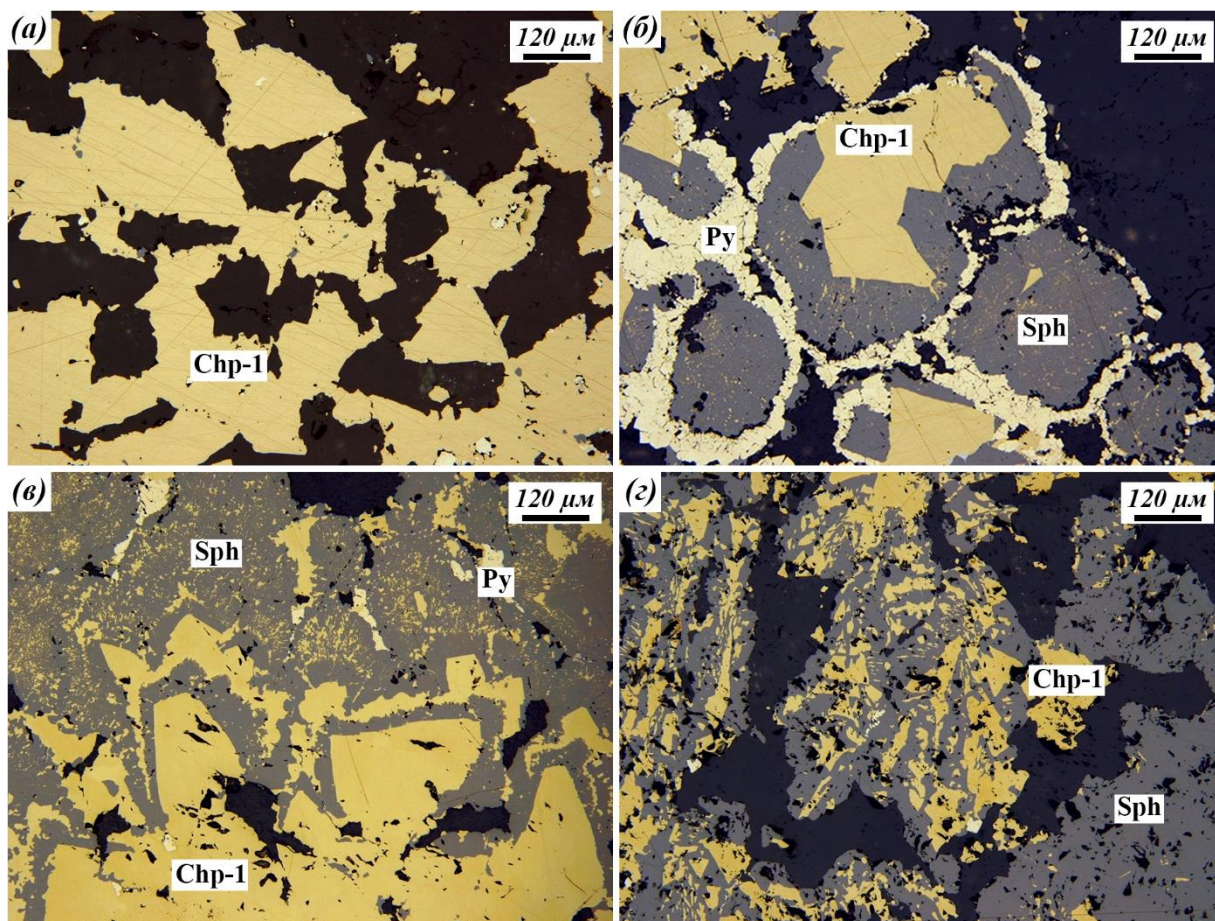


**Рис. 2.** Трубы палеокурильщиков в рудах Юбилейного месторождения: кварц-пирит-халькопиритовая (а), тальк-сфалерит-пирит-халькопиритовая (б), халькопирит-пирит-сфалеритовая (в) (1 – мелкозернистый халькопирит внешней зоны, 2 – копьевидные кристаллы халькопирита в центральной подзоне (обведена пунктирной линией) и 3 – друзовидные зерна халькопирита во внутренней подзоне); г) мелкозернистый гидротермальный халькопирит (Chp-1) с включениями пирита (Py) в кварцевом цементе; д) копьевидные кристаллы халькопирита (Chp-1) в центральной подзоне; е) друзовидные кристаллы халькопирита (Chp-1), обрастающие каймами сфалерита (Sph) во внешней подзоне. Фото: а–в полированный образец, г–е – отраженный свет, д – протравлено в  $HNO_3+HCl$

**Fig. 2.** Chimneys of paleosmokers in ores of Yubileynoe deposit: chalcopyrite-pyrite-quartz (a), chalcopyrite-pyrite-sphalerite-talc (b), sphalerite-pyrite-chalcopyrite (c) (1 – fine-grained chalcopyrite of the outer subzone, 2 – lance-shaped crystals of chalcopyrite in the central subzone (circled by a dotted line) and 3 – druse grains of chalcopyrite in the inner subzone); g) fine-grained hydrothermal chalcopyrite (Chp-1) with pyrite (Py) inclusions in quartz cement; d) lance-shaped chalcopyrite crystals (Chp-1) in the central subzone; e) druse crystals of chalcopyrite (Chp-1), overgrowing with sphalerite (Sph) fringes in the outer subzone. Photo: a–c – polished sample, g–e – reflected light, d – etched in  $HNO_3+HCl$

Характерной особенностью гидротермального халькопирита (Chp-1) является разнообразие форм и размеров его кристаллов в трубах различного минерального состава. В пирит-халькопиритовых и сфалерит-пирит-халькопиритовых палеокурильщиках кристаллы халькопирита в плоскости шлифа имеют угловатую, прямоугольную, треугольную, чечевицеобразную, копьевидную форму, часто с неровными зубчатыми краями (рис. 3, а). Зачастую зерна халькопирита инкрустируются зернами пирита, в сфалерит-пирит-халькопиритовых трубах могут обрастать эпитаксиальными каймами и почками сфалерита (рис. 3, б, в). В некоторых трубах встречаются ритмично-зональные агрегаты с чередованием слоев халькопирита и сфалерита. Для халькопирит-пирит-сфалеритовых труб свойственна небольшая мощность халькопиритовой зоны (менее 1 мм) и тесные графические срастания со сфалеритом (рис. 3, г).

Точечные ЛА-ИСП-МС анализы выявили ряд геохимических отличий между гидротермальным халькопиритом труб различного минерального состава (табл. 1). В целом для халькопирита палеокурильщиков характерны широкие вариации концентраций некоторых элементов V (0,01–54,6 г/т), Co (0,001–41,3 г/т), Zn (84,3–23087 г/т), Mo (0,001–21,1 г/т), Ag (0,3–302 г/т), Te (0,01–186 г/т), Ba (0,001–83,9 г/т), Pb (0,1–1892 г/т) и Bi (0,001–57,2 г/т). Заметно, что вариации содержания ряда элементов (V, Co, Se, Mo, Te, Ba, Bi) в халькопирите пирит-халькопиритовых (chp-1bs) и сфалерит-пирит-халькопиритовых (chp-1gs) труб выше, чем в халькопирите халькопирит-пирит-сфалеритовых (chp-1ws) палеокурильщиков. Значительные вариации концентраций Ag (5,9–302 г/т) и Te (0,37–186 г/т) заметны для халькопирита сфалерит-пирит-халькопиритовых труб (chp-1ws).



**Рис. 3.** Гидротермальный халькопирит (Chp-1) палеокурильщиков: а) угловатые кристаллы халькопирита, выполняющие осевой канал пирит-халькопиритовой трубы; б) последовательное обрастание кристаллов халькопирита слоями гидротермального сфалерита (Sph) и пирита (Py); в) зональный сульфидный агрегат с циклическим чередованием эпитаксиальных слоев халькопирита и сфалерита; г) графические срастания сфалерита и халькопирита в осевом канале халькопирит-пирит-сфалеритовой трубы. Отраженный свет

**Fig. 3.** Hydrothermal chalcopyrite (Chp-1) paleosmokers: а) angular crystals of chalcopyrite (Chp-1) in axial channel of chalcopyrite-pyrite chimneys; б) sequential overgrowing of chalcopyrite crystals with layers of hydrothermal sphalerite (Sph) and pyrite (Py); в) zonal sulfide aggregates with cyclic sequence of layers of chalcopyrite (Chp-1) and sphalerite (Sph); г) graphic intergrowth of sphalerite (Sph) and chalcopyrite (Chp-1) in the axial channel of the sphalerite-pyrite-chalcopyrite chimney. Reflected light

**Таблица 1.** Химический состав (г/т) гидротермального халькопирита пирит-халькопиритовых (chp-1bs), сфалерит-пирит-халькопиритовых (chp-1gs) и халькопирит-пирит-сфалеритовых (chp-1ws) труб палеокурильщико

**Table 1.** Chemical composition (g/t) of hydrothermal chalcopyrite chalcopyrite-pyrite (chp-1bs), chalcopyrite-pyrite-sphalerite (chp-1gs) and sphalerite-pyrite-chalcopyrite (chp-1ws) chimneys of paleosmokers according to LA-ICP-MS

Параметры Parameter	Трубы Chimneys	V	Mn	Co	Ni	Zn	As	Se	Mo	Ag
среднее average	chp-1bs	2,9	1,6	1,6	0,34	683	3,7	369	5,8	14,2
	chp-1gs	1,7	4,6	0,01	0,10	250	2,9	97,2	4,9	66,8
	chp-1ws	0,08	3,3	0,04	0,12	438	3,0	19,9	0,8	14,0
δ	chp-1bs	9,9	3,5	6,7	1,1	3271	8,7	241	21,1	15,0
	chp-1gs	8,1	13,4	0,01	0,24	158	2,8	59,4	18,5	77,6
	chp-1ws	0,14	15,4	0,04	0,34	489	9,7	7,7	2,4	10,8
макс max	chp-1bs	54,6	15,4	41,3	6,8	23087	58,2	961	134	68,4
	chp-1gs	45,4	65,0	0,04	0,96	799	12,1	265	101	302
	chp-1ws	0,54	81,7	0,19	1,67	1970	47,7	37,6	11,6	53,9
мин min	chp-1bs	0,01	0,02	0,001	0,01	84,3	0,11	33,6	0,001	0,27
	chp-1gs	0,01	0,03	0,001	0,001	131	0,1	25,4	0,001	5,9
	chp-1ws	0,03	0,35	0,03	0,01	248	0,10	17,9	0,16	12,0
медиана md	chp-1bs	0,13	0,27	0,02	0,05	191	1,8	290	0,11	8,4
	chp-1gs	0,07	0,14	0,01	0,001	210	2,4	80,3	0,21	33,5
	chp-1ws	0,03	0,35	0,03	0,01	248	0,10	17,9	0,16	12,0
		Cd	Sn	Sb	Te	Ba	Au	Tl	Pb	Bi
среднее average	chp-1bs	6,7	12,2	5,3	10,6	3,7	0,28	0,14	16,3	4,3
	chp-1gs	1,7	25,9	3,5	25,1	0,08	0,45	0,04	80,7	1,3
	chp-1ws	5,1	22,0	2,0	0,60	0,08	0,25	0,02	20,6	0,05
δ	chp-1bs	15,3	5,0	5,5	22,1	14,6	0,28	0,24	11,7	8,7
	chp-1gs	1,2	7,6	3,4	52,8	0,15	0,38	0,06	336	2,2
	chp-1ws	4,5	6,5	2,1	0,51	0,20	0,15	0,06	20,5	0,12
макс max	chp-1bs	108	19,9	24,0	154	83,9	1,4	1,4	46,9	57,2
	chp-1gs	5,7	49,6	15,9	186	0,68	1,6	0,29	1892	9,6
	chp-1ws	22,7	33,1	8,9	1,82	1,1	0,58	0,29	104	0,62
мин min	chp-1bs	0,47	4,5	0,06	0,55	0,01	0,01	0,001	0,13	0,03
	chp-1gs	0,34	14,5	0,5	0,37	0,001	0,02	0,001	3,1	0,001
	chp-1ws	0,97	11,2	0,18	0,01	0,01	0,04	0,001	2,10	0,001
медиана md	chp-1bs	4,6	10,4	2,7	4,7	0,08	0,20	0,03	14,9	0,90
	chp-1gs	1,3	24,7	1,8	2,4	0,02	0,40	0,01	12,0	0,49
	chp-1ws	3,5	22,5	1,4	0,53	0,02	0,24	0,001	14,4	0,02

Примечание: количество проб для chp-1bs N=49, для chp-1gs N=31, для chp-1ws N=28. Приведены средние, максимальные, минимальные и медианные содержания (г/т). δ – стандартное отклонение.

Note. Number of analyses for chp-1bs N=49, for chp-1gs N=31, for chp-1ws N=28. Average – average, max – maximum and min – minimum contents (g/t). δ – standard deviation, md – median value.

#### Халькопирит сульфидных турбидитов

Фланги Второй рудной залежи сложены чередованием алевропесчаных сульфидных турбидитов пирит-халькопиритового и халькопирит-пиритового состава с прослоями хлорит-кремнистых и кремнистых алевропелитов, вулканомиктовых песчаников и гравелитов (рис. 4, а).

Сульфидные слои в турбидитах мощностью до 1–1,5 см нередко характеризуются прогрессивной сортировкой сульфидного материала и наличием мелких (до 0,3–0,4 см) обломков хлоритизированных гиалокластов (рис. 4, а). В некоторых слоях сульфидных турбидитов сохраняются фрагменты пиритовых, пирит-халькопиритовых и сфалерит-халькопирит-пиритовых руд, однако значительная часть первичных рудокластов замещена псевдоморфным халькопиритом (Chp-2). Сульфидные обломки, кристаллы и агрегаты позднего пирита сцементированы мелкозер-

нистым халькопиритом (Chp-3). В прослоях хлорит-кремнистых слоев встречаются округлые и сложенно-угловатые конкреции халькопирита (Chp-3nod). В некоторых слоях встречаются прожилки позднего халькопирита (Chp-4), подчеркивающие косое, почти согласное, направление микротрещин кливажа.

Псевдоморфный, тонкозернистый халькопирит (Chp-2) замещает рудокласты колломорфного и кристаллически-зернистого пирита (рис. 4, б). В агрегатах псевдоморфного халькопирита отмечены включения самородного золота и теллуридов (колорадоит, гессит, теллуриовисмутит). По результатам ЛА-ИСП-МС анализов в псевдоморфном халькопирите заметны широкие вариации концентраций Mn (0,42–750 г/т), Co (0,001–96,3 г/т), Mo (0,01–171 г/т), Sb (0,09–74,5 г/т), Te (4,0–244 г/т), Ba (0,01–14,6 г/т), Pb (0,6–565 г/т) и Bi (0,53–118 г/т) (табл. 2). Высокие медианные содержания Mn, Co, Ni, Mo, Sb, Te, Ba, Au, Tl, Pb и Bi

отличают данный халькопирит от гидротермальных и других постседиментационных аналогов (табл. 2).

*Цементационный, мелкозернистый халькопирит (Chp-3)* цементирует сульфидные рудокласты и одиночные кристаллы пирита, образует прожилки и выполняет интерстиции в пиритовых агрегатах (рис. 4, в). Цементационный халькопирит относительно равномерно распределен внутри сульфидных турбидитов, однако в некоторых слоях количество халькопирита возрастает к кровле слоев. С прожилками данной разновидности халькопирита ассоциируют включения галенита, самородного золота, колорадоита, гессита, теллуросмугит-раклиджита, вольтскита, петцита и алтаита [25]. По медианным содержаниям ряда элементов (Ti, Zn, Cd, Se, Ag, Sn) цементационный халькопирит близок к псевдоморфной разновидности, а содержания других элементов-примесей на порядок ниже (табл. 2).

*Конкреционный халькопирит (Chp-3nod)* встречается в слоях хлорит-кремнистых алевропелитов, переслаивающихся с пирит-халькопиритовыми турбидитами (рис. 4, з). Конкреции халькопирита размером 0,1–0,2 мм имеют округлую, реже угловатую, форму с неровными, зазубренными краями. Травление халькопирита с помощью раствора «царской водки» выявило крупнозернистое строение конкреций с размерами зерен до 0,1–0,15 мм. Конкреции обычно сложены срастанием 2–3 кристаллов халькопирита, иногда проявляющим сдвойникованное строение. В объеме конкреции халькопирита имеют шаровидную и эллипсоидальную морфологию, усложненную многочисленными мелкими гранями, ступенями, буграми и ямками. В халькопирите конкреций отмечаются включения сфалерита, пирита, кварца, хлорита, а также тесные срастания самородного золота  $\text{Au}_{(0,48-0,79)}\text{Ag}_{(0,2-0,52)}\text{Hg}_{(0-0,02)}$ , петцита, гессита, колорадоита, селенсодержащих алтаита (Se до 1,9 мас. %) и галенита (Se до 2,1 мас. %), пластинок вольтскита и минералов серии теллуросмугит-раклиджит (Pb до 15,4 мас. %). Включения редких минералов тяготеют к центральной части конкреций, где ассоциируют с включениями сфалерита. В краевых частях конкреций нередко можно заметить частичное замещение халькопирита и теллуридов хлоритом.

Проведенное микрогеохимическое картирование конкреций методом ЛА-ИСП-МС не выявило зонального распределения химических элементов и подтвердило их относительно гомогенное строение. Точечный ЛА-ИСП-МС анализ выявил в халькопирите конкреций сильные вариации содержания ряда элементов-примесей (табл. 2): Au (0,002–5200 г/т), Ag (0,06–22000 г/т), Te (0,09–12800 г/т), Bi (0,03–2480 г/т), Pb (0,04–449 г/т), Zn (104–69716 г/т) и Cd (0,4–377 г/т). Аномально высокие средние содержания ряда элементов (Zn, Ag, Te, Au, Pb, Bi) вызваны ураганными концентрациями в некоторых анализах. По медианным содержаниям Mn, As, Co, Ni, Mo, Au, Ag, Sn, Sb и Te халькопирит конкреций наиболее близок к цементационному халькопириту сульфидных турбидитов.

*Прожилковый, крупнозернистый халькопирит (Chp-4)* образует в слоях сульфидных турбидитов субсогласные со слоистостью прожилки и мелкие гнезда (рис. 4, з). В зернах прожилкового халькопирита после

травления в растворе  $\text{HNO}_3+\text{HCl}$  выявляются полисинтетические двойники [25]. Для прожилкового халькопирита не характерны включения самородного золота и теллуридов и свойственны пониженные концентрации химических элементов относительно прочих разновидностей халькопирита. Медианные содержания большинства элементов-примесей в прожилковом халькопирите ниже, чем в других новообразованных разновидностях халькопирита (табл. 2). В сравнении с гидротермальными аналогами прожилковый халькопирит наиболее близок к халькопирит-пирит-сфалеритовым палеокурильщикам, но при этом обеднен примесями Mo (0,01–0,85 г/т), Au (0,03–0,14 г/т), Ag (0,61–2,7 г/т) и Sn (2,7–3,4 г/т).

Сравнительный анализ распределения элементов-примесей в халькопирите

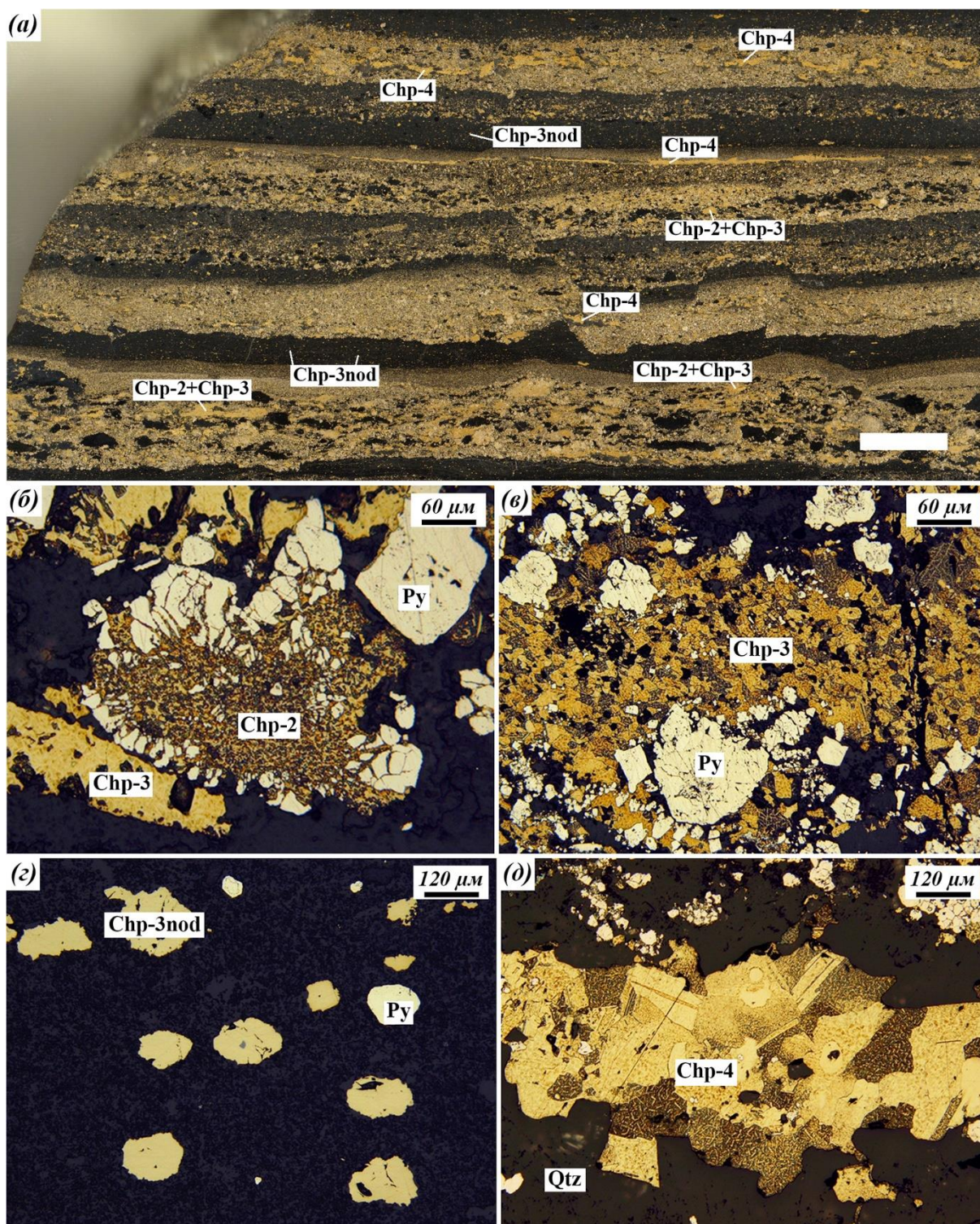
На диаграммах «box&whiskers» (рис. 5) отражена статистическая информация по содержаниям элементов-примесей в гидротермальных и постседиментационных разновидностях халькопирита руд Юбилейного месторождения.

*Mn, Co, Ni, As и Tl.* Гидротермальный халькопирит отличается от постседиментационных разновидностей относительно невысокими содержаниями Mn, Co, Ni, As и Tl (рис. 5, а–з, е). По положению медианных значений заметно некоторое снижение содержания Co и As в ряду постседиментационных разновидностей халькопирита и понижение концентраций Tl в ряду гидротермального халькопирита от пирит-халькопиритовых к существенно сфалеритовым трубам. Значительная часть анализов конкреций по содержаниям Mn, Co, Ni, As и Tl попадает в область значений цементационного халькопирита и превосходит обедненный элементами-примесями халькопирит прожилков.

*Sb.* В рядах как гидротермальных труб (от пирит-халькопиритовых к существенно сфалеритовым трубам), так и постседиментационных разновидностей халькопирита наблюдается снижение медианных содержаний Sb (рис. 5, д). Исключением выступает халькопирит прожилков, концентрации Sb в котором выше, чем в конкрециях. Единичные аномально высокие значения Sb наблюдаются для всех разновидностей халькопирита.

*Mo.* Как для гидротермальных, так и для постседиментационных разновидностей халькопирита характерны близкие содержания Mo (рис. 5, ж). Концентрации Mo отличаются в конкрециях халькопирита различных слоев. Высокие значения Mo в одном из слоев (0,1–11,5 г/т) выглядят как аномальные выбросы на выборке относительно другого слоя с низкими содержаниями (0,01–0,08 г/т).

*Sn.* Элементом, разграничивающим постседиментационные и гидротермальные разновидности халькопирита, выступает Sn (рис. 5, з). Характерной чертой постседиментационного халькопирита является в несколько раз меньшие содержания олова по сравнению с гидротермальным халькопиритом. Медианные содержания Sn в конкреционном халькопирите, тем не менее, несколько превосходят халькопирит сульфидных турбидитов.



**Рис. 4.** Халькопирит сульфидных турбидитов: а) пирит-халькопиритовый турбидит с агрегатами псевдоморфного и цементационного халькопирита (Chp-2+Chp-3), конкрециями (Chp-3nod), а также халькопиритовыми прожилками (Chp-4); б) псевдоморфоза халькопирита-2 (Chp-2) по агрегату пирита (Py) в сростании с цементационным халькопиритом-3 (Chp-3); в) агрегат цементационного халькопирита-3 (Chp-3); г) округлые и сглаженно-угловатые конкреции халькопирита (Chp-3nod) в ассоциации с кристаллами пирита (Py); д) прожилки халькопирита-4 (Chp-4) в сростании с кварцем (Qtz). Фото: а) полированный образец, б–г) отраженный свет, б–г) протравлено в  $\text{HNO}_3 + \text{HCl}$

**Fig. 4.** Chalcopyrite of sulfide turbidites: а) chalcopyrite-pyrite turbidite with pseudomorphic and cementation chalcopyrite (Chp-2+Chp-3), nodules (Chp-3nod), and chalcopyrite veins (Chp-4); б) aggregate of chalcopyrite-2 (Chp-2) after pyrite aggregate (Py) with cementation chalcopyrite-3 (Chp-3); в) aggregate of cementation chalcopyrite-3 (Chp-3); г) rounded and angular nodules of chalcopyrite (Chp-3nod) with pyrite crystals (Py); д) veins of chalcopyrite-4 (Chp-4) with quartz (Qtz). Photo: а) polished sample, б–г) reflected light, б–г) etched in  $\text{HNO}_3 + \text{HCl}$

**Таблица 2.** Химический состав (g/t) псевдоморфного (chp-2), цементационного (chp-3), конкреционного (chp-3nod) и прожилкового (chp-4) халькопирита сульфидных турбидитов и хлорит-кремнистых пород

**Table 2.** Chemical composition (g/t) of pseudomorph (chp-2), interstitial (chp-3), nodule (chp-3nod) and veinlet (chp-4) chalcopyrite of sulfide turbidites and chlorite-siliceous rocks according to LA-ICP-MS

Параметры Parameter	Тип Type	Ti	V	Cr	Mn	Co	Ni	Zn	As	Se	Mo
среднее average	chp-2	8,3	4,9	0,85	156	16,1	4,3	197,6	132	192	25,4
	chp-3	6,1	3,4	0,68	63,4	12,6	6,3	1178	69,5	212	10,5
	chp-3nod	1,95	1,1	1,1	8,4	1,4	0,5	2889	7,2	184	0,5
	chp-4	0,68	0,11	0,85	0,32	0,03	0,04	185	0,77	159	0,11
δ	chp-2	7,1	5,9	0,67	172	22,3	5,14	166	165	44,5	39,3
	chp-3	5,1	11,5	0,82	180	24,5	15,9	6552	129	92,3	28,0
	chp-3nod	5,24	3,0	1,1	28,5	6,7	1,5	11010	30,7	77,8	1,9
	chp-4	0,61	0,19	0,78	0,51	0,02	0,03	73,4	0,73	38,6	0,27
макс max	chp-2	34,8	27,0	2,2	750	96,3	16,9	791	621	284	171
	chp-3	23,2	79,1	3,2	970	116	99,6	46978	508	637	123
	chp-3nod	34,1	17,1	4,1	180	42,3	8,8	69715	195	408	11
	chp-4	1,5	0,57	1,9	1,6	0,07	0,12	379	1,9	242	0,85
мин min	chp-2	0,54	0,01	0,05	0,42	0,001	0,02	61,5	0,20	64,0	0,01
	chp-3	0,04	0,01	0,01	0,04	0,001	0,01	62,3	0,07	91,0	0,01
	chp-3nod	0,15	0,02	0,001	0,001	0,001	0,005	104	0,05	68	0,01
	chp-4	0,04	0,001	0,15	0,02	0,01	0,02	147	0,02	104	0,01
медиана md	chp-2	7,0	3,1	0,63	83,1	6,0	2,1	116	70	193	6,0
	chp-3	6,2	0,22	0,32	1,4	0,37	0,13	115	2,8	193	0,03
	chp-3nod	1,0	0,14	0,8	1,2	0,04	0,17	198	1,5	171	0,01
	chp-4	0,78	0,01	0,39	0,12	0,02	0,02	164	0,90	156	0,02
среднее average		Ag	Cd	Sn	Sb	Te	Ba	Au	Tl	Pb	Bi
	chp-2	12,6	2,2	4,2	21,1	44,6	1,8	1,5	2,5	184	47,7
	chp-3	31,4	8,7	4,0	6,5	247	0,32	0,86	0,91	60,4	247
	chp-3nod	2058	22,6	4,5	3,3	1349	0,25	266,7	0,1	52,8	88,3
chp-4	1,4	1,3	3,1	2,1	3,8	0,04	0,07	0,01	8,8	3,4	
δ	chp-2	10,4	1,6	0,93	18,1	51,1	3,4	1,2	2,9	145	32,4
	chp-3	152	46,5	0,73	7,7	1577	0,67	1,3	2,5	77,2	1638
	chp-3nod	5354	62,8	1,0	8,1	3333	0,46	920,7	0,4	109,1	401,7
	chp-4	0,6	0,87	0,23	0,63	3,23	0,02	0,03	0,01	3,9	2,7
макс max	chp-2	41,6	5,5	7,6	74,5	244	14,6	3,9	9,8	565	118
	chp-3	1078	334	7,6	33,5	11279	3,08	5,4	13,7	337	11712
	chp-3nod	22000	377	7,9	38,2	12850	2,68	5200	2,6	449	2480
	chp-4	2,7	2,9	3,4	3,4	11,5	0,08	0,14	0,02	18,0	103
мин min	chp-2	1,3	0,09	2,5	0,09	4,0	0,01	0,04	0,001	0,56	0,53
	chp-3	0,08	0,01	2,8	0,08	0,96	0,01	0,01	0,001	0,15	0,08
	chp-3nod	0,06	0,37	2,9	0,01	0,09	0,001	0,002	0,002	0,04	0,03
	chp-4	0,61	0,37	2,7	1,2	0,62	0,02	0,03	0,001	4,1	1,2
медиана md	chp-2	9,5	1,7	4,0	18,5	27,2	0,73	1,1	1,1	174	42,8
	chp-3	2,6	0,83	3,9	4,3	9,20	0,02	0,29	0,02	31,7	9,9
	chp-3nod	2,5	5,1	4,6	0,34	5,3	0,02	0,25	0,019	2,42	0,8
	chp-4	1,3	0,96	3,1	1,9	3,26	0,04	0,07	0,001	8,1	2,8

Примечание: количество проб для chp-2 N=23, для chp-3 N=51, для chp-3nod N=41, для chp-4 N=9. Приведены средние, максимальные, минимальные и медианные содержания (g/t). δ – стандартное отклонение.

Note. Number of analyses for chp-2 N=23, for chp-3 N=51, for chp-3nod N=41, for chp-4 N=9. Average – average, max – maximum and min – minimum contents (g/t). δ – standard deviation, md – median value.

Se. Содержания Se слабо варьируют в постседиментационных разновидностях халькопирита (рис. 5, и). Напротив, контрастная картина распределения примеси Se наблюдается в гидротермальном халькопирите труб различного состава. По содержаниям Se постседиментационный халькопирит занимает промежуточное положение между пирит-халькопиритовыми и сфалерит-пирит-халькопиритовыми разновидностями труб.

Au, Ag. Несмотря на существенные отличия в средних содержаниях примесей Au и Ag в разновидностях халькопирита, медианные значения варьируют в них незначительно (рис. 5, к, л). На диаграммах за-

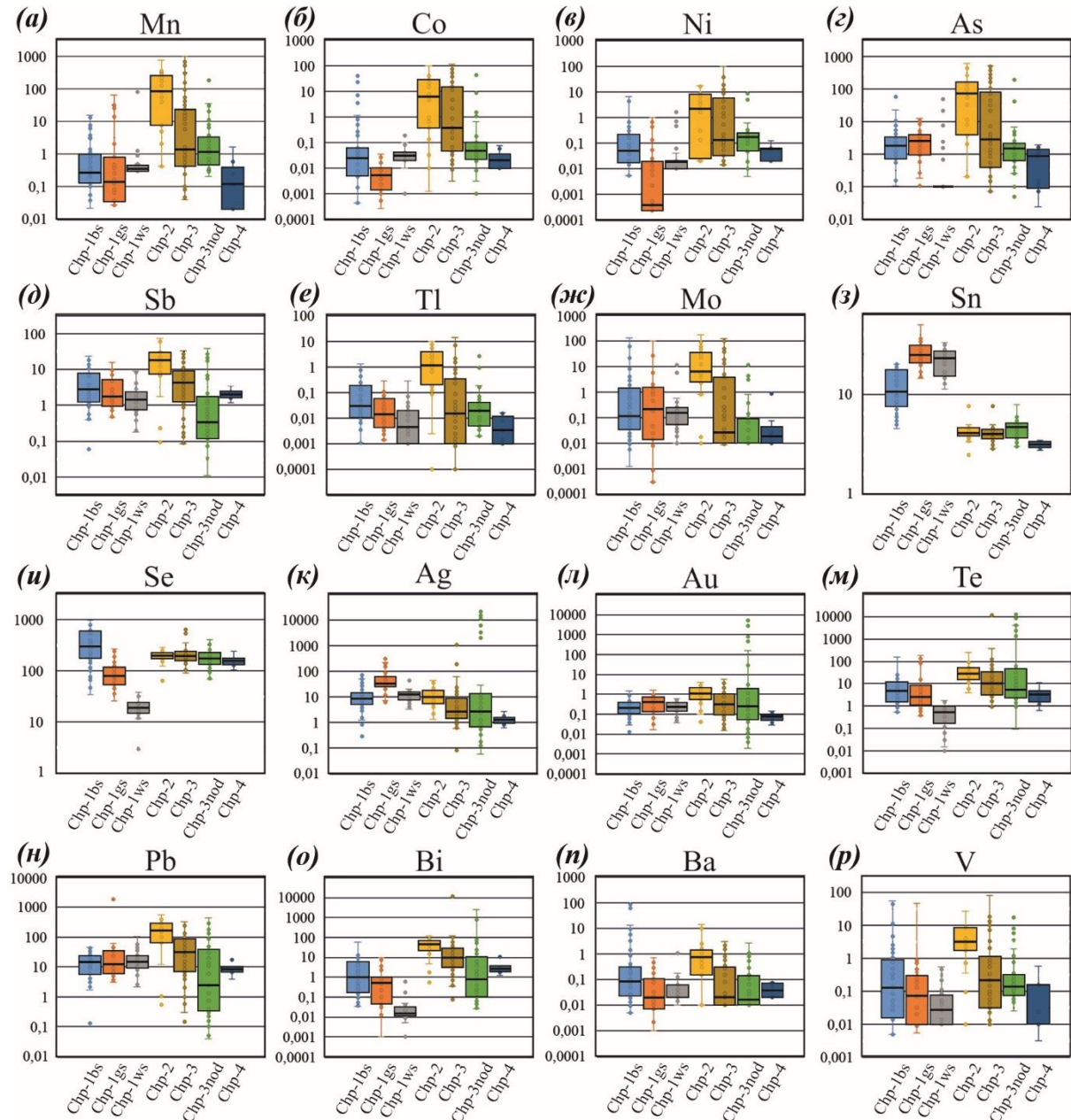
метно некоторое понижение концентраций примесей Au и Ag в ряду от псевдоморфного к цементационным, конкреционным и прожилковым разновидностям халькопирита.

Te. На диаграмме концентраций Te (рис. 5, м) заметно снижение содержаний в рядах гидротермальных и постседиментационных разновидностей халькопирита. Наиболее контрастная картина наблюдается на примере халькопирита палеокурильщико-пирит-сфалеритовых труб на порядок ниже, чем в пирит-халькопиритовых и сфалерит-пирит-халькопиритовых труб.



*Pb*. Распределение содержаний *Pb* в халькопирите крайне неравномерное с единичными выбросами содержаний *Pb* выше квартиля 75 % во всех разновидностях халькопирита (рис. 5, *н*). По медианным концентрациям *Pb* постседиментационные разновидности

халькопирита заметно различаются. В меньшей степени это свойственно для гидротермального халькопирита, в котором отмечаются довольно близкие медианные содержания свинца.



**Рис. 5.** Распределение элементов-примесей в разновидностях халькопирита Юбилейного месторождения. Окрашенные прямоугольники ограничены по вертикали 25 и 75 % квантилями, горизонтальная линия в прямоугольниках – значения медианы. Вертикальные линии характеризуют минимальные и максимальные значения. Круглые точки за пределами вертикальных линий – аномальные выбросы. Ряд гидротермального халькопирита труб палеокурильщиков: Chp-1bs – пирит-халькопиритового → Chp-1gs – сфалерит-пирит-халькопиритового → Chp-1ws – халькопирит-пирит-сфалеритового состава. Ряд постседиментационных разновидностей халькопирита: Chp-2 – псевдоморфный → Chp-3 – цементационный → Chp-3nod – конкреционный → Chp-4 – прожилковый

**Fig. 5.** Distribution of chemical elements in various types of chalcopyrite. The colored rectangles limited by 25 and 75 % quantiles, the horizontal line in rectangles – median value. Vertical lines mark minimum and maximum values. Round point – abnormal values. The range of hydrothermal chalcopyrite of paleosmokers: Chp-1bs – chalcopyrite-pyrite → Chp-1gs – sphalerite-pyrite-chalcopyrite → Chp-1ws – sphalerite-pyrite-chalcopyrite composition. The range of post-sedimentary chalcopyrite: Chp-2 – pseudomorphic → Chp-3 – interstitial → Chp-3nod – nodule → Chp-4 – veinlet

*Вi*. Снижение медианных содержаний *Вi* отмечается в рядах гидротермальных и постседиментационных разновидностей халькопирита (рис. 5, *о*). Следует отметить, что *Вi* в новообразованном халькопирите сульфидных турбидитов несколько выше, чем в халькопирите сульфидных труб. В конкреционном халькопирите содержания *Вi* ниже, чем в цементационном, соответствующем халькопириту пирит-халькопиритовых труб.

*Ва*. Содержания *Ва* низкие (до 2,7 г/т), и его распределение крайне неоднородное во всех разновидностях халькопирита (рис. 5, *п*).

*У*. Медианные содержания ванадия снижаются в рядах как гидротермальных, так и постседиментационных разновидностей халькопирита (рис. 5, *р*).

#### Минерально-геохимические ассоциации халькопирита

Методом максимального корреляционного пути [28] для каждого типа халькопирита были рассчитаны минералого-геохимические ассоциации (табл. 3). В ассоциациях химических элементов в изученных разновидностях халькопирита наблюдаются как отличия, так и общие для всех особенности. Так, например, присутствует устойчивая связь *As+Co*, в которую иногда входят *Ni*, *Mn*, *Вi*, *Au* и *Tl*, отражающая присутствие включений пирита в халькопирите. Данная ассоциация отсутствует в прожилковом халькопирите (*chp-4*), в котором *Co* связан с *Mo*, а не с *As*. В группу, связанную с включениями сфалерита, помимо сильной связи (*Zn+Cd*) в некоторых случаях входят литогенные компоненты (*Cd+Zn+V+Ti* в псевдоморфном) и элементы теллуридов висмута и серебра (*Zn+Cd+Te+Bi+Ag* в цементационном). Для прожилкового халькопирита (*chp-4*) не характерна ассоциация *Zn+Cd*, по-видимому, благодаря незначительному количеству включений сфалерита. В гидротермальном халькопирите в сфалеритовую ассоциацию (*Zn+Cd*) входят *Pb* в сфалерит-пирит-халькопиритовых (*chp-1gs*) и *Tl* в халькопирит-пирит-сфалеритовых (*chp-1ws*) палеокурильщиках.

Особый интерес представляет изменение связей элементов, связанных с включениями редких минералов в разновидностях халькопирита. В гидротермальном халькопирите только для пирит-халькопиритовых труб (*chp-1bs*) наблюдается устойчивая (*Au+Te+Bi+Se*) ассоциация, отражающая присутствие самородного золота и теллуридов висмута. (*Te+Ag+Se+Sn*) ассоциация элементов выявлена для халькопирита сфалерит-пирит-халькопиритовых (*chp-1gs*) труб, (*Ag+Pb+Sb+Mo+Te+Se*) ассоциация – для халькопирит-пирит-сфалеритовых (*chp-1ws*) труб и связана с включениями гессита, галенита и, вероятно, минералов блеклых руд. Для цементационного халькопирита (*chp-3*) сульфидных турбидитов характерна связь теллуридов с включениями сфалерита (*Zn+Cd+Te+Bi+Ag*), а в псевдоморфном халькопирите (*chp-2*) заметны ассоциации самородного золота с пиритом (*As+Co+Ni+Tl+Au*), *Вi* с *Ag* и сложно интерпретируемая ассоциация *Te* с *Ва*. Особые ассоциации характерны для прожилкового халькопирита (*chp-4*), в котором связи, характерные для других разновидностей халькопирита, нарушаются и присут-

ствуют такие сложно интерпретируемые группы, как *Au+Ba*, *Se+Mn+V* и *Co+Mo*.

В халькопирите конкреций (*chp-3nod*) установлены несколько ассоциаций элементов, отличающиеся от наблюдаемых в группе других разновидностей постседиментационного халькопирита. Здесь геохимическая (*As+Co+Mn+Tl*) ассоциация (табл. 3) связана с элементами изоморфно входящих в состав включений пирита. Вторая *Sb+Zn+Cd* ассоциация объединяет элементы-примеси, характерные для сфалерита. Третья *Pb+Bi+Se* группа элементов отражает присутствие включений селенсодержащего галенита и, вероятно, алтаита. Четвертая *Te+Ag+Au* ассоциация объясняется присутствием сростаний теллуридов с самородным золотом. Часть элементов (*Sn*, *Mo*, *Ва*, *Ti*) находятся в самом конце корреляционного ряда и имеют слабые незначимые связи с другими элементами. Общей для конкреционного и гидротермального халькопирита пирит-халькопиритовых труб (*chp-1bs*) выступает связь *Bi+Se*, которая отлична в прочих разновидностях халькопирита и объединяет *Se* с другими элементами, такими как *Sn*, *Ag*, *Te*, *Mn* и *V*. Так же как и в других новообразованных и гидротермальных разновидностях халькопирита, в конкрециях отмечается устойчивая ассоциация химических элементов, связанная с включениями пирита (*As+Co+Mn+Tl*).

#### Обсуждение результатов

Выделенные разновидности халькопирита в рудах Юбилейного месторождения значительно отличаются по текстурно-структурным и геохимическим характеристикам, что отражают разные стадии формирования колчеданных руд и специфические условия литогенеза сульфидных отложений.

Гидротермальный халькопирит сульфидных труб формировался в высокотемпературных (до 350–400 °С) условиях, сопоставимых с температурами образования современных черных курильщиков [12 и ссылки внутри]. Моделям роста труб курильщиков посвящено значительное количество публикаций, где показано отложение халькопирита из концентрированных и высокотемпературных гидротермальных растворов [12, 29–32]. В трубах палеокурильщиков Юбилейного месторождения центростремительный рост кристаллов халькопиритовой стенки был сопряжен с обрастанием внешней и внутренней ее части колломорфным пиритом, сфалеритом, халькопиритом, марказитом, галенитом и блеклыми рудами. По мере увеличения в гидротермальных трубах относительно количества сфалерита наблюдается смена копьевидных крупнозернистых агрегатов халькопирита на графические и эпитаксиальные сростки халькопирита и сфалерита (рис. 3).

Высококонтрастным методом ЛА-ИСП-МС зафиксировано контрастное распределение элементов-примесей в гидротермальном халькопирите труб различного минерального состава. Медианные значения содержаний элементов высокотемпературной (*Se*, *Bi*), среднетемпературной (*Te*, *Pb*, *Sb*) и низкотемпературной (*Tl*) ассоциаций в халькопирите понижаются в ряду от пирит-халькопиритовых к халькопирит-

пирит-сфалеритовым палеокурильщикам. Некоторыми среднетемпературными элементами, такими как Sn и Ag, халькопирит сфалеритсодержащих труб, наоборот, обогащен в большей степени по сравнению с пирит-халькопиритовыми трубами. Подобные тренды на снижение концентраций некоторых элементов-примесей в сульфидах по мере увеличения количе-

ства сфалерита отмечаются в гидротермальных трубах многих колчеданных залежей Урала [12]. Халькопирит труб Юбилейного месторождения по сравнению со своими аналогами на других колчеданных залежах Урала обладает сопоставимыми средними концентрациями большинства химических элементов [5].

**Таблица 3.** Ассоциации химических элементов в гидротермальных и постседиментационных разновидностях халькопирита

**Table 3.** Chemical element assemblages in hydrothermal and post-sedimentation types of chalcopyrite

Минерал/Mineral	Ассоциации/Association
Гидротермальный халькопирит (chp-1bs) Hydrothermal chalcopyrite (chp-1bs)	I(Ba+V)+II(Mo+Tl+Sb+Pb)+III(Zn+Cd)-Mn-IV(Au+Te+Bi+Se)-V(Ni+Co+As)-VI(Ag+Sn)
Гидротермальный халькопирит (chp-1gs) Hydrothermal chalcopyrite (chp-1gs)	I(Te+Ag+Se+Sn)-II(Cd+Zn+Pb)-Au-III(Ni+As)+IV(Ba+V)+Co-V(Tl+Mo)+VI(Bi+Sb+Mn)
Гидротермальный халькопирит (chp-1ws) Hydrothermal chalcopyrite (chp-1ws)	I(Bi+Mn+Ni+Co+As)+II(Ag+Pb+Sb+Mo+Te+Se)-Sn-V-Au-III(Zn+Cd+Tl)-Ba
Псевдоморфный халькопирит (chp-2) Pseudomorphic chalcopyrite (chp-2)	I(As+Co+Ni+Tl+Au)+II(Pb+Sb)+III(Bi+Ag)-Mn-Sn-Cr-IV(Cd+Zn+V+Ti)-(Te+Ba)-Mo-Se
Цементационный халькопирит (chp-3) Interstitial chalcopyrite (chp-3)	I(Zn+Cd+Te+Bi+Ag)-II(Au+Pb+Sb)+Mn+Ba+Sn-III(Ti+V+Cr)-IV(As+Co+Ni)-V(Tl+Mo)-Se
Халькопирит конкреций (chp-3nod) Nodular chalcopyrite (chp-3nod)	I(As+Co+Mn+Tl)+V+II(Sb+Zn+Cd)+III(Pb+Bi+Se)+IV(Te+Ag+Au)-Sn-Mo-Ba-Ti
Прожилковый халькопирит (chp-4) Veinlet chalcopyrite (chp-4)	I(Bi+Ag+Sb)+II(Te+Pb)+Zn-Ti-III(Co+Mo)-IV(Au+Ba)-Tl-Ni-Sn-As-V(Se+Mn+V)-Cr-Cd

Постседиментационные разновидности халькопирита развиты в мелкообломочных рудокластических слоях и околорудных сульфидсодержащих осадках в виде слоев, сегрегаций, кайм, прожилков, линз и конкреций. Находки новообразованного халькопирита в рудокластитах являются ярким подтверждением того, что процессы минералообразования продолжаются и после седиментации рудокластических потоков. Предполагается, что одним из ранних проявлений постседиментационных процессов в рудокластитах выступает замещение колломорфных и зернистых агрегатов пирита псевдоморфным халькопиритом. Псевдоморфная разновидность халькопирита наследует от пирита не только микроэлементный состав, но и форму агрегатов, очертания которых повторяют зерна гидротермального пирита (рис. 4, б). Замещение сульфидных рудокластов тонкозернистыми агрегатами халькопирита широко распространено как в рудах древних колчеданных залежей, так и в отложениях современных сульфидных построек, и связывается, как правило, с процессами раннего диагенеза [4, 9, 10, 33]. Сульфидные рудокласты характеризуются различной степенью развития псевдоморфного халькопирита, что может указывать на то, что халькопирит частично заместил пиритовые агрегаты еще до попадания в осадок.

Цементационный халькопирит формирует ткань сульфидных турбидитов, обрастает и образует прожилки в агрегатах пирита и псевдоморфного халькопирита. Видимого замещения цементационным халькопиритом сульфидных рудокластов при этом не зафиксировано. На Юбилейном месторождении относительное количество халькопиритового цемента возрастает в кровле слоев сульфидных турбидитов [25].

Аналоги данной разновидности халькопирита на колчеданных месторождениях Урала могут развиваться по агрегатам сфалерита в стадию позднего диагенеза, а также образуют прожилки, линзы и основную цементирующую массу [4, 10]. Цементационный халькопирит в рудокластитах Юбилейного месторождения, как и других колчеданных залежах Урала, выступает одним из главных концентраторов редкой минерализации, включающей в себя разнообразные теллуриды, селениды, сульфосоли и самородное золото [10].

Постседиментационные процессы преобразования сульфидсодержащих осадков включают в себя образование сульфидных конкреций, широко распространенных в диагенетически преобразованных разновидностях тонко- и мелкообломочных колчеданных руд [9]. В последние годы появились работы по изучению минерального состава и геохимических особенностей конкреций пирита зонального строения в рудоконтролирующих горизонтах колчеданных залежей [34]. В отличие от конкреций пирита, изученные конкреции халькопирита характеризуются меньшим размером, отсутствием зонального строения и характерной шаровидной и эллипсоидной внешней морфологией. Более того, конкреции халькопирита развиты только в хлорит-кремнистых слоях и не формируют сростаний с прочими разновидностями халькопирита, из-за чего затруднительно определить их место в последовательности минералообразования. Тем не менее предполагается, что образование конкреций и цементационного халькопирита было сопряженным и является проявлением одного процесса, но в разных слоях. В пользу данного предположения говорят также их сходные геохимические особенности.

Субгоризонтальные прожилки халькопирита и кварца в сульфидных слоях секут все прочие разновидности халькопирита и развиты, по-видимому, по трещинам кливажа. Считается, что полисинтетические двойники в крупнозернистом прожилковом халькопирите появляются под действием тектонических напряжений [1, 2]. Аналогии подобной динамометаморфической разновидности халькопирита установлены как на неметаморфизованных [4], так и метаморфизованных [35] колчеданных месторождениях Урала.

Для постседиментационных разновидностей халькопирита, даже в большей степени, чем для гидротермальных, характерна контрастная дифференциация содержаний элементов-примесей. По положению медианных содержаний на диаграммах «box&whiskers» заметно снижение концентраций V, Mn, Co, Ni, As, Sb, Te, Au, Tl, Pb и Bi в ряду постседиментационных сульфидов от псевдоморфного к цементационному, конкреционному и прожилковому халькопириту. Подобный тренд на снижение медианных значений концентраций характерен для примесей Sb, Bi и Pb, но только в ограниченном ряду псевдоморфный→цементационный→конкреционный халькопирит. Заметно, что новообразованный халькопирит, по сравнению с гидротермальным, значительно обеднен оловом. В целом концентрации большинства химических элементов в некоторых разновидностях постседиментационного халькопирита сопоставимы или выше, чем в гидротермальных аналогах. Одной из причин подобного обогащения новообразованного халькопирита может являться наследование элементов-примесей из растворяющихся рудокластов [9]. Относительно высокие концентрации Co и Ni в халькопирите сульфидных турбидитов и конкреций могут быть связаны с поступлением этих элементов из базальтовой гиалокластике [9].

Микровключения редких минералов характерны как для гидротермальных, так и для постседиментационных разновидностей халькопирита. В крустификационном халькопирите палеокурильщиков кварц-пирит-халькопиритового и кальцит-сфалерит-пирит-халькопиритового состава встречаются микровключения колорадоита, теллуровисмутита, гессита и штютцита, часто ассоциирующие с зернами самородного золота и электрума [25]. Более разнообразные ассоциации редких минералов обнаружены в постседиментационных разновидностях халькопирита. В псевдоморфном и цементационном халькопирите сульфидных турбидитов определены: самородное золото, колорадоит, гессит, алтаит, петцит, калаверит, штютцит, вольтскит и минералы серии теллуровисмутит-раклиджит [25]. Конкреции халькопирита содержат микровключения самородного золота, гессита, петцита, колорадоита, алтаита, вольтскита и минералов серии теллуровисмутит-раклиджит, часто образующих взаимные сростания. Для прожилкового динамометаморфического халькопирита включения самородного золота и теллуридов не характерны.

Предполагается, что формирование постседиментационных разновидностей халькопирита в процессе

аутигенеза рудокластитов происходило под воздействием нисходящих морских вод без или при незначительном участии гидротермальных флюидов [4, 10, 33]. Наличие гиалокластического материала в сульфидных отложениях Юбилейного месторождения могло играть роль катализатора и способствовало замещению пиритовых рудокластов халькопиритом. По-видимому, именно влияние морской воды, гиалокластике и примеси осадков способствовало установлению в сульфидных осадках субщелочных условий, благоприятных для формирования постседиментационного халькопирита [9]. Образование халькопирита в сульфидных турбидитах относится к процессу аутигенеза и происходило в несколько стадий, в ходе которых в рудообразующем растворе происходило снижение концентрации химических элементов. В целом по степени взаимодействия с морской водой описанные рудокластиты можно отнести к зрелым [9].

### Заключение

В колчеданных рудах Юбилейного месторождения дана минералого-геохимическая характеристика гидротермальной разновидности халькопирита, включающая халькопирит пирит-халькопиритовых (chp-1bs), сфалерит-пирит-халькопиритовых (chp-1gs) и халькопирит-пирит-сфалеритовых (chp1ws) труб палеокурильщиков, и постседиментационной разновидности сульфидных турбидитов, содержащей псевдоморфный (chp-2), цементационный (chp-3), конкреционный (chp-3nod) и прожилковый (chp-4) халькопирит сульфидных турбидитов. Перечисленные разновидности халькопирита составляют ряды, в которых закономерно изменяются минеральные, текстурно-структурные и геохимические характеристики. В гидротермальной группе в ряду от пирит-халькопиритовых к существенно сфалеритовым трубам палеокурильщиков наблюдается смена копьевидных и дендритовидных кристаллов халькопирита на графические агрегаты халькопирита и сфалерита. Текстурно-структурные различия в постседиментационных разновидностях халькопирита связаны с возрастанием крупности зерен и появлением полисинтетических двойников. В ряду гидротермальных разновидностей халькопирита снижаются медианные содержания примесей Sb, Tl, Se, Te, Bi, Pb, а в постседиментационной группе понижаются концентрации Mn, Co, Ni, Mo, As, Tl, Au, Ag, Pb, Bi, Te и V. Сравнительный минералого-геохимический анализ халькопирита различного происхождения применительно к колчеданным залежам Урала проведено впервые.

В разновидностях халькопирита обнаружены микровключения редких минералов, разнообразие и количество находок которых в постседиментационной группе больше, чем в гидротермальной. Исключением выступает прожилковый динамометаморфический халькопирит, для которого микровключения не характерны. Рассчитанные геохимические ассоциации элементов-примесей также отражают наличие в разновидностях халькопирита микровключений самородного золота и теллуридов (Te+Ag+Au), связанных в том числе с включениями сфалерита (Zn+Cd+Te+Bi+Ag) и

пирита (As+Co+Ni+Ti+Au). Устойчивую связь в халькопирите образуют элементы самостоятельных включений пирита (As+Co+Mn+Ti), галенита (Pb+Bi+Se) и силикатов (Mg+V+Ni). Полученные данные демонстрируют широкую вариацию минерально-геохимического состава продуктов сульфидного аутигенеза в рудах колчеданных месторождений.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ярош П.А. Диагенез и метаморфизм колчеданных руд на Урале. – М.: Наука, 1973. – 240 с.
2. Еремин Н.И. Дифференциация вулканогенного сульфидного оруденения. – М.: МГУ, 1983. – 256 с.
3. Масленникова С.П., Масленников В.В. Сульфидные трубы палеозойских «черных курильщиков» (на примере Урала). – Екатеринбург: Миасс: УрО РАН, 2007. – 312 с.
4. Сафина Н.П., Масленников В.В. Рудокластиты колчеданных месторождений Яман-Касы и Сафьяновское (Урал). – Миасс: УрО РАН, 2009. – 260 с.
5. Дифференциация токсичных элементов в условиях литогенеза и техногенеза колчеданных месторождений / В.В. Масленников, И.Ю. Мелекестева, С.П. Масленникова, А.В. Масленникова, Г.А. Третьяков, Н.Р. Аюпова, Н.П. Сафина, К.А. Филиппова, В.Н. Удачин, П.Г. Аминов, А.С. Целуйко. – Екатеринбург: РИО УрО РАН, 2016. – 368 с.
6. Шадлун Т.Н. О некоторых сростаниях сульфидов, характерных для современных океанических и древних колчеданных руд // Геология рудных месторождений. – 1991. – № 4. – С. 110–117.
7. Oudin E., Constantinou G. Black smoker chimney fragments in Cyprus sulphide deposits // Nature. – 1984. – V. 308. – P. 349–353.
8. Скрипченко Н.С. Гидротермально-осадочные сульфидные руды базальтоидных формаций. – М.: Наука, 1972. – 217 с.
9. Масленников В.В. Седиментогенез, гальмиролиз и экология колчеданосных палеогидротермальных полей (на примере Южного Урала). – Миасс: ИМин УрО РАН, 1999. – 348 с.
10. Mineralogical features of ore diagenites in the Urals massive sulfide deposits, Russia / V.V. Maslennikov, N.R. Ayupova, N.P. Safina, A.S. Tseluyko, I.Yu. Melekestseva, R.R. Large, R.J. Herrington, V.A. Kotlyarov, I.A. Blinov, S.P. Maslennikova, S.G. Tessalina // Minerals. – 2019. – V. 3. – P. 150.
11. Butler I.B., Nesbitt R.W. Trace element distributions in the chalcopyrite wall of black smoker chimney: insights from laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry (LA-ICP-MS) // Earth and Planetary Science Letters. – 1999. – V. 167. – P. 335–345.
12. Chimneys in Paleozoic massive sulfide mounds of the Urals VMS deposits: mineral and trace element comparison with modern black, gray and clear smokers / V.V. Maslennikov, S.P. Maslennikova, R.R. Large, L.V. Danyushevsky, R.J. Herrington, N.R. Ayupova, V.V. Zaykov, A.Yu. Lein, A.S. Tseluyko, I.Yu. Melekestseva, S.G. Tessalina // Ore Geology Review. – 2017. – V. 85. – P. 64–106.
13. Distribution and solubility limits of trace elements in hydrothermal black smoker sulfides: an in-situ LA-ICP-MS study / C.C. Wohlgenuth-Ueberwasser, F. Viljoen, S. Petersen, C. Vorster // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 2015. – V. 159. – P. 16–41.
14. George L.L., Cook N.J., Ciobanu C.L. Partitioning of trace elements in co-crystallized sphalerite–galena–chalcopyrite hydrothermal ores // Ore Geology Reviews. – 2016. – V. 77. – P. 97–116.
15. Trace elements in hydrothermal chalcopyrite / L.L. George, N.J. Cook, B.B.P. Crowe, C.L. Ciobanu // Mineralogical Magazine. – 2018. – V. 82. – P. 59–88.
16. A review of Te and Se systematics in hydrothermal pyrite from precious metal deposits: Insights into ore-forming processes / M. Keith, D.J. Smith, G.R.T. Jenkin, D.A. Holwell, M.D. Dey // Ore Geology Reviews. – 2018. – V. 96. – P. 269–282.
17. Trace element systematics of pyrite from submarine hydrothermal vents / M. Keith, F. Häckel, K.M. Haase, U. Schwarz-Schampera, R. Klemm // Ore Geology Reviews. – 2016. – V. 72. – P. 728–745.
18. Trace element systematics and ore-forming processes in mafic VMS deposits: evidence from the Troodos ophiolite, Cyprus / A.J. Martin, M. Keith, I. McDonald, K.M. Haase, K.A. McFall, R. Klemm, C.J. MacLeod // Ore Geology Reviews. – 2019. – V. 106. – P. 205–225.
19. Медноколчеданные месторождения Урала: геологическое строение / под ред. В.А. Прокина, Ф.П. Буслаява, М.И. Исмагилова, А.М. Дымкина, К.С. Иванова, Е.С. Контаря, Б.Д. Магадеева, Б.Е. Милецкого, А.П. Наседкина, В.М. Нечехуина, Б.А. Попова, Б.П. Потапенко, А.К. Рогожникова, И.Б. Серавкина, В.И. Федорова, Р.Г. Язеева, П.Я. Яроша – Свердловск: УрО РАН, 1988. – 241 с.
20. Вариолитовые бониниты бурибайского вулканического комплекса, Южный Урал: Химия минералов / А.М. Косарев, С.А. Светов, С.Ю. Чаженгина, Г.Т. Шафигуллина // Металлогения древних и современных океанов-2016: Материалы науч. конф. – Миасс, 25–29 апреля 2016. – Миасс: ИМин УрО РАН, 2016. – С. 35–38.
21. Косарев А.М., Серавкин И.Б., Холоднов В.В. Геодинамические и петролого-геохимические аспекты зональности Магнитогорской колчеданосной мегазоны на Южном Урале // Литосфера. – 2014. – № 2. – С. 3–25.
22. Бонинитовые вариолиты Бурибайского вулканического комплекса Южного Урала: минералогия, геохимия и условия образования / А.М. Косарев, С.А. Светов, С.Ю. Чаженгина, Г.Т. Шафигуллина // Литосфера. – 2018. – Т. 18. – № 2. – С. 246–279.
23. Серавкин И.Б. Корреляция состава руд и рудовмещающих пород в вулканогенных колчеданных месторождениях (на примере Южного Урала) // Геология рудных месторождений. – 2013. – Т. 55. – № 3. – С. 238–258.
24. Минералогические особенности руд медноколчеданного месторождения Юбилейное (Ю. Урал) / И.В. Викентьев, А.Г. Саенко, Е.В. Карелина, А.И. Ежов, Н.В. Трубкин // Вестник РУДН. Серия «Инженерные исследования». – 2011. – № 1. – С. 84–89.
25. Теллуридная минерализация в обломочных рудах медноколчеданного месторождения Юбилейное (Южный Урал) / А.С. Целуйко, В.В. Масленников, Н.Р. Аюпова, С.П. Масленникова, Л.В. Данюшевский // Геология рудных месторождений. – 2019. – Т. 61. – № 2. – С. 40–71.
26. Routine quantitative multi-element analysis of sulphide minerals by laser ablation ICP-MS: Standard development and consideration of matrix effect / L. Danyushevsky, P. Robinson, S. Gilbert, M. Norman, R., Large P. McGoldrick, M. Shelley // Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis. – 2011. – V. 11. – P. 51–60.
27. Гидротермальный рудоогенез океанского дна / Ю.А. Богданов, А.П. Лисицын, А.М. Сагалевиц, Е.Г. Гурвич. – М.: Наука, 2006. – 527 с.
28. Смирнов В.И. Корреляционные методы при парагенетическом анализе. – М.: Недра, 1981. – 174 с.
29. Naymon R.M. Growth history of hydrothermal black smoker // Nature. – 1983. – V. 301. – P. 695–698.
30. Janecky D.R., Seyfried W.F. Jr. Formation of massive sulfide deposits on oceanic ridge crasts: incremental reaction models for mixing between hydrothermal solutions and sea water // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 1984. – V. 48. – P. 2723–2738.
31. Graham U.M., Bluth G.J., Ohmoto H. Sulfidesulfate chimneys on the East Pacific Rise, 11° and 13° N latitude. Part 1: Mineralogy and paragenesis // Canadian Mineralogist. – 1988. – V. 26. – P. 487–504.
32. Tivey M.K. The influence of hydrothermal fluid composition and advection rates on black smoker chimney mineralogy: Insights from modeling transport and reaction // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 1995. – V. 59. – P. 1933–1949.

33. Девонские рудокластические турбидиты на примере медно-колчеданного месторождения «Молодежное» (Южный Урал) / В.Ю. Русаков, Б.Н. Рыженко, И.А. Рощина, Н.Н. Кононкова, В.С. Карпухина // *Геохимия*. – 2015. – № 7. – С. 624–650.
34. Genna D., Gaboury D. Deciphering the hydrothermal evolution of a VMS system by LA-ICP-MS using trace elements in pyrite: an example from the Bracemac-McLeod deposits, Aditibi, Canada, and implication for exploration // *Economic Geology*. – 2015. – V. 110. – P. 2087–2108.
35. Metamorphism of volcanogenic massive sulphide deposits in the Urals / I.V. Vikentyev, E.V. Belogub, K.A. Novoselov, V.P. Moloshag // *Ore Geology Reviews*. – 2017. – V. 85. – P. 30–63.

Поступила 03.06.2020 г.

#### Информация об авторах

**Целуйко А.С.**, младший научный сотрудник лаборатории минералогии рудогенеза Института минералогии Южно-Уральского федерального научного центра минералогии и геоэкологии УрО РАН.

**Масленников В.В.**, доктор геолого-минералогических наук, профессор, член-корреспондент, главный научный сотрудник лаборатории минералогии рудогенеза Института минералогии Южно-Уральского федерального научного центра минералогии и геоэкологии УрО РАН.

**Аюпова Н.Р.**, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории минералогии рудогенеза Института минералогии Южно-Уральского федерального научного центра минералогии и геоэкологии УрО РАН.

**Масленникова С.П.**, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории минералогии рудогенеза Института минералогии Южно-Уральского федерального научного центра минералогии и геоэкологии УрО РАН.

**Артемьев Д.А.**, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник лаборатории минералогии рудогенеза Института минералогии Южно-Уральского федерального научного центра минералогии и геоэкологии УрО РАН.

**Блинов И.А.**, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник лаборатории минералогии рудогенеза Института минералогии Южно-Уральского федерального научного центра минералогии и геоэкологии УрО РАН.

UDC 553.435

## MINERALOGICAL AND GEOCHEMICAL FEATURES OF CHALCOPYRITE FROM THE YUBILEYNOE MASSIVE SULFIDE DEPOSIT (SOUTH URALS): LA-ICP-MS DATA

**Aleksandr S. Tseluyko<sup>1</sup>,**  
celyukoa@rambler.ru

**Valeriy V. Maslennikov<sup>1</sup>,**  
mas@mineralogy.ru

**Nuriya R. Ayupova<sup>1</sup>,**  
aupova@mineralogy.ru

**Svetlana P. Maslennikova<sup>1</sup>,**  
svmas@mineralogy.ru

**Dmitry A. Artemyev<sup>1</sup>,**  
artemyev@mineralogy.ru

**Ivan A. Blinov<sup>1</sup>,**  
Ivan\_a\_blinov@mail.ru

<sup>1</sup> South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geocology of UB RAS,  
territory of the Ilmeny State Reserve, Miass, 456317, Russia.

**Relevance.** The LA-ICP-MS analysis of sulfides is one of the promising directions in study of ore deposits. The understanding of mineralogical-geochemical evolution of sulfides allows interpretation of differentiation of components at stages of hydrothermal sedimentogenesis and further lithogenesis of massive sulfide deposits. This work is important for development of models of sulfide authigenesis.

**The main aim** of the research is to compare mineralogical-geochemical features of chalcopyrite types to identify the evolution of sulfide ores from the Yubileynoe massive sulfide deposit (South Urals).

**Methods.** The morphogenetic types of chalcopyrite were identified using ore-facial mapping in the open pit of the deposit. The mineralogical features of ores were studied under an Olympus BX51 optical microscope. The chemical composition of minerals was analyzed on a Tescan Vega 3 SBU scanning electron microscope equipped with an Oxford Instruments X-act energy dispersive analyzer. The trace element contents of chalcopyrite were determined using LA-ICP-MS on an Agilent 7700x mass spectrometer equipped with a New Wave Research UP-213 laser ablation device at the SU FRC MG UB RAS and University of Tasmania (Hobart, Australia).

**Results.** Chalcopyrite was subdivided into two genetic types: hydrothermal and post-sedimentary. The hydrothermal type includes subhedral chalcopyrite from chalcopyrite-pyrite, chalcopyrite-pyrite-sphalerite, and sphalerite-pyrite-chalcopyrite smoker chimneys. The post-sedimentary type of pseudomorphic, interstitial, nodular, and veinlet (dynamometamorphic) chalcopyrite is typical of clastic ore. Each chalcopyrite type is characterized by various mineral assemblages and trace element contents, reflecting different formation conditions. The morphology of chalcopyrite changes from spear-like and dendritic crystals to graphic and epitaxial intergrowths of chalcopyrite and sphalerite in a range from chalcopyrite-pyrite to mostly sphalerite smoker chimneys. The median contents of high-temperature (Se, Bi), medium-temperature (Te, Sb) and low-temperature (Tl) trace elements of hydrothermal chalcopyrite decrease in this range. The post-sedimentary chalcopyrite has the lower Sn contents and exhibits minor variations in Se contents. The median Mn, Co, Ni, Mo, As, Tl, Au, Ag, Bi, and Te contents decrease in a consecutive range of post-sedimentary chalcopyrite: pseudomorphic→interstitial→nodular→veinlet.

### Key words:

Chalcopyrite, authigenesis, LA-ICP-MS, smoker chimneys, sulfide turbidites, sulfide nodules, massive sulfide deposits, South Urals.

The research was financially supported by State Contract of the Institute of Mineralogy UB RAS project no. AAAAA-016-116021010244-0 and RFBR grant no. 18-45-700019.

### REFERENCES

1. Yarosh P.Ya. *Diagenез i metamorfizm kolchedannykh rud na Urale* [Diagenesis and metamorphism of massive sulfide ores in the Urals]. Moscow, Nauka Publ., 1973. 240 p.
2. Eremin N.I. *Differentsiatsiya vulkanogenogo sulfidnogo orudneniya* [Differentiation of volcanogenic massive sulfide mineralization]. Moscow, MSU Publ., 1983. 256 p.
3. Maslennikova S.P., Maslennikov V.V. *Sulfidnye trubyy paleozoysskikh «chernykh kurilshchikov» (na primere Urala)* [Paleozoic «black smoker» sulfide chimneys]. Yekaterinburg; Miass, UB RAS Publ., 2007. 312 p.
4. Safina N.P., Maslennikov V.V. *Rudoklastity kolchedannykh mestorozhdeniy Yaman-Kasy i Safyanovskoe (Ural)* [Ore clastites of the Yaman-Kasy and Saphyanovka VMS deposits (Ural)]. Miass, UB RAS Publ., 2008. 260 p.
5. Maslennikov V.V., Melekestseva I.Yu., Maslennikova S.P., Maslennikova A.V., Tretyakov G.A., Ayupova N.R., Safina N.P., Filippova K.A., Udachin V.N., Aminov P.G., Tseluyko A.S. *Differentsiatsiya toksichnykh elementov v usloviyakh litogeneza i tekhnogeneza kolchedannykh mestorozhdeniy* [Differentiation of toxic elements during lithogenesis and technogenesis of massive sulfide deposits]. Yekaterinburg, RIO UB RAS Publ., 2016. 368 p.
6. Shadlun T.N. Some intergrowths of sulfides in modern and ancient massive sulfide ores. *Geology of Ore Deposits*, 1991, vol. 33, pp. 110–118.
7. Oudin E., Constantinou G. Black smoker chimney fragments in Cyprus sulphide deposits. *Nature*, 1984, vol. 308, pp. 349–353.

8. Skripchenko N.S. *Gidrotermalno-osadochnye sulfidnye rudy bazaltoidnykh formatsiy* [Hydrothermal-sedimentary sulfide ores of basalt-like formations]. Moscow, Nauka Publ., 1972. 217 p.
9. Maslennikov V.V. *Sedimentogenez, galmiroliz i ekologiya kolchedanonosnykh paleogidrotermalnykh poley (na primere Yuzhnogo Urala)* [Sedimentogenesis, halmyrolysis and ecology of massive sulfide paleohydrothermal fields]. Miass, Geotur Publ., 1999. 348 p.
10. Maslennikov V.V., Ayupova N.R., Safina N.P., Tseluyko A.S., Melekestseva I.Yu., Large R.R., Herrington R.J., Kotlyarov V.A., Blinov I.A., Maslennikova S.P., Tossalina S.G. Mineralogical features of ore diagenesis in the Urals massive sulfide deposits, Russia. *Minerals*, 2019, vol. 3, pp. 150.
11. Butler I.B., Nesbitt R.W. Trace element distributions in the chalcopyrite wall of black smoker chimney: insights from laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry (LA-ICP-MS). *Earth and Planetary Science Letters*, 1999, vol. 167, pp. 335–345.
12. Maslennikov V.V., Maslennikova S.P., Large R.R., Danyushevsky L.V., Herrington R.J., Ayupova N.R., Zaykov V.V., Lein A.Yu., Tseluyko A.S., Melekestseva I.Yu., Tossalina S.G. Chimneys in Paleozoic massive sulfide mounds of the Urals VMS deposits: mineral and trace element comparison with modern black, gray and clear smokers. *Ore Geology Review*, 2017, vol. 85, pp. 64–106.
13. Wohlgenuth-Ueberwasser C.C., Viljoen F., Petersen S., Vorster C. Distribution and solubility limits of trace elements in hydrothermal black smoker sulfides: an in-situ LA-ICP-MS study. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2015, vol. 159, pp. 16–41.
14. George L.L., Cook N.J., Ciobanu C.L. Partitioning of trace elements in co-crystallized sphalerite-galena-chalcopyrite hydrothermal ores. *Ore Geology Reviews*, 2016, vol. 77, pp. 97–116.
15. George L.L., Cook N.J., Crowe B.B.P., Ciobanu C.L. Trace elements in hydrothermal chalcopyrite. *Mineralogical Magazine*, 2018, vol. 82, pp. 59–88.
16. Keith M., Smith D.J., Jenkin G.R.T., Holwell D.A., Dey M.D. A review of Te and Se systematics in hydrothermal pyrite from precious metal deposits: Insights into ore-forming processes. *Ore Geology Reviews*, 2018, vol. 96, pp. 269–282.
17. Keith M., Häckel F., Haase K.M., Schwarz-Schampera U., Klemd R., Trace element systematics of pyrite from submarine hydrothermal vents. *Ore Geology Reviews*, 2016, vol. 72, pp. 728–745.
18. Martin A.J., Keith M., McDonald I., Haase K.M., McFall K.A., Klemd R., MacLeod C.J. Trace element systematics and ore-forming processes in mafic VMS deposits: evidence from the Troodos ophiolite, Cyprus. *Ore Geology Reviews*, 2019, vol. 106, pp. 205–225.
19. *Mednokolchedanye mestorozhdeniya Urala: geologicheskoe stroenie* [Massive sulfide deposits of the Urals: geological structure]. Eds. V.A. Prokin, F.P. Buslaev, M.I. Ismagilov A.M. Dymkin, K.S. Ivanov, E.S. Kontar, B.D. Magadeev, B.E. Mileckij, A.P. Nasedkin, V.M. Necheuhin, B.A. Popov, B.P. Potapenko, A.K. Rogozhnikov, I.B. Seravkin, V.I. Fedorov, R.G. Yazeev, P.Ya. Yarosh. Sverdlovsk, UB AS USSR Publ., 1988. 241 p.
20. Kosarev A.M., Svetov S.A., Chazhengina S.Yu., Shafigullina G.T. Variolitovye boninity buribayskogo vulkanicheskogo kompleksa, Yuzhny Ural: khimiya mineralov [Variolite boninites of the Buribay volcanic complex, South Urals: mineral chemistry]. *Metallogeneia drevnykh i sovremennykh okeanov-2016* [Metallogeny of ancient and modern oceans-2016]. Miass, IMin UB RAS Publ., 2016. pp. 35–38.
21. Kosarev A.M., Seravkin I.B., Kholodnov V.V. Geodynamic, petrological and geochemical aspects of zoning Magnitogorsk pyrite Megazone in Southern Ural. *Litosfera*, 2014, vol. 2, pp. 3–25. In Rus.
22. Kosarev A.M., Svetov S.A., Chazhengina S.Yu., Shafigullina G.T. Boninitic variolites of the Buribay volcanic complex the Southern Urals: mineralogy, geochemistry and formation conditions. *Litosfera*, 2018, vol. 18, pp. 246–279. In Rus.
23. Seravkin I.B. Correlation between compositions of ores and host rocks in volcanogenic massive sulfide deposits of the Southern Urals. *Geology of Ore Deposits*, 2013, vol. 55, pp. 207–224.
24. Vikentyev I.V., Saenko A.G., Karelina E.V., Ezhov A.I., Trubkin N.V. Mineralogical features of ore of copper-pyritic deposit Yubileinoe (S. Urals). *Vestnik RUDN, seria Inzhenernye issledovaniya*, 2011, no 1, pp. 84–89. In Rus.
25. Tseluyko A.S., Maslennikov V.V., Ayupova N.R., Maslennikova S.P., Danyushevsky L.V. Tellurium-bearing mineralization in clastic ores at the Yubileynoe copper massive sulfide deposit (Southern Urals). *Geology of Ore Deposits*, 2019, vol. 61, pp. 40–71.
26. Danyushevsky L., Robinson P., Gilbert S., Norman M., Large R., McGoldrick P., Shelley M. Routine quantitative multi-element analysis of sulphide minerals by laser ablation ICP-MS: Standard development and consideration of matrix effect. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 2011, vol. 11, pp. 51–60.
27. Bogdanov Yu.A., Lisitsyn A.P., Sagalevich A.M., Gurvich E.G. *Gidrotermalny rudogenez okeanskogo dna* [Hydrothermal ore genesis of the ocean floor]. Moscow, Nauka Publ., 2006. 527 p.
28. Smirnov V.I. *Korrelatsionnye metody pri parageneticheskom analize* [Correlation methods in paragenetic analysis]. Moscow, Nedra Publ., 1981. 174 p.
29. Haymon R.M. Growth history of hydrothermal black smoker. *Nature*, 1983, vol. 301, pp. 695–698.
30. Janecky D.R., Seyfried W.F. Jr. Formation of massive sulfide deposits on oceanic ridge crasts: incremental reaction models for mixing between hydrothermal solutions and sea water. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1984, vol. 48, pp. 2723–2738.
31. Graham U.M., Bluth G.J., Ohmoto H. Sulfidesulfate chimneys on the East Pacific Rise, 11° and 13° N latitude. Part 1: Mineralogy and paragenesis. *Canadian Mineralogist*, 1988, vol. 26, pp. 487–504.
32. Tivey M.K. The influence of hydrothermal fluid composition and advection rates on black smoker chimney mineralogy: insights from modeling transport and reaction. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, vol. 59, pp. 1933–1949.
33. Rusakov V.Y., Ryzhenko B.N., Roshchina I.A., Kononkova N.N., Karpukhina V.S. Devonian ore clastic turbidites of the Molodezhnoe massive copper sulfide deposit, Southern Urals. *Geochemistry International*, 2015, vol. 53, pp. 624–650. In Rus.
34. Genna D., Gaboury D. Deciphering the hydrothermal evolution of a VMS system by LA-ICP-MS using trace elements in pyrite: an example from the Bracemac-McLeod deposits, Aditibi, Canada, and implication for exploration. *Economic Geology*, 2015, vol. 110, pp. 2087–2108.
35. Vikentyev I.V., Belogub E.V., Novoselov K.A., Moloshag V.P. Metamorphism of volcanogenic massive sulphide deposits in the Urals. *Ore Geology Reviews*, 2017, vol. 85, pp. 30–63.

Received: 3 June 2020.

#### Information about the authors

- Aleksandr S. Tseluyko**, junior researcher, South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology of UB RAS.
- Valeriy V. Maslennikov**, Dr. Sc., professor, correspondent member, chief researcher, South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology of UB RAS.
- Nuriya R. Ayupova**, Cand. Sc., leading researcher, South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology of UB RAS.
- Svetlana P. Maslennikova**, Cand. Sc., senior researcher, South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology of UB RAS.
- Dmitry A. Artemyev**, Cand. Sc., researcher, South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology of UB RAS.
- Ivan A. Blinov**, Cand. Sc., researcher, South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology of UB RAS.



УДК 536.24

## ОСОБЕННОСТИ ОПТИМИЗАЦИОННОЙ ЗАДАЧИ НА ПОДБОР МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ МИНИМИЗАЦИИ ПОТЕРИ ТЕПЛА ЧЕРЕЗ ПЛОСКУЮ СТЕНКУ

Сабденов Каныш Оракбаевич<sup>1</sup>,  
sabdenovko@yandex.kz

Ерзада Майра<sup>1</sup>,  
mayira76@yahoo.co.jp

<sup>1</sup> Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева,  
Казахстан, 010008, г. Астана (Нур-Султан), ул. Сатпаева, 2.

**Актуальность.** *Хранение тепла и его эффективное использование связано с подбором материалов для тепловой изоляции стенок. Такие материалы представлены широким спектром теплофизических свойств и стоимости на рынке. Тогда возникает задача оптимизации, ее решение должно обеспечивать наименьшие потери тепла через стенку при ограниченном выборе материалов с заданными коэффициентами теплопроводности. Вместе с тем при решении оптимизационной задачи могут возникнуть сложности в оценке правильности полученных результатов. Поэтому этот вопрос нуждается в детальном обсуждении.*

**Цель:** *математическое моделирование стационарных режимов переноса тепла, формулировка минимаксной задачи о потере тепла через стенку, построение области решения минимаксной задачи, анализ полученных результатов и формулировка выводов.*

**Объект:** *стенка, теплоизоляционные материалы, потоки тепла, условия минимальности, оптимальные решения.*

**Методы:** *решение минимаксной задачи с применением аналитических методов.*

**Результаты.** *Сформулирована простая минимаксная задача: дана двухслойная плоская стенка с произвольными коэффициентами теплопроводности и фиксированными толщинами. На правой и левой границах стенки задана постоянная и различная температура. Также задан максимальный тепловой поток через стенку и область возможных значений коэффициентов теплопроводности (т. е. возможные материалы) для каждого слоя стенки. Требуется из этой области найти коэффициенты теплопроводности, обеспечивающие тепловой поток ниже заданного максимального значения. На этом примере показано, что решение поставленной минимаксной задачи может приводить к неверному результату: можно получить или не весь спектр допустимых решений, или задача может не иметь решения. Это означает необходимость строгого отношения к формулировке и методу решения оптимизационных задач для процессов переноса тепла.*

### Ключевые слова:

*Хранение тепла, стенка, теплоизоляционный материал, минимаксная задача, коэффициенты теплопроводности, потери тепла.*

### Введение

Решение проблемы снижения потока тепла через стенку связано со многими техническими устройствами и технологиями, например,

- с методом хранения тепла и холода в подземных водоносных слоях ATES (Aquifer Thermal Energy Storage) [1–4];
- при использовании геотермальной энергии [5–9];
- при транспорте тепла наземными и подземными трубопроводами [10–14];
- в системах теплозащиты [15–18].

Вопрос подбора теплоизоляционного материала с нужным коэффициентом теплопроводности и его толщины можно решить прямым расчетом тепловой задачи и подбирая нужные параметры [9–10, 14], или формулировкой оптимизационных задач [11, 12]. Оптимизационные задачи в ряде случаев дают удовлетворительные результаты не только при решении тепловых задач [11, 12, 19, 20], но и во многих других приложениях экономики, техники и технологии [21, 22]. Однако минимаксный подход может привести к очень неожиданным результатам, и этому вопросу посвящена настоящая работа.

Для уменьшения потерь тепла через поверхности применяются однослойные и многослойные теплоизоляционные материалы. Чем меньше коэффициент теплопроводности материала и больше толщина теплоизоляционного мате-

риала, тем меньше поток тепла  $j$  через наружные поверхности. При заданном ограничении на свойства материала и его толщину оптимизационная задача решается элементарно просто. Но если поверхность покрывается двумя и более различными материалами, то оптимизационная задача может привести к неожиданным результатам. Ниже это показано на простом примере.

### Формулировка и решение минимаксной задачи

Задача ставится следующим образом: плоская стена составлена из двух разных материалов (1 и 2) с толщинами  $a$  и  $b$ , их коэффициенты теплопроводности обозначены соответственно  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  (рис. 1). С левой стороны стенки поддерживается температура  $T_{in}$ , с правой стороны – температура  $T_{out}$ . Для определенности примем  $T_{in} > T_{out}$ , тогда поток тепла имеет положительный знак. В задаче дан максимальной поток тепла  $j_{max} > 0$ , требуется из заданной области допустимых значений  $\lambda_1 \in [\Lambda_{1,min}; \Lambda_{1,max}] \cup \lambda_2 \in [\Lambda_{2,min}; \Lambda_{2,max}]$  найти все возможные коэффициенты  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ , отвечающие условию  $j \leq j_{max}$ .

Обозначим температуры в первом и втором материале как  $T_1$  и  $T_2$ . В теплотехнике показано [18], что если стационарный процесс переноса тепла в плоской стенке протекает только в одном направлении, то

распределение температуры дается линейными функциями. По рис. 1 перенос происходит только в направлении координаты  $x$ . Поэтому указанные функций следующие:

$$T_1(x) = k_1 x + c_1; \quad T_2(x) = k_2 x + c_2. \quad (1)$$

Здесь  $k_1, c_1, k_2, c_2$  – подлежащие определению неизвестные коэффициенты, они находятся из граничных условий. Опуская простые расчеты с использованием (1), приведем формулу для коэффициента  $k_1$ :

$$k_1 = -\lambda_2 \frac{T_{in} - T_{out}}{\lambda_2 a + \lambda_1 b}. \quad (2)$$

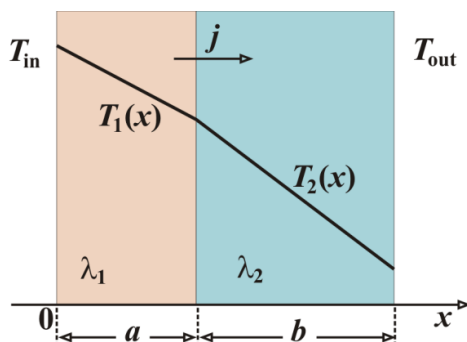


Рис. 1. Схема двуслойной стенки и принятые обозначения  
 Fig. 1. Scheme of the two-layer wall and the accepted notation

По условию задачи необходимо определить, для каких материалов выполняется неравенство  $j \leq j_{max}$ . Чтобы написать его в виде уравнения, возьмем определение

$$j = -\lambda_1 \frac{dT_1}{dx} = -\lambda_1 k_1.$$

Тогда с его использованием условие на тепловой поток можно записать в виде

$$-\lambda_1 k_1 \leq j_{max}.$$

Подставим сюда значение  $k_1$  из формулы (2), тогда получим:

$$\lambda_1 \lambda_2 \frac{T_{in} - T_{out}}{\lambda_2 a + \lambda_1 b} \leq j_{max}.$$

Здесь могут меняться только коэффициенты теплопроводности  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ , остальные параметры фиксированы. Тогда это неравенство можно рассматривать как условие, накладываемое на функцию  $\lambda_1(\lambda_2)$ , после простых преобразований получим следующую форму записи неравенства:

$$\lambda_1 \leq \frac{\lambda_2 a}{\lambda_2 \frac{T_{in} - T_{out}}{j_{max}} - b}. \quad (3)$$

Коэффициент теплопроводности по его физическому смыслу может быть только положительным числом, поэтому должно быть

$$\lambda_2 \frac{T_{in} - T_{out}}{j_{max}} \geq b$$

или

$$\lambda_2 \geq b \frac{j_{max}}{T_{in} - T_{out}}. \quad (4)$$

Это первый важный результат. Следующим шагом найдем асимптоты, если идти по переменной  $\lambda_2$  с верхней стороны:

$$\lambda_2 \rightarrow \frac{j_{max} b}{T_{in} - T_{out}},$$

то коэффициент  $\lambda_1 \rightarrow \infty$ . Таким образом найдена 1-я (вертикальная) асимптота. Вторая асимптота находится устремлением  $\lambda_2 \rightarrow \infty$ , в этом случае

$$\lambda_1 \rightarrow \frac{j_{max} a}{T_{in} - T_{out}}.$$

Это 2-я горизонтальная асимптота. Теперь если использовать неравенство (4) и найденные асимптоты, то на графике можем увидеть фигуру, определяемую условием (3) (рис. 2).

На этом рисунке решение задачи представляется закрашенной областью. График функции  $\lambda_1(\lambda_2)$  построен по формуле

$$\lambda_1 = \frac{\lambda_2 a}{\lambda_2 \frac{T_{in} - T_{out}}{j_{max}} - b}. \quad (5)$$

Чтобы поток тепла был меньше указанного значения  $j_{max}$ , коэффициенты теплопроводности не должны быть меньше приведенных ниже минимальных значений  $\lambda_{1,min}$  и  $\lambda_{2,min}$ . Это неожиданный и удивительный результат, минимальное значение коэффициента теплопроводности для первого материала равно

$$\lambda_{1,min} = \frac{j_{max} a}{T_{in} - T_{out}}.$$

Минимальное значение коэффициента теплопроводности для второго материала равно

$$\lambda_{2,min} = \frac{j_{max} b}{T_{in} - T_{out}}.$$

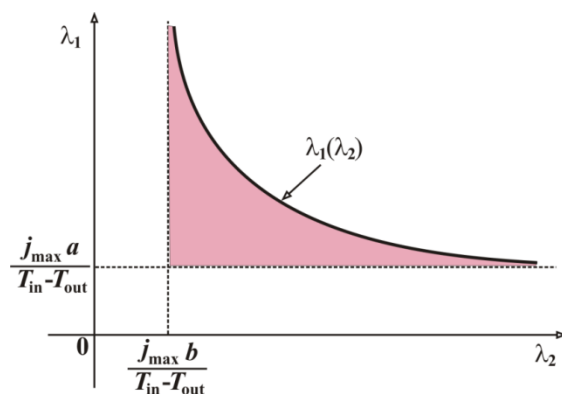


Рис. 2. Качественное представление решения задачи: область, ограничиваемая графиком функции  $\lambda_1(\lambda_2)$  и двумя асимптотами

Fig. 2. Qualitative representation of the solution to the problem: the graph of function  $\lambda_1(\lambda_2)$  and two asymptotes are the boundary of the solution domain

Из полученных результатов следуют два вывода: первый – опирающееся на интуицию широко распространенное мнение, что «для обеспечения минимальности потока тепла всегда должны быть минимальными коэффициенты теплопроводности», не всегда верно; второй – заданная область допустимых значений  $\lambda_1 \in [\Lambda_{1,\min}; \Lambda_{1,\max}] \cup \lambda_2 \in [\Lambda_{2,\min}; \Lambda_{2,\max}]$  может не иметь пересечений с областью на рис. 2 и тогда оптимизационная задача не имеет решения.

Полученные в настоящей работе результаты не зависят от того, на какой внешней стороне стенки выше температура. Если принять  $T_{in} < T_{out}$ , то необходимо поменять знак теплового потока  $j_{max}$  на отрицательный.

Итак, действующий поток тепла при произвольных значениях коэффициентов  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  находится по формуле

$$j = \lambda_1 \lambda_2 \frac{T_{in} - T_{out}}{\lambda_2 a + \lambda_1 b}. \quad (6)$$

Посмотрим на изменение этого потока при движении по произвольно взятой кривой

$$\lambda_1 = 0,1 + 1,3\lambda_2 \quad (7)$$

на плоскости переменных  $(\lambda_1, \lambda_2)$  при заданном  $j_{max}$ . На рис. 3 приведены результаты расчета при следующих параметрах:

$$j_{max} = 130 \text{ Вт/м}^2; T_{in} = 120 \text{ }^\circ\text{C}; T_{out} = -20 \text{ }^\circ\text{C}; \\ a = 0,15 \text{ м}; b = 0,32 \text{ м}.$$

Минимальные значения коэффициентов теплопроводности  $\lambda_{1,\min} = 0,75 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ,  $\lambda_{2,\min} = 0,297 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ . Граничная кривая 2 на рис. 3 построена для того, чтобы видеть область, отвечающую условию минимальности теплового потока. При движении по произвольной кривой 2 слева направо происходит переход через граничную кривую. Вертикальная штриховая линия указывает на точку перехода  $\lambda_2 = 0,357 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$  и соответствующую ей  $\lambda_1 = 0,601 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ . Двигаясь по ней выше, определяем, что эти два значения коэффициента теплопроводности дают верхнюю предельную величину  $j_{max} = 130 \text{ Вт/м}^2$ . Таким образом, граница по уравнению (5) точно определяет предельный поток  $j_{max}$ , и все лежащие ниже границы 1 точки на рис. 3 приводят к потоку  $j < j_{max}$ .

Но почему-то точки на плоскости  $(\lambda_1, \lambda_2)$ , лежащие ниже горизонтальной и слева вертикальной асимптоты, «выпали» из решения. Если посмотреть на формулы для температуры в 1 и 2 областях:

$$T_1 = T_{in} - \lambda_2 \frac{T_{in} - T_{out}}{\lambda_2 a + \lambda_1 b} x,$$

$$T_2 = T_{out} + \lambda_1 \frac{T_{in} - T_{out}}{\lambda_2 a + \lambda_1 b} (a + b - x), \quad (8)$$

то отсюда и из формулы (6) видно, что решение для распределения температуры существует при любых коэффициентах  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ , на тепловой поток  $j$  нет никаких ограничений.

Рассмотрим сначала в формулах (8) предельные случаи  $\lambda_1 \rightarrow 0$  и  $\lambda_2 \rightarrow 0$ , но так, чтобы всегда  $\lambda_1 \neq 0$  и  $\lambda_2 \neq 0$ . Одновременно такие пределы трудно выполнить,

поэтому необходимо в первом уравнении сначала устремить  $\lambda_1 \rightarrow 0$ , а во втором уравнении  $\lambda_2 \rightarrow 0$ . Тогда из (8) следуют распределения

$$T_1 = T_{in} - \frac{T_{in} - T_{out}}{a} x,$$

$$T_2 = T_{out} + \frac{T_{in} - T_{out}}{b} (a + b - x). \quad (9)$$

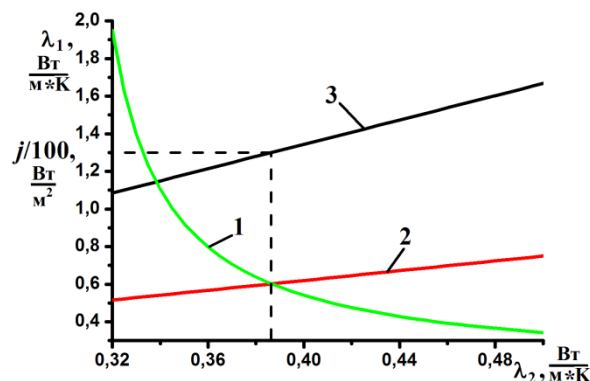


Рис. 3. Результаты расчета теплового потока (кривая 3) по уравнению (6) и коэффициента теплопроводности  $\lambda_i$ : 1 – граничная кривая по формуле (5); 2 – произвольно взятая кривая по формуле (7)

Fig. 3. Results of calculating the heat flux (curve 3) according to equation (6) and the thermal conductivity coefficient  $\lambda_i$ : 1 – boundary curve according to formula (5); 2 – arbitrary curve taken by the formula (7)

Эти распределения температуры не зависят от  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ , а только от координаты, толщин теплоизоляции, граничных температур. В указанных пределах тепловой поток через стенку становится сколь угодно малым. Теперь вместо коэффициентов теплопроводности подставим в (8) найденные выше их предельные значения  $\lambda_{1,\min}$  и  $\lambda_{2,\min}$ , им соответствует угловая точка на рис. 2, где поток тепла минимален. Тогда получим

$$T_1 = T_{in} - \frac{T_{in} - T_{out}}{2a} x,$$

$$T_2 = T_{out} + \frac{T_{in} - T_{out}}{2b} (a + b - x). \quad (10)$$

Здесь снова обнаруживаем аналогичную, как в предыдущем случае (9), ситуацию зависимости решений для температуры только от координат и граничных значений  $T_{in}$ ,  $T_{out}$ . Соответствующий распределениям (10) поток тепла равен

$$j = \frac{1}{2} j_{max}.$$

Таким образом, в угловой точке  $(\lambda_{1,\min}, \lambda_{2,\min})$  поток тепла в два раза ниже заданной предельной величины.

#### Заключение

На примере простой задачи о переносе тепла через составленную из двух различных материалов плоскую стенку показано, что оптимизационная задача на

их подбор по величине коэффициентов теплопроводности может привести к неполному решению. Поэтому при проектировании теплоизоляционных покрытий на основе данных, полученных из решения минимаксных задач, необходимо проводить дополнительный анализ. Такой подход не является самым

трудоемким, поскольку прямой путь, заключающийся в решении задач теплопереноса и перебора всех возможных значений коэффициентов теплопроводности из заданной области значений, может привести к еще большим затратам времени и средств.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Schuppler S., Fleuchaus P., Blum Ph. Techno-economic and environmental analysis of an Aquifer Thermal Energy Storage (ATES) in Germany // *Geothermal Energy*. – 2019. – V. 7. – № 11. – P. 1–24.
- Aquifer thermal energy storage: theoretical and operational analysis / J.S. Dickinson, N. Buik, M.C. Matthews, A. Snijders // *Geotechnique*. – 2009. – V. 59. – № 3. – P. 249–260.
- A review on system performance studies of aquifer thermal energy storage / Lihua Gao, Jun Zhao, Qingsong An, Junyao Wang, Xueling Liu // *Energy Procedia: 9th International Conference on Applied Energy, ICAE2017*. – Cardiff, UK, 21–24 August 2017. – № 142. – P. 3537–3545.
- Possemiers M., Huysmans M., Batelaan O. Influence of aquifer thermal energy storage on groundwater quality: a review illustrated by seven case studies from Belgium // *Journal of Hydrology: Regional Studies*. – 2014. – № 2. – P. 20–34.
- Hähnlein S., Bayer P., Blum P. International legal status of the use of shallow geothermal energy // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2010. – V. 14. – Iss. 9. – P. 2611–2625.
- Understanding the Chena Hot flopë Springs, Alaska, geothermal system using temperature and pressure data / K. Erkan, G. Holdmann, W. Benoit, D. Blackwell // *Geothermics*. – 2008. – V. 37. – № 6. – P. 565–585.
- Miglani S., Orehoung K., Carmeliet J. A methodology to calculate long-term shallow geothermal energy potential for an urban neighbourhood // *Energy and Buildings*. – 2018. – V. 159. – P. 462–473.
- Fridleifsson I.B. Geothermal energy for the benefit of the people // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2001. – V. 5. – Iss. 3. – P. 299–312.
- Максимов В.И., Салум А. Особенности использования геотермальной энергии с применением теплонасосных установок в условиях низких температур // *Известия ТПУ. Инжиниринг георесурсов*. – 2019. – Т. 330. – № 2. – С. 115–123.
- Половников В.Ю. Численный анализ влияния нестационарности процессов теплопереноса в зонах размещения подземных теплопроводов на их тепловые режимы и тепловые потери // *Известия ТПУ. Инжиниринг георесурсов*. – 2018. – Т. 329. – № 10. – С. 76–84.
- Сабденов К.О., Байтасов Т.М. Оптимальное (энергоэффективное) теплоснабжение здания в системе центрального отопления // *Известия ТПУ. Инжиниринг георесурсов*. – 2015. – Т. 326. – № 8. – P. 53–60.
- Сабденов К.О. Минимаксный анализ экономической и энергетической эффективности трубопроводов теплоснабжения // *Инженерно-физический журнал*. – 2016. – Т. 89. – № 6. – С. 1421–1429.
- EnergyPlus. Engineering Reference / Ed. by E. Orlando. – 2013. URL: <http://energy.gov/eere/office-energy-efficiency-renewable-energy> (дата обращения: 14.09.2014).
- Половников В.Ю., Губина Е.В. Тепломассоперенос в увлажненной тепловой изоляции теплопроводов, работающих в условиях затопления // *Инженерно-физический журнал*. – 2014. – Т. 87. – № 5. – С. 1106–1112.
- Основы теплопередачи в авиационной и ракетно-космической технике / В.С. Авдеевский, Б.М. Галицкий, Г.А. Глебов и др. – М.: Машиностроение, 1975. – 528 с.
- Половников В. Ю. Кондуктивный теплоперенос в слое тонкопленочной тепловой изоляции // *Известия ТПУ. Инжиниринг георесурсов*. – 2019. – Т. 330. – № 5. – С. 189–197.
- Салахутдинов Г.М. Тепловая защита в космической технике // *Новое в жизни, науке, технике: космонавтика, астрономия*. – М.: Знание, 1982. – 64 с.
- Зингер Н.М. Гидравлические и тепловые режимы теплофикационных сетей. 2-е изд. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 320 с.
- Сабденов К.О., Байтасов Т.М., Ерзада М. Оптимальное регулирование теплоснабжением здания. Часть 1. Формулировка задачи и основные формулы // *Инженерно-физический журнал*. – 2014. – Т. 87. – № 4. – С. 814–821.
- Сабденов К.О., Байтасов Т.М., Ерзада М. Оптимальное регулирование теплоснабжением здания. Часть 2. Анализ и результаты // *Инженерно-физический журнал*. – 2014. – Т. 87. – № 4. – С. 822–828.
- Алексеев В.М., Галеев Э.М., Тихомиров В.М. Сборник задач по теории оптимизации. Теория, примеры, задачи. – М.: Физматлит, 2005. – 288 с.
- Габасов Р., Кириллова Ф.М. Методы оптимизации. – Минск: Изд-во БГУ, 1980. – 472 с.

Поступила 03.06.2020 г.

#### Информация об авторах

**Сабденов К.О.**, доктор физико-математических наук, профессор, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева.

**Ерзада М.**, доктор технических наук, доцент, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева.

UDC 536.24

## FEATURES OF OPTIMIZATION PROBLEM FOR SELECTING MATERIALS TO MINIMIZE HEAT LOSS THROUGH THE WALL

**Kanysh O. Sabdenov<sup>1</sup>,**  
sabdenovko@yandex.kz

**Maira Erzada<sup>1</sup>,**  
mayira76@yahoo.co.jp

<sup>1</sup> L.N. Gumilev Eurasian National University,  
2, Satpaev street, Astana (Nur-Sultan), 010008, Kazakhstan.

**The relevance.** Heat storage and its effective use is associated with the selection of materials for thermal insulation of the walls. Such materials are represented by a wide range of thermophysical properties and cost in the market. Then the optimization problem arises, its solution should provide the smallest heat loss through the wall with a limited choice of materials with the given thermal conductivity coefficients. However, when solving the optimization problem, difficulties may arise in assessing the correctness of the results obtained. Therefore, this issue needs a detailed discussion.

**The main aim** of the research is mathematical modeling of stationary modes of heat transfer, formulation of the minimax problem of heat loss through the wall, construction of the solution area of the minimax problem, the analysis of the results and conclusions.

**Object:** wall, heat-insulating materials, heat fluxes, minimalist conditions, optimal solutions.

**Methods:** solving a minimax problem using analytical methods.

**Results.** The authors have stated the simple minimax problem: a two-layer flat wall is given with arbitrary heat conductivity coefficients and fixed thicknesses. On the right and left borders of the wall, a constant and different temperature is set. The maximum heat flux through the wall and the range of possible values of the thermal conductivity coefficients (i. e., possible materials) for each wall layer are also specified. It is required to find such heat conductivity coefficients from this region that ensure the heat flux below a given maximum value. This example shows that the solution of the minimax problem posed can lead to an incorrect result: either the whole range of feasible solutions can be obtained, or the problem may not have a solution. This means the need for a strict attitude to the formulation and method of solving optimization problems for heat transfer.

### Key words:

Heat storage, wall, heat-insulating material, minimax problem, thermal conductivity coefficients, heat loss.

### REFERENCES

1. Schuppler S., Fleuchaus P., Blum Ph. Techno-economic and environmental analysis of an Aquifer Thermal Energy Storage (ATES) in Germany. *Geothermal Energy*, 2019, vol. 7, no. 11, pp. 1–24.
2. Dickinson J.S., Buik N., Matthews M.C., Snijders A. Aquifer thermal energy storage: theoretical and operational analysis. *Geotechnique*, 2009, vol. 59, no. 3, pp. 249–260.
3. Lihua Gao, Jun Zhao, Qingsong An, Junyao Wang, Xueling Liu. A review on system performance studies of aquifer thermal energy storage. *Energy Procedia: 9<sup>th</sup> International Conference on Applied Energy, ICAE2017*. Cardiff, UK, 21–24 August 2017. No. 142, pp. 3537–3545.
4. Possemiers M., Huysmans M., Batelaan O. Influence of aquifer thermal energy storage on groundwater quality: a review illustrated by seven case studies from Belgium. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2014, no. 2, pp. 20–34.
5. Hähnlein S., Bayer P., Blum P. International legal status of the use of shallow geothermal energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010, vol. 14, Iss. 9, pp. 2611–2625.
6. Erkan K., Holdmann G., Benoit W., Blackwell D. Understanding the Chena Hot flopë Springs, Alaska, geothermal system using temperature and pressure data. *Geothermics*, 2008, vol. 37, no. 6, pp. 565–585.
7. Miglani S., Orehoung K., Carmeliet J. A methodology to calculate long-term shallow geothermal energy potential for an urban neighbourhood. *Energy and Buildings*, 2018, vol. 159, pp. 462–473.
8. Fridleifsson I.B. Geothermal energy for the benefit of the people. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2001, vol. 5, Iss. 3, pp. 299–312.
9. Maksimov V.I., Saloum A. Mathematical modeling of heat transfer by operation of geothermal heat pumps. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 4, pp. 126–135. In Rus.
10. Polovnikov V.Yu. Numerical analysis of nonstationary heat transfer influence in the zones of underground thermal pipelines on their thermal regimes and heat losses. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Asset Engineering*, 2018, vol. 329, no. 10, pp. 76–84. In Rus.
11. Sabdenov K.O., Baitasov T.M. Optimal (energy efficient) heat supply to buildings in central heating system. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2015, vol. 326, no. 8, pp. 53–60. In Rus.
12. Sabdenov K.O. Minimax analysis of economic and energy efficiencies of heat-supply pipelines. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2016, vol. 89, no. 6, pp. 1401–1409.
13. EnergyPlus. Engineering Reference. Ed. by E. Orlando. 2013. Available at: <http://energy.gov/eere/office-energy-efficiency-renewable-energy> (accessed 14 September 2014).
14. Polovnikov V.Yu., Gubina E.V. Heat and mass transfer in a wetted thermal insulation of hot water pipes operating under flooding conditions. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2014, vol. 87, Iss. 5, pp. 1151–1158. In Rus.
15. Avduevsky V.S., Galitsevsky B.M., Glebov G.A. *Osnovy teploperedachi v avizionnoy i raketno-kosmicheskoy tekhnike* [Fundamentals of heat transfer in aviation and rocket and space technology]. Moscow, Engineering Publ., 1975. 528 p.
16. Polovnikov V.Yu. Conductive heat transfer in layer of thin-film thermal insulation. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Asset Engineering*, 2019, vol. 330, no. 5, pp. 189–197. In Rus.
17. Salakhutdinov G.M. *Teplovaya zashchita v kosmicheskoy tekhnike* [Thermal protection in space technology]. *Novoe v zhizne, nauke, tekhnike: kosmonavtika, astronomiya* [New in Life, Science and Technology: Cosmonautics and Astronomy]. Moscow, Znanie Publ., 1982. 62 p.
18. Singer N.M. *Gidravlicheskiye i teplovyeye rezhimy teplofikatsionnykh setey* [Hydraulic and thermal modes of heating networks]. 2<sup>nd</sup> ed. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1986. 320 p.

19. Sabdenov K.O., Baitasov T.M., Erzada M. Optimum control of heat supply of a building. 1. Formulation of the problem and basic formulas. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2014, vol. 87, Iss. 4, pp. 839–847.
20. Sabdenov K.O., Baitasov T.M., Erzada M. Optimum control of heat supply of a building. 2. Analysis and results. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2014, vol. 87, Iss. 4, pp. 848–854.
21. Alekseev V.M., Galleev E.M., Tikhomirov V.M. *Sbornik zadach po teorii optimizatsii. Teoriya, primery, zadachi* [A collection of problems in optimization theory. Theory, examples and tasks]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2005. 288 p.
22. Gabasov R., Kirillova F. M. *Metody optimizatsii* [Optimization methods]. Minsk, Belarusian State University Publ. house, 1980. 472 p.

*Received: 3 June 2020.*

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

**Kanysh Sabdenov**, doctor of physic and mathematic sciences, professor, L.N. Gumilev Eurasian National University.

**Erzada Maira**, doctor of engineering sciences, ass. professor, L.N. Gumilev Eurasian National University.

УДК 504.55.054: 622 (470.6)

## МЕХАНОХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ДОБЫЧИ МЕТАЛЛОВ ИЗ ХВОСТОВ ОБОГАЩЕНИЯ

Голик Владимир Иванович<sup>1</sup>,  
v.i.golik@mail.ru

Разоренов Юрий Иванович<sup>1</sup>,  
yiri1963@mail.ru

Бригида Владимир Сергеевич<sup>2</sup>,  
1z011@inbox.ru

Бурдзиева Ольга Германовна<sup>3</sup>,  
olgaburdzieva@mail.ru

<sup>1</sup> Южно-Российский государственный политехнический университет,  
Россия, 346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132.

<sup>2</sup> ФИЦ «Субтропический научный центр российской академии наук»,  
354002, г. Сочи, ул. Яна Фабрициуса, 2/28.

<sup>3</sup> Геофизический институт Владикавказского научного центра РАН,  
Россия, РСО-Алания, 362002, г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а.

**Актуальность и цель исследования.** Цель исследования – установить взаимосвязь параметров технологии выщелачивания с эффективностью извлечения металлов. Статья посвящена проблеме совершенствования технологии извлечения металлов из продуктов первичной переработки металлических руд в рамках направления безотходной утилизации хвостов переработки. Ее актуальность обусловлена тем, что в настоящее время прослеживается глобальная тенденция – переход к «устойчивым геотехнологиям», одним из направлений которой является расширение сферы использования техногенного сырья, а опыт безотходной утилизации хвостов сравнительно мал.

**Методика исследования.** В экспериментах применена единая методика технологического процесса с математическим планированием. Для формирования поверхности регрессии в трехмерном виде использована процедура алгоритмов строгой интерполяции.

**Результаты.** Приведены результаты экспериментального обоснования возможности выщелачивания металлов из минеральных отходов из хвостов обогащения с использованием дезинтегратора российского производства. Область эффективного применения технологий утилизации некондиционного металлосодержащего минерального сырья определена моделированием технологических и экономических показателей с учетом стоимости каждого из компонентов выщелачиваемого раствора, а также затрат, связанных с увеличением продолжительности технологического процесса. Показано, что эффективность утилизации хвостов обогащения зависит от масштабов использования технологии выщелачивания на этапах от добычи до металлургического передела, а концепт эффективности новой технологии состоит в получении дохода от увеличения количества товарной продукции за счет утилизации некондиционного по содержанию металлов исходного сырья. Определено, что комплексность использования недр можно повысить путем выделения большей доли металлов в процессе выщелачивания хвостов обогащения в дезинтеграторе.

**Выводы.** Реализация технологии обеспечивает вовлечение в производство омертвленных минеральных ресурсов и создает новую сырьевую базу для устойчивого развития отечественного горно-металлургического комплекса. Рекомендовано дальнейшие исследования параметров безотходного выщелачивания металлов сосредоточить в области выявления совместного влияния доли раствора и массового содержания реагентов в обогащаемой пульпе на эффективность процесса.

### Ключевые слова:

Эксперимент, металл, хвосты обогащения, выщелачивание, дезинтегратор, механохимия.

### Введение

Среди проблем эффективности горного производства наибольшим вниманием пользуются вопросы совершенствования технологии извлечения тяжелых металлов. Действенной мерой снижения опасности хвостов переработки является безотходная утилизация. Это обусловлено тем, что прочие мероприятия не только менее эффективны, но и создают условия для неуправляемых синергетических процессов.

Нерентабельность утилизация хвостов обусловлена тем, что государство не в полной мере требует от владельцев предприятий компенсации за нанесенный окружающей среде ущерб. Выгоднее выбросить от-

ходы в окружающую среду, чем утилизировать их. Если бы штрафные санкции предъявлялись в полном объеме, утилизация отходов была бы экономически целесообразной.

### Объекты и методы исследования

Хвосты обогащения являются опасным при хранении ресурсом, использование которого может генерировать существенную часть прибыли рудника при условии оптимизации операций вскрытия минералов, а также роста доли извлечения металлов в раствор реагента.

Новейший компонент технологии – активация пульпы большой механической энергией – основыва-

ется на том, что частицы, воспринимающие ударные (импульсные) нагрузки со скоростью 250 м/с, трансформируются и приобретают новые технологические свойства.

Дезинтеграторы-активаторы уже десятки лет являются базовым элементом большинства технологических линий. Так, в Северном Казахстане на месторождении «Шокпак» дезинтегратор был освоен в 80-х гг. прошлого века.

Возможности традиционных технологий ограничены использованием в процессах обогащения преимущественно только механической энергии. Привлечение операций гидрометаллургической и химической переработки не является приемлемым решением, что подтверждается увеличением объемов хвостов в хранилищах. Выщелачивание металлов также не решает проблемы, потому что для проникновения реагентов необходимо продолжительное время и заданная крупность выщелачиваемых руд.

Исследования аспектов выщелачивания отходов начались более 50 лет назад, при этом наиболее значимый вклад в них внесли работы Н.П. Лаверова, Б.Н. Ласкорина, В.А. Чантурия, В.Ж. Аренса и др. [1–3].

Кучное выщелачивание металлов применяют чаще всего как возможность утилизации хвостов сортировки и обогащения, например, выщелачивание золота из хвостов обогащения с содержанием 0,6–0,3 г/т. На Казахстанском месторождении «Маньбай» более 30 лет перерабатывали хвосты урановых руд в куче объемом 1,5 млн т. В Узбекистане золото выщелачивают с высокой эффективностью на карьере «Мурунтау».

В новейших технологических процессах уже нередко используется принципиально отличный феномен – изменение состояния вещества приложением большой механической энергии, у истоков которого стоят исследования Й. Хинта.

Инструментом активации компонентов пульпы является дезинтегратор, конструкция которого состоит из двух вращающихся в противоположные стороны роторов, насаженных на отдельные соосные валы и заключённых в кожух. При обработке в веществе аккумулируется энергия, величина которой достигает 30 % от затраченной на обработку энергии.

На месторождении «Шокпак» дезинтегратор обеспечил выход 55 % активного класса доменных шлаков для приготовления твердеющих смесей. В комбинации с вибро-мельницей выход полезного продукта увеличивался до 70 %.

При переработке в дезинтеграторе одновременно с разрушением кристаллов выщелачивающий раствор запрессовывается во вновь образующиеся трещины и растворяет частицы металлов. Подача в рабочий орган дезинтегратора реагентов одновременно с механическим воздействием обеспечивает извлечение до 70 % ценных компонентов с получением товарных продуктов.

Актуальность утилизации хвостов обусловлена тем, что в настоящее время прослеживается глобальная тенденция – переход к «устойчивым геотехнологиям» (sustainable mining) [4, 5], одним из направлений которых является расширение сферы использо-

вания закладки техногенных пустот твердеющими смесями. В данном случае для их реализации хвосты переработки могут служить основным источником сырья.

#### Цель и методика

Парадигмой исследования было определение параметров перевода металлических компонентов в раствор в ходе базового агитационного выщелачивания.

Во всех опытах применена единая методика осуществления технологического процесса в режиме агитационного выщелачивания хвостов с использованием математического планирования по плану Венкена–Бокса. Независимыми факторами являлись: а) содержание серной кислоты в выщелачивающем растворе ( $X_1$ ) от 2 до 10 г/л; б) содержание хлорида натрия в выщелачивающем растворе ( $X_2$ ) от 20 до 160 г/л; в) весовое соотношение массы раствора и навески хвостов обогащения ( $X_3$ ) в единичном эксперименте (50 г) от 4 до 10; г) продолжительность обогащения ( $X_4$ ) – от 0,15 до 1,0 ч [6]. Для формирования поверхности регрессии в трехмерном виде использована процедура алгоритмов строгой интерполяции. Алгоритм «Renka I» выбран с учетом коэффициента детерминации так, чтобы распределение выхода металла поверхности совпадало с поверхностью первичных данных.

#### Результаты

Возможность выщелачивания металлов из минеральных отходов осуществлено авторами статьи на хвостах обогащения с использованием дезинтегратора ДУ-11 [7, 8].

Масса навески хвостов, подвергаемых выщелачиванию в каждом их опытов, – 50 г. Количество выщелачиваемых хвостов составляло те же 50 г из-за уноса мелких фракций с пылью.

Предварительно подготовленный выщелачивающий раствор (состоящий из серной кислоты и хлорида натрия) заданного состава смешивали с хвостами на первом этапе непосредственно перед агитационным выщелачиванием, на втором – после активации выщелачиваемого материала в дезинтеграторе.

Переработку хвостов с использованием раствора в виде пульпы, полученной добавлением в выщелачивающий раствор активированного материала, или пульпы, полученной при пропускании хвостов с раствором через дезинтегратор, производили в течение определенного времени в агитаторе с заданной скоростью вращения.

В каждом опыте исследовали по пять партий хвостов. По каждому виду минерального сырья переработано по 0,05 т просеянных через сито 2,0 мм хвостов обогащения.

Эффективность извлечения металлов определяли путем сравнения вариантов выщелачивания в перколяторе и в дезинтеграторе в течение 60 минут. Хвосты обогащения полиметаллических руд Садонских месторождений содержали, %: серебро 0,015, медь – 0,18, марганец – 0,015, цинк – 0,95, свинец – 0,84 и др.



Для построения уравнения регрессии принимались следующие переменные (регулируемые) факторы:

- содержание серной кислоты и хлорида натрия,  $X_1$ ,  $X_2$  ( $X_1$ : 1–2, 0–6 и 1–10 г/л,  $X_2$ : 1–20, 0–90 и 1–160 г/л),
- соотношение Ж:Т (жидкая/твердая фракции),  $X_3$ , ( $X_3$ : 1:4, 0:7 и 1:10),
- время агитационного выщелачивания,  $X_4$ , ( $X_4$ : –1–0,25, 0–0,5, 1–1 ч).

Результаты базового варианта выщелачивания хвостов сведены в табл. 1, 2.

**Таблица 1.** Условия и результаты агитационного выщелачивания хвостов

**Table 1.** Conditions and results of tails agitation leaching

Опыт Experiment	Содержание реагента, г/л Reagent content, g/l		Соотношение Ж:Т Liquid/Solid concentration	Время выщелачивания, ч Leaching time, h	Извлечение Zn, % Zn extraction, %
	серная кислота sulfuric acid	хлорид натрия sodium chloride			
1	2 (-1)	20 (-1)	4 (-1)	0,25 (-1)	41,26
2	10 (1)	20 (-1)	4 (-1)	0,25 (-1)	57,76
3	2 (-1)	160 (1)	4 (-1)	0,25 (-1)	18,11
4	10 (1)	160 (1)	4 (-1)	0,25 (-1)	24,00
5	2 (-1)	20 (-1)	10 (1)	0,25 (-1)	48,42
6	10 (1)	20 (-1)	10 (1)	0,25 (-1)	82,11
7	2 (-1)	160 (1)	10 (1)	0,25 (-1)	12,63
8	10 (1)	160 (1)	10 (1)	0,25 (-1)	17,89
9	2 (-1)	20 (-1)	4 (-1)	1 (1)	44,58
10	10 (1)	20 (-1)	4 (-1)	1 (1)	70,26
11	2 (-1)	160 (1)	4 (-1)	1 (1)	10,95
12	10 (1)	160 (1)	4 (-1)	1 (1)	28,21
13	2 (-1)	20 (-1)	10 (1)	1 (1)	49,47
14	10 (1)	20 (-1)	10 (1)	1 (1)	50,53
15	2 (-1)	160 (1)	10 (1)	1 (1)	15,79
16	10 (1)	160 (1)	10 (1)	1 (1)	18,95
17	2 (-1)	90 (0)	7 (0)	0,625 (0)	21,37
18	10 (1)	90 (0)	7 (0)	0,625 (0)	34,63
19	6 (0)	20 (-1)	7(0)	0,625 (0)	67,79
20	6 (0)	160 (1)	7 (0)	0,625 (0)	25,79
21	6 (0)	90 (0)	4 (-1)	0,625 (0)	40,84
22	6 (0)	90 (0)	10 (1)	0,625 (0)	36,84
23	6 (0)	90 (0)	7 (0)	0,25 (-1)	40,53
24	6 (0)	90 (0)	7 (0)	1 (1)	42,74

Примечание: в скобках указаны уровни варьирования независимых переменных (-1, 0, 1).

Note: levels of variation of independent variables (-1, 0, 1) are indicated in parentheses.

После регрессионного анализа экспериментальных данных (табл. 1) установлена зависимость выхода цинка от основных влияющих факторов (коэффициент детерминации  $R^2=0,939$ ) (1):

$$\begin{aligned} \varepsilon_{Zn} = & 39,35 + 6,76X_1 - 18,88X_2 - 0,62X_4 - \\ & -11,6X_1^2 + 7,19X_2^2 + 2,03X_4^2 - 2,84X_1X_2 - \dots \\ & \dots -1,39X_1X_3 - 0,89X_1X_4 - \\ & -2,04X_2X_3 + X_2X_4 - 2,45X_3X_4. \end{aligned} \quad (1)$$

При этом безразмерные переменные определяются из выражений (2):

$$\begin{aligned} X_1 = \frac{C_{H_2SO_4} - 6}{4}; \quad X_2 = \frac{C_{NaCl} - 90}{70}; \\ X_3 = \frac{(Ж:Т) - 7}{3}; \quad X_4 = \frac{t - 0,625}{0,375}. \end{aligned} \quad (2)$$

Дальнейшую обработку результаты опытов проводили с использованием современных методов трехмерной интерполяции для построения аппроксимирующих функций исследуемого процесса.

Прежде всего, набор данных табл. 1 переформатировали следующим образом: а) сгруппировали номера опытов в соответствии со временем выщелачивания (0,25; 0,625 и 1 ч); б) для каждого из них определяли долю  $H_2SO_4$  или  $NaCl$  ( $K_{SO}$  и  $K_{Cl}$  соответственно) в выщелачиваемом растворе путем деления значений столбиков 4 и 5 на 998,5 (масса 1 л воды). Итоговые значения представлены в табл. 2.

**Таблица 2.** Параметры выщелачивания хвостов обогащения

**Table 2.** Parameters of leaching tailings

№	Соотношение Ж:Т Liquid/Solid concentration	Время выщелачивания, ч Leaching time, h	Содержание реагента, г/л Reagent content, g/l		Извлечение металла, % Metal extraction, %	Соотношение со- держания реагентов в растворе Content ratio of reactants in solution	
			серная кислота sulfuric acid	хлорид натрия sodium chloride		Zn	$K_{SO}$
1	4	0,25	2	20	41,26	0,002	0,020
2	4	0,25	10	20	57,76	0,010	0,020
3	4	0,25	2	160	18,11	0,002	0,160
4	4	0,25	10	160	24,00	0,010	0,160
5	10	0,25	2	20	48,42	0,002	0,020
6	10	0,25	10	20	82,11	0,010	0,020
7	10	0,25	2	160	12,63	0,002	0,160
8	10	0,25	10	160	17,89	0,010	0,160
23	7	0,25	6	90	40,53	0,006	0,090
17	7	0,625	2	90	21,37	0,002	0,090
18	7	0,625	10	90	34,63	0,010	0,090
19	7	0,625	6	20	67,79	0,006	0,020
20	7	0,625	6	160	25,79	0,006	0,160
21	4	0,625	6	90	40,84	0,006	0,090
22	10	0,625	6	90	36,84	0,006	0,090
9	4	1	2	20	44,58	0,002	0,020
10	4	1	10	20	70,26	0,010	0,020
11	4	1	2	160	10,95	0,002	0,160
12	4	1	10	160	28,21	0,010	0,160
13	10	1	2	20	49,47	0,002	0,020
14	10	1	10	20	50,53	0,010	0,020
15	10	1	2	160	15,79	0,002	0,160

Для эколого-экономического обоснования параметров агитационного выщелачивания необходимо знать массовую составляющую реагентов в пульпе. В связи с тем, что использовать для этого отношение Ж:Т (столбец № 2, табл. 2) неконкретно, вначале определяли общую массу раствора ( $M_r$ ) путем умножения Ж:Т на 50 г (масса навески хвостов –  $M_x$ ), а затем массу общей пульпы ( $M_p$ ) – суммируя  $i$ -е значе-

ние  $M_r$  с постоянным  $M_x$ . На последнем этапе определяли долю массы реагентов в пульпе ( $H_2SO_4$  и  $NaCl$  соответственно) по формуле (3) (табл. 3):

$$H_2SO_4 = \frac{M_{SO}}{M_p}; NaCl = \frac{M_{Cl}}{M_p}, \quad (3)$$

где  $M_{SO}$  – массовая доля серной кислоты в выщелачиваемом растворе (отношение  $K_{SO} \times M_r$ ), г;  $M_{Cl}$  – массовая доля хлорида натрия в выщелачиваемом растворе (отношение  $K_{Cl} \times M_r$ ), г.

Таблица 3. Состав раствора выщелачивания

Table 3. Leaching solution composition

Опыт Experiment	Масса, г/Weight, g					
	раствора solution	пульпы pulp	Реагентов в растворе reactants in solution		Доля массы реагентов в пульпе, % Percentage of reagents mass in pulp, %	
	$M_r$	$M_p$	$M_{SO}$	$M_{Cl}$	$H_2SO_4$	$NaCl$
1	2	3	4	5	6	7
1	200	250	0,401	4,006	0,1602	1,6024
2	200	250	2,003	4,006	0,8012	1,6024
3	200	250	0,401	32,048	0,1602	12,8192
4	200	250	2,003	32,048	0,8012	12,8192
5	500	550	1,002	10,015	0,1821	1,8209
6	500	550	5,008	10,015	0,9105	1,8209
7	500	550	1,002	80,120	0,1821	14,5673
8	500	550	5,008	80,120	0,9105	14,5673
23	350	400	2,103	31,547	0,5258	7,8868
17	350	400	0,701	31,547	0,1753	7,8868
18	350	400	3,505	31,547	0,8763	7,8868
19	350	400	2,103	7,011	0,5258	1,7526
20	350	400	2,103	56,084	0,5258	14,0210
21	200	250	1,202	18,027	0,4807	7,2108
22	500	550	3,005	45,068	0,5463	8,1941
9	200	250	0,401	4,006	0,1602	1,6024
10	200	250	2,003	4,006	0,8012	1,6024
11	200	250	0,401	32,048	0,1602	12,8192
12	200	250	2,003	32,048	0,8012	12,8192
13	500	550	1,002	10,015	0,1821	1,8209
14	500	550	5,008	10,015	0,9105	1,8209
15	500	550	1,002	80,120	0,1821	14,5673
16	500	550	5,008	80,120	0,9105	14,5673
24	350	400	2,103	31,547	0,5258	7,8868

Результатом обработки данных табл. 3 методом трехмерной интерполяции выявлено влияние продолжительности пререработки на эффективность обогащения хвостов. При этом установлена аналитическая зависимость степени извлечения цинка (столбец 6, табл. 2) из хвостов обогащения от параметров выщелачиваемого раствора (столбцы 6 и 7 для  $H_2SO_4$  и  $NaCl$  соответственно, табл. 3), представляющая собой поверхность полиномиального вида ( $R^2=0,983$ ):

$$Zn = \frac{\left( 24,56 - 48,27H_2SO_4 + 51H_2SO_4^2 + \right.}{\left( 1 - 4,50H_2SO_4 + 8,74H_2SO_4^2 - \right.}, \quad (4)$$

$$\left. +4,84HCl - 0,65HCl^2 + 0,02HCl^3 \right)$$

$$\left. -5,01H_2SO_4^3 + 0,02HCl \right)$$

где  $Zn$  – выход цинка, %;  $H_2SO_4$  – массовая доля серной кислоты в общей массе пульпы, %;  $NaCl$  – массовая доля хлорида натрия в общей массе пульпы, %.

Проекция полиномиальной функции на ось  $H_2SO_4$ – $NaCl$  представляет собой номограмму (рис. 1, б).

Из анализа рис. 1 следует, что при данной продолжительности процесса уменьшение концентрации  $NaCl$  с 15 до 1,5 % (доля массы компонента в общей массе пульпы) при  $H_2SO_4=0,1$  % приводит к увеличению выхода цинка с 17 до 43 % (в 2,53 раза), а при 1 %  $H_2SO_4$  уровень извлечения растет с 23 до 70 % (в 2,3 раза). Увеличение концентрации  $H_2SO_4$  с 0,1 до 1 % при значении  $NaCl=1,5$  % приводит к росту доли извлечения цинка с 43 до 83 % (+40 % или в 1,93 раза) с образованием локального максимума (63 %) в диапазоне 0,25–0,48 % ( $H_2SO_4$ ), а при значении  $NaCl=15$  % прослеживается стабильность доли извлечения цинка в 17 % (от 0,1 до 0,78 % долей  $H_2SO_4$ ), сменяющаяся резким ростом до 37 % (в 2,18 раза).

Увеличение времени выщелачивания до 0,625 ч существенно изменяет процесс обогащения пульпы. В результате математической обработки данных установлена аналитическая зависимость, представляющая собой поверхность полиномиального вида ( $R^2=0,99$ ):

$$Zn = \frac{\left( 54,54 + 67,48H_2SO_4 - 55,01H_2SO_4^2 - \right.}{\left( 1 - 0,03H_2SO_4 - 0,08HCl \right)}, \quad (5)$$

$$\left. -11,45HCl + 0,73HCl^2 + 0,02HCl^3 \right)$$

Распределение выхода  $Zn$  функции (5) представлено на рис. 2, б.

Из анализа рис. 2 следует, что дальнейший рост продолжительности процесса и уменьшение концентрации  $NaCl$  с 15 до 1,5 % при 0,1 %  $H_2SO_4$  увеличивает выход цинка с 24 до 49 % (в 2 раза), а при  $H_2SO_4=1$  % увеличивает с 24 до 62 % (в 2,58 раза). Увеличение доли  $H_2SO_4$  с 0,1 до 1 % при значении  $NaCl=1,5$  % увеличивает извлечение цинка с 49 до 62 % (в 1,27 раза). Рост  $NaCl$  до 15 % приводит к низкому уровню извлечения с образованием максимума концентрации  $Zn=24$  % в диапазоне 0,43–0,77 % ( $H_2SO_4$ ).

С максимальным временем выщелачивания 1 ч зависимость эффективности обогащения от параметров выщелачиваемого раствора имеет вид полиномиальной поверхности (рис. 3) при  $R^2=0,984$ :

$$Zn = \frac{\left( 41,6 + 13,56H_2SO_4 - 4,82HCl + 0,16HCl^2 \right.}{\left( 1 - 2,24H_2SO_4 + 2,29H_2SO_4^2 \right)}, \quad (6)$$

Распределение результирующих значений функции (6) представлено на рис. 3, б.

Из рис. 3, а следует, что при максимальном времени обогащения уменьшение концентрации  $NaCl$  с 15 до 1,5 % при 0,1 %  $H_2SO_4$  увеличивает выход  $Zn$  с 16 до 45 % (в 2,81 раз), а при концентрации  $H_2SO_4$  0,9 % возрастает с 28 до 57 % (в 2,04 раза). Увеличение  $H_2SO_4$  с 0,1 до 0,9 % при концентрации  $NaCl$  1,5 % повышает содержание полезной компоненты с 45 до 57 % (в 1,93 раза) с образованием локального максимума (74 %) в диапазоне от 0,27 до 0,7 % ( $H_2SO_4$ ). При концентрации  $NaCl$  15 % выход  $Zn$  увеличивается до 22 % с образованием локального максимума от 0,35 % ( $H_2SO_4$ ), после чего эффективность выщелачивания снижается.

Область эффективного применения технологий утилизации некондиционного минерального сырья

определяется моделированием технологических и экономических показателей с учетом общей стоимости каждого из компонентов выщелачиваемого раствора, а также затрат, связанных с ростом продолжительности технологического процесса (с 0,25 до 1 ч).

Концепт эффективности выщелачивания хвостов обогащения состоит в том, что из извлеченного из недр сырья удастся получить дополнительный доход от увеличения количества товарной продукции [9, 10].

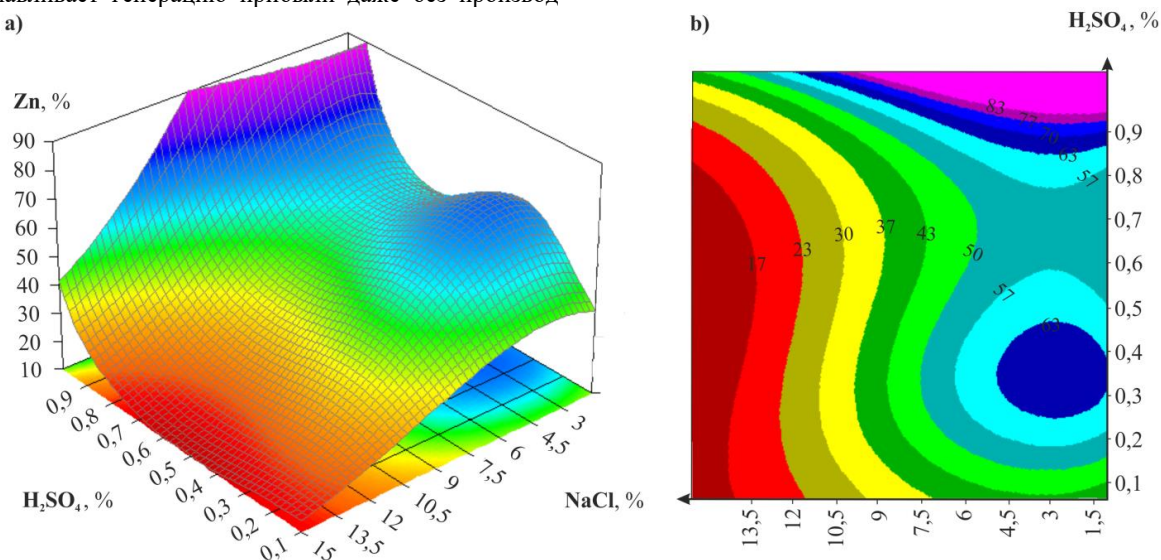
Безотходная утилизация хвостов обогащения обуславливает генерацию прибыли даже без производ-

ства продукции более высокого «технологического передела» [11, 12].

При этом комплексный эколого-экономический эффект от утилизации хвостов (7):

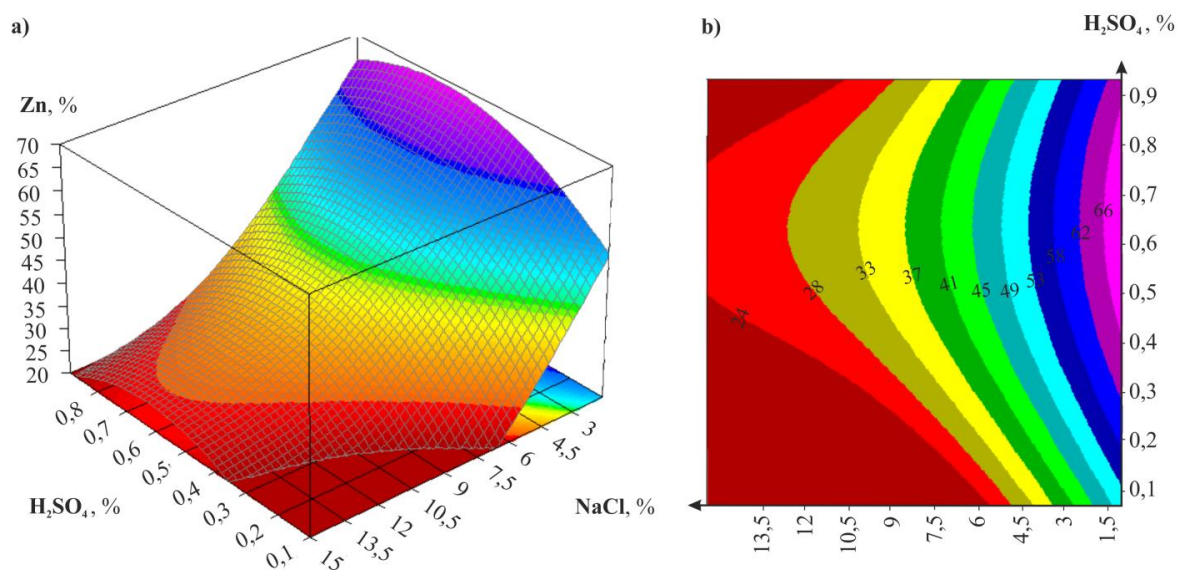
$$\Theta = \sum_{t=1}^T \left( \sum_{i=1}^n C_{6t} - \sum_{i=1}^n C_{0t} \right) Q_t, \quad (7)$$

где  $C_{6t}$  – базовые затраты на содержание отходов вида  $i$  в период  $t$ ;  $C_{0t}$  – новые затраты на содержание отходов вида  $i$  в период  $t$ ;  $Q_t$  – объем утилизируемых хвостов в период  $t$ ;  $n$  – виды отходов переработки,  $i=1 \dots n$ .



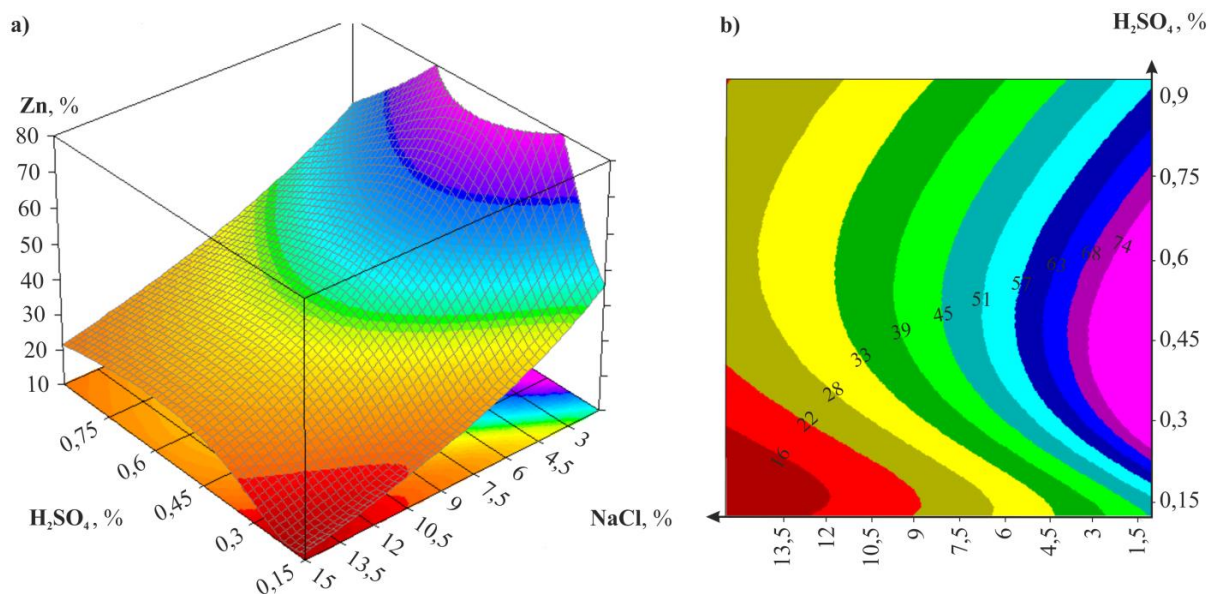
**Рис. 1.** Доля извлечения цинка при изменении содержания реагентов в выщелачиваемом растворе при времени обогащения 0,25 ч: а) графический вид решения уравнения (3); б) номограмма распределения Zn в плоскости H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-NaCl по формуле (4). Остальные подрисовочные надписи соответствуют обозначениям формулы (4)

**Fig. 1.** Proportion of zinc extraction when the percentage of reagents in leached solution changes, at enrichment time 0,25 h: a) graphical view of equation (3) solution; b) nomogram of Zn distribution in H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-NaCl plane according to formula (4). Remaining captions correspond to the designations of formula (4)



**Рис. 2.** Доля извлечения цинка при изменении содержания реагентов в выщелачиваемом растворе при времени обогащения 0,625 ч: а) графический вид решения уравнения (5); б) номограмма уравнения (5). Остальные подрисовочные надписи такие же, как на рис. 1

**Fig. 2.** Proportion of zinc extraction when the percentage of reagents in leached solution changes, at enrichment time 0,625 h: a) graphical view of equation (5) solution; b) nomogram of the formula (5). Remaining captions correspond to the designations of Fig. 1



**Рис. 3.** Доля извлечения цинка при изменении содержания реагентов в выщелачиваемом растворе при времени обогащения 1 ч: а) графический вид решения уравнения (6); б) номограмма уравнения (6). Остальные подписанные надписи такие же, как на рис. 1

**Fig. 3.** Proportion of zinc extraction when the percentage of reagents in leached solution changes, at enrichment time 1 h: а) graphical view of equation (6) solution; б) nomogram of the formula (6). Remaining captions correspond to the designations of Fig. 1

Вовлечение в производство колоссальных минеральных ресурсов создает новую сырьевую базу для горной промышленности и избавляет от необходимости вовлечения в эксплуатацию новых месторождений.

При продолжительности выщелачивания 25 мин. извлечение металла увеличивается до 63 %, при продолжительности 37,5 мин. – до 66 %, а при продолжительности 60 мин. – до 74 %.

Результаты выполненного исследования перекликаются с результатами, полученными другими российскими и зарубежными исследователями данного направления горного производства [13–19].

#### Заключение

Из анализа полученных результатов следует, что минимальные затраты на обогащение (продолжи-

тельность процесса – 25 мин) хвостов с эффективностью извлечения цинка до 63 % достигаются в диапазоне концентрации: H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>=0,3–0,4 % и NaCl=1,5–4,5 %.

Обеспечение комплексного использования недр при расширении кондиций существующей минерально-сырьевой базы можно достичь путем выделения большей доли металлов в процессе выщелачивания пульпы в дезинтеграторе. Вовлечение в производство ранее опасных для окружающей среды минеральных ресурсов создает новую сырьевую базу для устойчивого развития отечественного горно-металлургического комплекса.

Дальнейшие исследования следует сосредоточить в области выявления совместного влияния доли раствора и массового содержания реагентов в обогащаемой пульпе на эффективность процесса выщелачивания.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Evaluation of single- and dual-porosity models for reproducing the release of external and internal tracers from heterogeneous waste-rock piles // S. Blackmore, D. Pedretti, K.U. Mayer, L. Smith, R.D. Beckie // Journal of Contaminant Hydrology. – 2018. – V. 214. – P. 65–74.
2. Mjonono D., Harrison S.T.L., Kotsiopoulos A. Supplementing structural integrity of waste rock piles through improved packing protocols to aid acid rock drainage prevention strategies // Minerals Engineering. – 2019. – V. 135. – P. 13–20. DOI: 10.1016/j.mineng.2019.02.029
3. Ghorbani Y., Franzidis J.-P., Petersen J. Heap leaching technology – current state, innovations, and future directions: a review // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. – 2016. – V. 37. – № 2. – P. 73–119.
4. Tuokuu F.X., Kpinpuo S.D., Hinson R.E. Sustainable development in Ghana's gold mines: clarifying the stakeholder's perspective // Journal of Sustainable Mining. – 2019. – V. 18. – № 2. P. 77–84. DOI: 10.1016/j.jsm.2019.02.007.
5. Borujeni M.P., Gitinavard H., Evaluating the sustainable mining contractor selection problems: An imprecise last aggregation preference selection index method // Journal of Sustainable Mining. – 2017. – V. 16. – № 4. – P. 207–218. DOI: 10.1016/j.jsm.2017.12.006.
6. Бригида В. С., Дмитрак Ю. В., Габараев О. З. Обеспечение устойчивости подрабатываемых наклонных дегазационных скважин при интенсивной разработке свит газоносных угольных пластов // Записки горного института. – 2019. – Т. 239. – С. 497–502. DOI: 10.31897/PMI.2019.5.497
7. Голик В.И., Дребенштедт К, Разоренов Ю.И. Оценка эффективности комбинирования технологий добычи металлов // Устойчивое развитие горных территорий. – 2015. – № 1 (23). – С. 5–10.
8. Голик В.И., Комашенко В.И., Качурин Н.М. Концепция комбинирования технологий разработки рудных месторождений // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2015. – № 4. – С. 76–88.
9. Каплунов Д.Р., Рылъникова М.В., Радченко Д.Н. Реализация концепции устойчивого развития горных территорий – базис расширения минерально – сырьевых комплексов России // Устойчивое развитие горных территорий. 2015. – № 3. – С. 46–50.

10. Оценка коренных и техногенных месторождений РСО-Алания как возможных объектов применения технологии подземного и кучного выщелачивания / К.К. Худелидзе, Ю.И. Кондратьев, З.С. Бетров, В.Б. Заалишвили // Устойчивое развитие горных территорий. – 2016. – № 1. – С. 46–49.
11. Евдокимов С.И., Евдокимов В.С. Извлечение металлов из лежалых хвостов с целью утилизации // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2014. – № 4. – С. 172–182.
12. Дмитрак Ю.В., Камнев Е.Н. АО «Ведущий проектно-исследовательский и научно-исследовательский институт промышленной технологии» – путь длиной в 65 лет // Горный журнал. – 2016. – № 3. – С. 6–12.
13. Khasheva Z.M., Golik V.I. The ways of recovery in economy of the depressed mining enterprises of the Russian Caucasus // International Business Management. – 2015. – Т. 9. – № 6. – С. 1210–1216.
14. Клюев Р.В., Гаврина О.А., Михальченко С.Н. Анализ удельного потребления электроэнергии обогатительной фабрики // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2020. – № 1. – С. 433–447.
15. Комащенко В.И., Васильев П.В., Масленников С.А. Технологиям подземной разработки месторождений КМА – надежную сырьевую основу // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2016. – № 2. – С. 101–114.
16. Ляшенко В.И. Природоохранные технологии освоения сложноструктурных месторождений полезных ископаемых // Маркшейдерский вестник. – 2015. – № 1. – С. 10–15.
17. Evaluation of single- and dual-porosity models for reproducing the release of external and internal tracers from heterogeneous waste-rock piles / Sh. Blackmore, D. Pedretti, K.U. Mayer, L.B. Smith, R.D. Beckie // Journal of Contaminant Hydrology. – 2018. – V. 214. – P. 65–74. DOI: 10.1016/j.jconhyd.2018.05.007.
18. Tuokuu Francis Xavier Dery, Kpinpuo Stephen Debar, Hinson Robert Ebo. Sustainable development in Ghana's gold mines: clarifying the stakeholder's perspective // Journal of Sustainable Mining. – 2019. – V. 18. – № 2. – P. 77–84. DOI: 10.1016/j.jsm.2019.02.007.
19. Borujeni Mohammad Panahi, Gitinavard Hossein. Evaluating the sustainable mining contractor selection problems: An imprecise last aggregation preference selection index method // Journal of Sustainable Mining. – 2017. – V. 16. – № 4. – P. 207–218. DOI: 10.1016/j.jsm.2017.12.006.

Поступила 03.06.2020 г.

#### Информация об авторах

**Голик В.И.**, доктор технических наук, профессор кафедры горного дела Южно-Российского государственного политехнического университета.

**Разренов Ю.И.**, доктор технических наук, профессор, ректор Южно-Российского государственного политехнического университета.

**Бригида В.С.**, кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории математического моделирования природных процессов Федерального исследовательского центра «Субтропический научный центр Российской академии наук».

**Бурдзиева О.Г.**, кандидат географических наук, заведующая лабораторией техногенной геоэкологии Геофизического института Владикавказского научного центра РАН.

UDC 504.55.054:622(470.6)

**MECHANOCHEMICAL TECHNOLOGY OF METAL MINING FROM ENRICHING TAILS**

**Vladimir I. Golik<sup>1</sup>,**  
v.i.golik@mail.ru

**Yuri I. Razorenov<sup>1</sup>,**  
yiri1963@mail.ru

**Vladimir S. Brigida<sup>2</sup>,**  
1z011@inbox.ru

**Olga G. Burdzieva<sup>3</sup>,**  
olgaburdzieva@mail.ru

<sup>1</sup> South-Russian State Polytechnic University,  
132, Prosveshcheniya street, Novocherkassk, 346428, Russia.

<sup>2</sup> Federal Research Centre the Subtropical Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences,  
2/28, Yan Fabritsius street, Sochi, 354002, Russia.

<sup>3</sup> Geophysical Institute of Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences,  
93a, Markov street, Vladikavkaz, North Ossetia-Alania, 362002, Russia.

**The relevance and aim of the study.** The aim of the study is to establish the relationship between the parameters of leaching technology and metal extraction efficiency. The article is devoted to the problem of improving the technology for extracting metals from products of primary processing of metal ores as a part of the non-waste recycling of tailings. Its relevance is caused by a global trend – transition to «sustainable geotechnologies», one of the directions of which is to expand the scope of use of technogenic raw materials, and the experience of waste-free tailings disposal is relatively small.

**Methodology.** In the experiments, a unified methodology of the technological process with mathematical planning was applied. For formation of a regression surface in three-dimensional form, the procedure of strict interpolation algorithms was used.

**The results** of experimental substantiation of the possibility of leaching metals from mineral waste from enrichment tailings using a Russian-made disintegrator are presented. The area of effective application of technologies for disposal of substandard metal-containing mineral raw materials is determined by modeling technological and economic indicators, taking into account the cost of each component of the leachate solution, as well as the costs associated with increasing the duration of the process. It was shown that the efficiency of utilizing tailings depends on the extent to which leaching technology is used at the stages from production to metallurgical processing, and the concept of the effectiveness of the new technology consists in generating income from an increase in the number of commercial products due to the utilization of raw materials that are substandard in terms of metal content. It was determined that the complexity of the use of subsurface resources can be improved by isolating a larger proportion of metals in the leaching of enrichment tailings in the disintegrator.

**Conclusions.** The implementation of the technology ensures the involvement of dead mineral resources in the production and creates a new raw material base for sustainable development of the domestic mining and metallurgical complex. It is recommended that further studies of the parameters of non-waste metal leaching be concentrated in the field of identifying the joint effect of the proportion of the solution and the mass content of reagents in the enriched pulp on the efficiency of the process.

**Key words:**

Experiment, metal, tailings, leaching, disintegrator, mechanochemistry.

**REFERENCES**

- Blackmore S., Pedretti D., Mayer K.U., Smith L., Beckie R.D. Evaluation of single- and dual-porosity models for reproducing the release of external and internal tracers from heterogeneous waste-rock piles. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2018, vol. 214, pp. 65–74.
- Mjonono D., Harrison S.T.L., Kotsiopoulos A. Supplementing structural integrity of waste rock piles through improved packing protocols to aid acid rock drainage prevention strategies. *Minerals Engineering*, 2019, vol. 135, pp. 13–20.
- Ghorbani Y., Franzidis J.-P., Petersen J. Heap leaching technology – current state, innovations, and future directions: a review. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 2016, vol. 37, no. 2, pp. 73–119.
- Tuokuu F.X., Kpinpuo S.D., Hinson R.E. Sustainable development in Ghana's gold mines: Clarifying the stakeholder's perspective. *Journal of Sustainable Mining*, 2019, vol. 18, no. 2, pp. 77–84.
- Borujeni M.P., Gitinavard H., Evaluating the sustainable mining contractor selection problems: An imprecise last aggregation preference selection index method. *Journal of Sustainable Mining*, 2017, vol. 16, no. 4, pp. 207–218.
- Brigida V.S., Golik V.I., Dmitrak Yu.V., Gabaraev O.Z. Ensuring stability of undermining inclined drainage holes during intensive development of multiple gas-bearing coal layers. *Journal of Mining Institute*, 2019, vol. 239, pp. 497–501. In Rus.
- Golik V.I., Drebenstedt K., Razorenov Yu.I. Evaluation of the effectiveness of combining metal mining technologies. *Sustainable development of mountainous territories*, 2015, no. 1 (23), pp. 5–10. In Rus.
- Golik V.I., Komashchenko V.I., Kachurin N.M. The concept of combining technologies for the development of ore deposits. *Bulletin of Tula State University. Earth sciences*, 2015, no. 4, pp. 76–88. In Rus.
- Kaplunov D.R., Rylnikova M.V., Radchenko D.N. The implementation of the concept of sustainable development of

- mountainous territories is the basis for the expansion of the mineral resource complex of Russia. *Sustainable development of mountainous areas*, 2015, no. 3, pp. 46–50. In Rus.
10. Khulelidze K.K., Kondratiev Yu.I., Betrozov Z.S., Zaalishvili V.B. Evaluation of the primary and technogenic deposits of North Ossetia-Alania as possible objects for applying the technology of underground and heap leaching. *Sustainable development of mountain territories*, 2016, no. 1, pp. 46–49. In Rus.
  11. Evdokimov S.I., Evdokimov V.S. Metal recovery from old tailings. *Journal of Mining Science*, 2014, no. 4, pp. 172–182. In Rus.
  12. Dmitrak Yu.V., Kamnev E.N. JSC «Leading design and survey and research institute of industrial technology» a 65-year-long path. *Mountain Journal*, 2016, no. 3, pp. 6–12. In Rus.
  13. Mining enterprises of the Russian Caucasus. *International Business Management*, 2015, vol. 9, no. 6, pp. 1210–1216.
  14. Klyuev R.V., Gavrina O.A., Mikhachenko S.N. Analysis of specific electrical energy consumption of the processing factory. *Proceedings of the Tula States University. Sciences of Earth*, 2020, no. 1, pp. 433–447. In Rus.
  15. Komashchenko V.I., Vasiliev P.V., Maslennikov S.A. Underground mining technologies for KMA deposits – a reliable raw material base. *Bulletin of Tula State University. Earth sciences*, 2016, no. 2, pp. 101–114. In Rus.
  16. Lyashenko V.I. Environmental technologies for the development of complex structural mineral deposits. *Mine Surveying*, 2015, no. 1, pp. 10–15. In Rus.
  17. Blackmore Sh., Pedretti D., Mayer K.U., Smith L.B., Beckie R.D. Evaluation of single- and dual-porosity models for reproducing the release of external and internal tracers from heterogeneous waste-rock piles. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2018, vol. 214, pp. 65–74.
  18. Tuokuu Francis Xavier Dery, Kpinpuo Stephen Debar, Hinson Robert Ebo. Sustainable development in Ghana's gold mines: clarifying the stakeholder's perspective. *Sustainable development of mountain territories*, 2019, vol. 18, no. 2, pp. 77–84.
  19. Borujeni Mohammad Panahi, Gitinavard Hossein. Evaluating the sustainable mining contractor selection problems: An imprecise last aggregation preference selection index method. *Sustainable development of mountain territories*, 2017, vol. 16, no. 4, pp. 207–218.

Received: 3 June 2020.

#### Information about the authors

**Vladimir I. Golik**, Dr. Sc., professor, South-Russian State Polytechnic University.

**Yuri I. Razorenov**, Dr. Sc., professor, rector of the South Russian State Polytechnic University.

**Vladimir S. Brigida**, Cand. Sc., researcher, Mathematical Modeling of Natural Processes Laboratory, Federal Research Centre the Subtropical Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences.

**Olga G. Burdzieva**, Cand. Sc., head of the Laboratory, Geophysical Institute of Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences.

УДК 621.311.001.57, 338.001.36

## ПЕРСПЕКТИВЫ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА С РАСПРЕДЕЛЁННОЙ СОЛНЕЧНОЙ ГЕНЕРАЦИЕЙ

Лукутин Борис Владимирович<sup>1</sup>,  
lukutin48@mail.ru

Муравьев Дмитрий Игоревич<sup>1</sup>,  
dim15@tpu.ru

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

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью расширения вариантов автономных систем электроснабжения, в частности, фотоэлектрических, в рамках постановления правительства, связанного с ратификацией Россией Парижского соглашения по климату от 23.09.19. Системы электроснабжения постоянного тока с участием возобновляемых энергоисточников для децентрализованных потребителей могут стать предпочтительной альтернативой переменному току при условии соответствия большинству обязательств Парижского соглашения по климату, а также требованиям повышения энергетической безопасности.

**Цель:** повышение качества электрической энергии в распределительных сетях 0,4 кВ, декарбонизация окружающей среды от углеводородных энергоносителей, повышение энергетической безопасности автономной системы электроснабжения путём увеличения вклада в энергетический баланс возобновляемого энергоресурса, а также снижение стоимости вырабатываемой электрической энергии путём перехода с переменного на постоянный ток.

**Методы.** Ввиду сложности натурального исследования электроэнергетических систем с генерацией различной физической природы в качестве инструментов исследования были определены: математическое моделирование с последующей компьютерной реализацией в программных комплексах высокого уровня. Наиболее полно условиям моделирования отвечает MatLab, в частности, его приложение блочного моделирования Simulink и библиотека блоков SimPowerSystems.

**Результаты.** Разработан программный инструмент, позволяющий осуществлять имитационное моделирование режимов работы фото-дизельных систем электроснабжения, включая генерацию с учётом текущего электропотребления и инсоляции с целью определения рациональных технико-экономических параметров гибридных генерирующих систем; выявлены критерии целесообразности и эффективности построения фото-дизельных электрических систем на постоянном токе для электроснабжения удалённых потребителей.

### Ключевые слова:

Автономная энергетика, микросети, фото-дизельные системы, системы постоянного и переменного токов, распределённая генерация.

### Введение

Российские удалённые и малочисленные группы потребителей продолжают испытывать энергетическую нестабильность из-за медленных темпов расширения энергосистемы, вызванных низкой экономической активностью в этих регионах. Подобного рода небольшие энергоузлы, сформированные сельскими пунктами, имеют сложнейшие логистические схемы трансфера углеводородного топлива. В составе этих регионов необходимо выделить районы Сибири, Дальнего Востока и Крайнего Севера Российской Федерации. Отличительной особенностью упомянутых выше регионов является низкая плотность расселения людей на обширных территориях, слабо освоенных производственным звеном промышленного масштаба. Из-за удалённости, низкой плотности и неравномерного распределения населения, в сочетании с низким уровнем энергопотребления домашних хозяйств (установленная мощность от десятков киловатт до сотен киловатт в зависимости от количества жителей), электроснабжение таких посёлков возможно только построением изолированных систем с автономными энергоисточниками – обычно дизельными генераторами, нуждающимися в запасе дорогостоящего дизельного топлива. С другой стороны, современные

системы микрогенерации с интеллектуальной архитектурой управления способны обеспечить децентрализованного потребителя надёжным электроснабжением при снижении топливной зависимости прямого и косвенного порядков: трансфер первичного сырья, его переработка, доставка, хранение и др. [1].

Системы микрогенерации в условиях возросшей привлекательности интеграции возобновляемых источников энергии (ВИЭ) стали основной альтернативой развития децентрализованной энергосистемы, что позволяет домохозяйствам, муниципалитетам или энергетическим «игрокам» делать на первом этапе скромные инвестиции в свои энергосистемы, модифицировать их в соответствии с изменяющимися экономическими условиями и потребностями в электроэнергии. Авторы отмечают: подобные микросети, в рамках российской децентрализованной инфраструктуры, применяются преимущественно для электроснабжения предприятий сельскохозяйственного, горнодобывающего и сырьевого профиля: оленеводство, пушное звероводство, животноводство, промысел, рыболовство, земледелие, лесозаготовки и деревообработка, добыча руды, драгметаллов и др. Электроснабжение таких потребителей на базе ВИЭ в Российской Федерации уже состоялось, об этом свиде-



тельствуют последние источники [2–4]. Строительство и ввод в эксплуатацию фотоэлектрических станций (ФЭС) и ветряных электростанций (ВЭС) перестали быть сенсационными. Авторами подготовлена

таблица, структурирующая установленные мощности Единой энергетической системы Российской Федерации (ЕЭС РФ) [5]:

**Таблица 1.** Структура установленной мощности Единой Энергетической Системы России

**Table 1.** Installed capacity structure of the United Energy System of Russia

№ п/п/no.	2015		2016		2017		2018	
	Мощность (МВт) Capacity (MW)	Доля в ЕЭС (%) Share in the UES (%)	Мощность (МВт) Capacity (MW)	Доля в ЕЭС (%) Share in the UES (%)	Мощность (МВт) Capacity (MW)	Доля в ЕЭС (%) Share in the UES (%)	Мощность (МВт) Capacity (MW)	Доля в ЕЭС (%) Share in the UES (%)
1	160 233,3	68,1	160 242,2	67,8	162 779,7	67,9	164 586,6	67,7
2	47 855,2	20,3	48 085,9	20,3	48 449,7	20,2	48 506,3	19,9
3	27 146	11,5	27 929,4	11,8	27 914,3	11,6	29 132,2	12
4	60,2	0,03	75,2	0,03	534,2	0,22	834,2	0,4
5	10,9	0,01	10,9	0,01	134,4	0,06	183,9	0,08

Как видно из табл. 1, в которой 1 – тепловые электростанции (ТЭС), использующие уголь, природный газ, мазут и др., 2 – гидроэлектростанции (ГЭС), 3 – атомные электростанции (АЭС), 4, 5 – электростанции ФЭС и ВЭС соответственно, в общей структуре ЕЭС РФ вклад последних до сих пор невелик, но динамика их развития наглядна: прирост увеличивается кратно. Безусловно, генерация ВИЭ должна быть обоснована, в первую очередь, через социально-экономические индикаторы развития малонаселённых территорий: энергетическая безопасность, декарбонизация среды, качество электрической энергии, надёжность электроснабжения, качество жизни населения и др. Эти индикаторы должны быть подготовлены не только на базе правовой платформы, но и с помощью усовершенствования вариантов архитектуры автономных систем электроснабжения (АСЭС).

Данная работа собрала результаты исследований авторов фото-дизельных АСЭС переменного и посто-

янного тока. Акцент данной работы направлен на сравнительный анализ достоинств и недостатков децентрализованных фото-дизельных электрических станций (ФДЭС), построенных на постоянном и переменном токах, с точки зрения энергетической безопасности, коэффициента использования установленной мощности (КИУМ) энергетического оборудования, качества электроэнергии, а также экологических и экономических показателей.

В рамках последних исследований [6–8] рынок энергетической отрасли может принять к рассмотрению три возможных пути электрификации децентрализованных потребителей: расширение существующей централизованной электроэнергетической сети, протяжённость которой в Российской Федерации составляет более 2,7 млн км; развитие децентрализованной энергетики в виде локализованных микросетей или построение и совершенствование автономных систем электроснабжения.



**Рис. 1.** Экономически обоснованный тариф в централизованных и децентрализованных системах на примере Республики Саха (Якутия) [10]

**Fig. 1.** Economically sound tariff in centralized and decentralized systems as exemplified by the Republic of Sakha (Yakutia) [10]

Проблемы децентрализованной электрификации характерны не только для России. Например, по данным Международного энергетического агентства (англ. IEA – International Energy Agency), из 588 миллионов человек, проживающих в Африке, к югу от Сахары, лишь 30 % могут быть экономически эффективно электрифицированы путём расширения государственных централизованных сетей [9]. Оставшиеся 70 % населения экономически эффективно снабдить электроэнергией через микросети, где их доля составит 52,5 %, а через АСЭС – 17,5 %.

Сопоставляя мировой опыт с российской энергетической экономикой, авторы отмечают, что сегодня на 67 % децентрализованной территории проживает лишь 14 % населения страны. Указанные обстоятельства исключают возможность их централизованного энергоснабжения ввиду чрезвычайно высоких технических и экономических потерь при транспортировке электрической энергии [11] и несоответствия класса напряжения линий электропередачи передаваемой мощности ввиду больших расстояний и малых потребностей в электроэнергии. Самые распространённые микросистемы строятся в последнее время на базе дизельных электрических станций (ДЭС). Модульная природа технологий ДЭС позволяет осуществлять поэтапные запуски проектов, позволяя

коммунальным хозяйствам и муниципалитетам планировать свои скромные программы выработки электроэнергии, а также модифицировать свои системы в соответствии с изменяющимися потребностями. Стоимость электроэнергии от ДЭС чрезвычайно высока из-за большой отдалённости этих районов от поставщиков дизельного топлива: в соответствии с рис. 1 она может изменяться по Якутии от 17,6 до 36,3 р. за 1 кВт·ч в отличие от 3,2 до 6,6 р. в централизованной энергосистеме. Чтобы снизить топливную зависимость для местных энергетических компаний, в регионах разрабатываются проекты альтернативной энергетики, в том числе гибридные солнечно-дизельные станции.

Кроме высокой стоимости доставки в удалённые районы, наблюдается и устойчивый рост цен дизельного топлива на рынке. Динамика цен на дизельное топливо в России приведена на рис. 2. Кроме объективных причин удорожания нефти и нефтепродуктов лидеры в нефтяной отрасли Российской Федерации, такие как Роснефть, Лукойл и Газпром Нефть, зачастую устанавливают и поддерживают более высокие цены, а также создают дискриминационные условия доставки углеводородных товаров на рынок [12, 13]. Такие моменты наглядно выделены на графике (рис. 2).

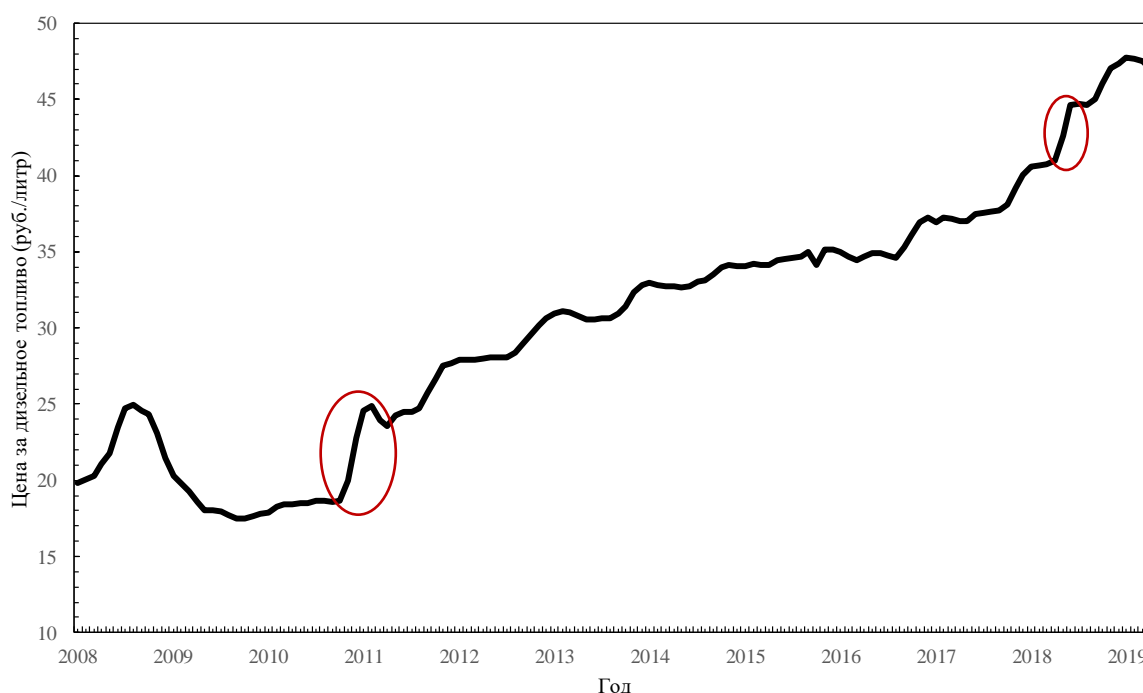


Рис. 2. Динамика цен на дизельное топливо в России с 2008 по 2019 гг. [12, 13]

Fig. 2. Dynamics of diesel fuel prices in Russia from 2008 to 2019 [12, 13]

Недавний рост цен на дизельное топливо, начавшийся с 2018 г., был вызван изменением налога на добавочную стоимость (НДС) в диапазоне от 0,6 до 1,7 %, в зависимости от поставщика сырья. Состав и природа местных энергетических источников, совокупность потребляемых мощностей, конфигурация энергетической системы и стоимость энергетического оборудования, а также гибкость систем микрогенера-

ции могут обеспечить приемлемые решения для электрификации децентрализованных районов. В частности, снижение цен на солнечные панели и другое оборудование возобновляемой энергетики, сопоставимое с темпами роста цен на дизельное топливо, выдвигает интересную задачу сравнения вариантов электроснабжения с генерирующими источниками различной физической природы. По оценкам [9] к

2030 г. будет возведено 400 ТВт установленной мощности для микрогенерации (в том числе электромобилей), что составляет около 40 % новых энергоисточников для всеобщей электрификации.

### Анализ микросетей постоянного тока

Общественно-коммунальная нагрузка нуждается в электроэнергии, в основном для питания небольших бытовых электроприборов, таких как осветительные приборы, зарядные устройства для смартфонов, небольшие телевизоры, стереосистемы, персональные компьютеры и др. Из рис. 3 можно увидеть, что бытовые приборы общего назначения, так или иначе, используют комбинированную природу тока. По данным [14] до 76 % потребностей бытового сектора могут быть электрифицированы через сети постоянного тока, где львиная доля электроэнергии приходится на нужды освещения и питание устройств 12 и 24 В номинального напряжения, что привлекательно с точки зрения электробезопасности. Логично прогнозировать развитие децентрализованных микросетей постоянно-

го тока, построенных на местных ВИЭ, в частности фото-электростанциях – производящих и аккумулирующих электроэнергию постоянного тока.

Микросети – локально ограниченные и независимо управляемые электрические сети, в которых разветвлённая архитектура способна обеспечить неравномерные нагрузки электрической энергией от распределённых энергетических источников [15]. Микросети предлагают достаточное количество преимуществ, способных привлечь на них внимание инвесторов, в сравнении с другими вариантами электрификации. В отличие от централизованной энергосистемы, они дешевле в установке, имеют более короткое время выполнения монтажа (для ФЭС пессимистический вариант может длиться не более 1 года), размеры, соответствующие местным требованиям, могут изменяться в зависимости от растущих потребностей или изменяющихся технологий. Микросистемы имеют много других потенциальных применений помимо питания домашних хозяйств и малых предприятий в соответствии с табл. 2.

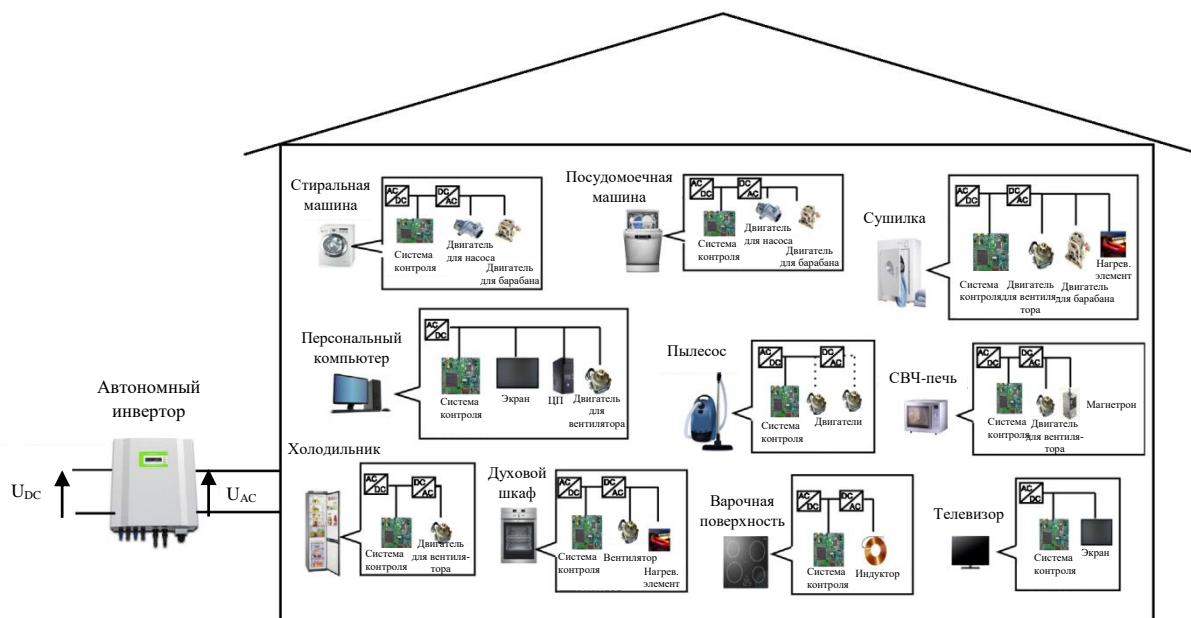


Рис. 3. Состав электрических нагрузок жилого дома [7]

Fig. 3. Composition of the electrical loads in a residential house [7]

По данным материалов [9, 15], а также информации, представленной в табл. 2, микросети можно разделить на две основные группы: микросети мощностью менее 10 кВт и от 10 кВт до 10 МВт. Каждая микросеть, вне зависимости от величины установленной мощности, состоит из системы выработки электроэнергии и её распределения в узлах электросети. Система выработки электроэнергии, в свою очередь, состоит из подсистем генерации и хранения. Распределение небольшой мощности (до 100 кВт включительно) состоит из подсистем распределения и потребления. Подсистема генерации включает в себя генератор энергии, стабилизаторы и преобразователи напряжения и технологии управления питанием. Подсистемы распределения включают сети для передачи

электроэнергии отдельным потребителям по кабельным линиям (КЛ) либо по воздушным линиям (ВЛ). Подсистемы потребления включают в себя все оборудование на стороне конечного потребителя после границы балансной принадлежности, то есть измерительные приборы, электропроводку, заземление и электрические нагрузки.

Микросеть может быть реализована на постоянном токе, переменном токе или на их комбинации. Важно, что сеть постоянного тока позволяет избежать многих шагов преобразования энергии, требуемых при использовании переменного тока, что, безусловно, приводит к повышению её технико-экономической эффективности. Традиционно переменный ток обеспечивает эффективное преобразование напряжения и высо-

ковольтную передачу энергии на большие расстояния. Однако в последнее время технологические достижения привели к появлению высокоэффективных преобразователей переменного тока в постоянный и наоборот, которые делают эффективной передачу мощности не только на переменном, но и на постоянном токе [15, 16]. Таким образом, распределение мощности по сетям постоянного тока, по мнению авторов данной работы, имеет определённый спектр преимуществ, а именно:

- более высокая эффективность энергосистемы из-за меньших потерь преобразования. Согласно [16], почти 30 % мощности на переменном токе реализуется через силовой электронный преобразователь (инвертор). Количество потерянной энергии варьируется в диапазоне 10–25 %.
- системы постоянного тока имеют особенность, ставшую тенденцией, быть модульными и масштабируемыми, по сравнению с системами переменного тока. Это объясняется большей простотой управления преобразователей постоянного тока, что обеспечивает большую гибкость при проектировании и расширении систем и, следовательно, более эффективное управление капиталовложениями.
- системы постоянного тока обладают большей пропускной способностью по сравнению с типичной системой переменного тока (следует отметить, что в постоянном токе реактивная мощность отсутствует). Компоненты системы постоянного тока более компактны, чем эквивалентные компоненты переменного тока, из-за отсутствия зависимости от частоты.
- доступное согласование прерывистых энергоресурсов, не требующих взаимной синхронизации. Это приводит к более высокой «живучести» при воздействии внешних и внутренних возмущений.
- большинство распределённых источников прерывистой генерации и устройств хранения электрической энергии имеют выходы постоянного тока, что делает архитектуру сети на базе постоянного тока естественно-интуитивным вариантом интеграции без преобразования.
- большинство современных нагрузок требуют источников питания постоянного тока.
- заинтересованность энергетического рынка в микросетях постоянного тока: микросети постоянного тока с распределёнными ФЭС, может принести экономию затрат, сокращение потерь, повышение качества электроэнергии, экономию топливного ресурса, снижение вредных выбросов в атмосферу, а также снижение себестоимости 1 кВт·ч электроэнергии.

Потери мощности в основном связаны с потерями в проводниках при преобразовании и транспортировке электроэнергии. Потери мощности в проводниках происходят из-за сопротивления на нагрев в системах постоянного и переменного тока. В сетях постоянного тока они могут быть описаны с помощью аналитической формулы:

**Таблица 2.** Потенциальные области применения микро-сетей постоянного тока в развивающихся электроэнергетических системах

**Table 2.** Potential applications of direct current microgrids in developing power systems

Область применения Area of application	Примеры Examples
После стихийных бедствий Disaster relief	<ul style="list-style-type: none"> <li>• временные лагеря после оползней, наводнений, пожаров и др.; temporary camps after landslides, floods, fires, etc.;</li> <li>• строительные площадки, военные объекты; construction sites, military facilities;</li> <li>• снабжение насосов для накачки воды во время засухи; supply of pumps for pumping water during drought.</li> </ul>
Курортно-заповедные зоны Resort areas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• удалённые детские игровые лагеря; remote children's game camps;</li> <li>• заповедники; nature reserves;</li> <li>• отели и курорты; hotels and resorts.</li> </ul>
Цели местного производства близ удалённых потребителей Local production targets near remote consumers	<ul style="list-style-type: none"> <li>• производство продуктов питания для нужд сельского хозяйства, а также для продажи; agriculture and food production;</li> <li>• снабжение малых производственных предприятий; supply of small manufacturing enterprises;</li> <li>• сфера обслуживания (магазины, парикмахерские, автомастерские и др.); service sector (bars, restaurants, barber shops and salons, charging stations for mobile phones, etc.)</li> <li>• хранение продуктов (охлаждение); food preservation (refrigeration).</li> </ul>
Общее пользование Common usage	<ul style="list-style-type: none"> <li>• уличное и общественное освещение; public lighting;</li> <li>• школы, детские сады; schools, kindergarten;</li> <li>• больницы, центры здоровья и др.; hospitals, health centers, etc.</li> </ul>

$$\Delta P_{DC} = R \frac{P^2}{U_{DC}^2}, \quad (1)$$

где  $P$  – передаваемая мощность по проводнику [Вт];  $R$  – активное сопротивление проводника [Ом];  $U_{DC}$  – уровень напряжения [В].

Аналогичное выражение в сетях переменного тока может быть сформировано по тому же принципу:

$$\Delta P_{AC} = R \cdot \frac{P^2}{U_{RMS}^2 \cdot \cos^2 \varphi}, \quad (2)$$

где  $U_{RMS}$  – действующее напряжение сети [В];  $\cos \varphi$  – коэффициент мощности.

Отношение (1) к (2) определяется как:

$$\frac{\Delta P_{DC}}{\Delta P_{AC}} = \frac{U_{RMS}^2}{U_{DC}^2} \cdot \cos^2 \varphi. \quad (3)$$

Из отношения (3) можно заключить, что системы постоянного тока обеспечивают меньшие потери при транспортировке электроэнергии, чем системы переменного тока с одинаковыми передаваемой мощностью, материалом проводника, количеством проводов линии электропередачи.

Падение напряжения в сети постоянного тока описывается следующим образом:

$$\delta U_y^{DC} = R \cdot \frac{P}{U_{DC}}. \quad (4)$$

В сетях переменного тока это описывается как:

$$\delta U_y^{AC} = \frac{P}{U_{RMS}} \cdot Z, \quad (5)$$

где  $Z$  – полное сопротивление проводника [Ом].

Отношение (4) к (5) определяется как:

$$\frac{\delta U_y^{DC}}{\delta U_y^{AC}} = \frac{R}{Z}. \quad (6)$$

Исходя из (3) и (6), потери мощности и падение напряжения в сетях постоянного тока ниже, чем в сетях переменного тока при прочих равных условиях. Помимо потерь электрической энергии при передаче существуют также потери преобразования в инверторах и выпрямителях, например для преобразования постоянного тока фото-электростанции в переменный ток. Приблизительная экономия энергии за счет использования технологий постоянного тока представлена в работе [17]. Для общественно-коммунального сектора использование данной технологии приводит к средней экономии электроэнергии на 33 %.

#### Моделирование автономной фото-дизельной системы электроснабжения постоянного и переменного токов

К анализу принимаются две ФДЭС одинакового состава потребителей, построенные на переменном и постоянном токах. Технические характеристики соот-

ветствуют рис. 4. Системы моделируются в пакете Matlab/Simulink с расширением MS Excel для сравнительного анализа технико-экономических характеристик. Предполагается, что данные энергосистемы имеют одинаковую длину распределительной сети и, следовательно, одинаковую стоимость ВЛ. Основными расходами являются эксплуатационные затраты, связанные с потерями при преобразовании, транспортировке энергии и капитальные затраты на оборудование, включая провода, амортизационные отчисления, преобразователи и др.

По причине высоких инвестиционных составляющих на строительство и топливо АСЭС на базе ФДЭС необходимо определить параметры основных компонентов системы электроснабжения, а именно: ДЭС, ФЭС, система накопления электрической энергии (СНЭЭ), инверторы, выпрямители и др. Технико-экономические показатели данных систем могут быть установлены методами математической аппроксимации стоимости оборудования различных производителей, представленного на рынке. Рис. 4 описывает исследуемые ФДЭС, где ДЭС – дизельная электростанция,  $Z_{лк}$  – комплексное сопротивление участка ВЛ,  $R_{лк}$  – активное сопротивление участка ВЛ,  $H_k$  – нагрузка участка ВЛ, СИ – сетевой инвертор, П – статические преобразователи напряжения, К – ключи коммутации, В – выпрямитель, ФЭС – фотоэлектростанция.

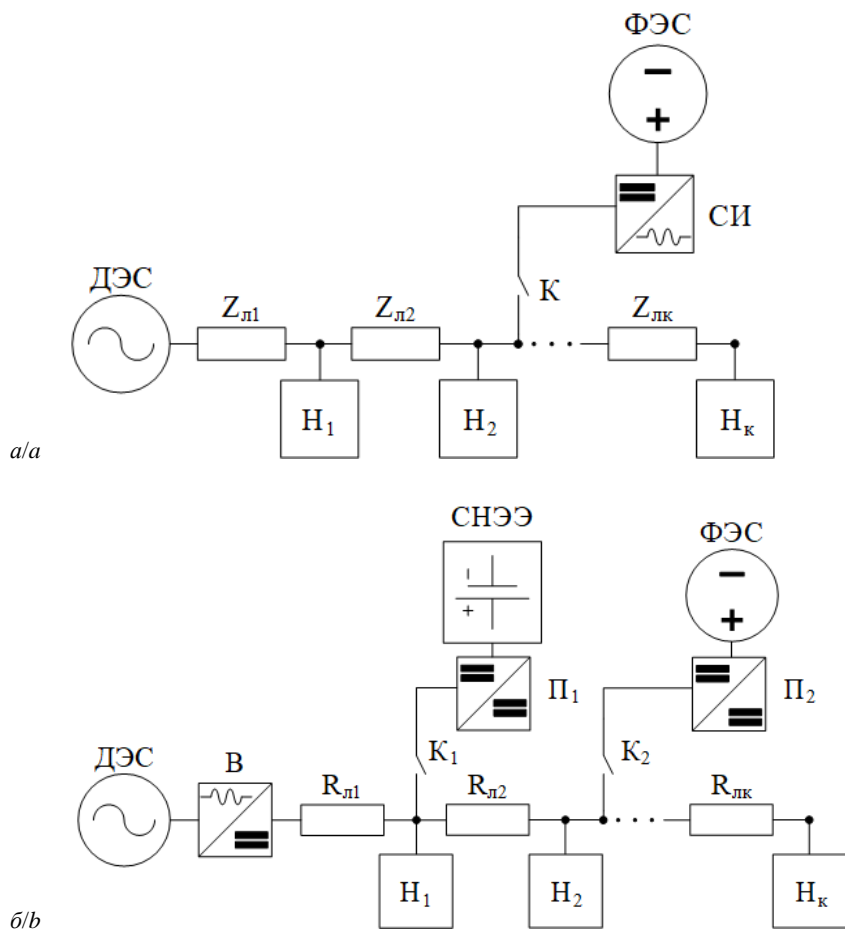


Рис. 4. Структурная схема фото-дизельных электрических станций переменного (а) и постоянного (б) тока  
 Fig. 4. Block diagram of photo-diesel power plants of alternating (a) and direct (b) current

ФДЭС переменного тока работает по следующему алгоритму: ДЭС является опорным источником электроэнергии питающей сети, в свою очередь, ФЭС – замещающий часть генерации ведомый источник электрической энергии в дневное время суток. Данное распределение функциональных обязанностей обеспечивает определённую экономию топлива. В ночное время суток ФЭС отключается коммутирующим ключом, не внося свой вклад в выработку.

Авторы подчёркивают особенность данной конфигурации ФДЭС: помимо простоты схемы, АСЭС на переменном токе отличается невысокой стоимостью используемого оборудования, а также низкой стоимостью эксплуатации фотоэлектрической части. Данное преимущество достигается отсутствием СНЭЭ. Однако недостатком данной схемы является низкий уровень замещения выработки электроэнергии от опорного источника. Из соображения устойчивости системы текущая мощность генерации ФЭС не должна превышать 30–40 % мощности генерации от ДЭС. Для исследуемого примера параметры данной АСЭС следующие:

- трёхфазная ДГУ с установленной мощностью каждой фазы в 100 кВт. Удельный расход топлива составляет 202 г/кВт·ч, номинальный расход – 26 кг/ч, коэффициент технического использования – 0,95, количество моточасов – 25000.
- монокристаллические фотопанели с показателем эффективности в 18 %. Производительность монокристаллических панелей падает при высоких температурах на 10–15 %, срок службы лежит в диапазоне от 25 до 30 лет. Требуемая территория отведения от 6 до 9 м<sup>2</sup>/кВт. Номинальная мощность фотопанели – 200 Вт, количество фотопанелей на фазу – 156 шт., номинальное напряжение – 24 В, а ток точки максимальной мощности – 5,56 А.
- диапазон изменения установленных мощностей потребителей составляет от 5 до 20 % установленной мощности фазы ДГУ. Территориальное расположение объекта электрификации – Иркутская область, 58° с.ш.

Алгоритм работы ФДЭС постоянного тока определяется суточным изменением инсоляции. При достаточном уровне освещённости фотоэлектрических модулей потребители получают электроэнергию от двух источников постоянного тока и напряжения: выпрямителя ДЭС и статического DC-DC преобразователя напряжения ФЭС. Для обеспечения параллельной работы данных вентильных источников постоянного тока ДЭС работает в режиме источника напряжения, а ФЭС – в режиме источника тока, поддерживая максимальный съём энергии с фотоэлектрических модулей.

Соотношение установленных мощностей этих источников электроэнергии может быть разным. Например, в рассматриваемом примере – одинаковым (100 кВт). При этом авторы отмечают, что при наличии достаточной освещённости вклад ФЭС может превышать генерацию от ДЭС. Таким образом, благодаря отсутствию ограничений на мощность сетево-

го инвертора в АСЭС переменного тока уровень замещения дизельной генерации в ФДЭС постоянного тока значительно выше, чем в конфигурации другого исполнения.

При недостаточной освещённости с помощью ключа  $K_2$  ФЭС отключается и нагрузки запитываются только от ДЭС. Наличие СНЭЭ позволяет запасти излишки электроэнергии, генерируемые ФЭС в часы максимальной инсоляции, и отдать их в локальную сеть в периоды времени, различные с точки зрения загрузки генерирующего оборудования, например, в утренние и вечерние часы. Для исследуемого примера параметры АСЭС на постоянном токе следующие:

- параметры ДГУ остаются без изменений.
- параметры монокристаллических фотопанелей без изменений, количество – 450 шт.
- нагрузочные характеристики изменяются в тех же пределах, что и в системе переменного тока.

**Таблица 3.** Параметры, принимаемые для целей экономического сравнения

**Table 3.** Parameters for the economic comparison

Параметр Parameter	Единица и значение Value and unit	Пояснение Description
$C_{PV}$	140000 р/кВт (rub/kWh)	Инвестиции в кВт/пик ФЭС, в составе которой фотоэлектрические преобразователи, инверторы и др. компоненты Capital cost of the PV array as well as extra equipment: inverters, converters, etc.
$C_{Stor}$	60 р/А·ч (rub/Ah)	Инвестиции в общую ёмкость системы накопления, в составе которой контроллеры заряда, система датчиков и др. компоненты Capital cost of the battery as well as charge controller, sensor system, etc.
$C_{maint}$	160000 р/год (rub/year)	Стоимость эксплуатации и обслуживания генерирующего и распределительного оборудования Operations and maintenance cost of distributed and generated equipment
$C_{fuel}$	40000 р/т (rub/t)	Расходы на топливо Fuel costs
$K_{PV}$	0,5 %/год (year)	Фактор деградации производительности фотопанелей в год Degradation factor of photovoltaic panels per year
L	1 км/км	Длина распределительных линий электропередачи исследуемой модели Length of transmission lines in the researched model
i	12 %	Ставка дисконтирования инвестиционного проекта Discounted rate of an investment project
$C_{DPP}$	11000 р/кВт (rub/kW)	Стоимость установленной мощности комплектной дизель-генераторной установки (ДГУ) Cost of installed capacity of a complete diesel generator unit (DGU)

Разработанные модели позволяют проводить технико-экономический анализ проекта с отслеживанием поведения системы в условиях неравномерных нагрузок и изменяющейся инсоляции в течение средних суток по сезонам. Модель ФЭС основана на выходных характеристиках фотоэлектрических модулей,

которые представлены в виде блока подсистемы в Matlab/Simulink. Для построения модели ФЭС использовалась методика, предложенная в [18, 19], согласно которой максимальная выходная мощность ФЭС определяется по выражению:

$$P_{\text{ФЭС}} = \frac{C_F \cdot N \cdot G \cdot \ln(10^6 \cdot G)}{T_{\text{ФЭС}}}, \quad (7)$$

где  $N$  – количество фотоэлектрических модулей в станции;  $C_F$  – постоянный коэффициент в параметрах фотоэлектрического модуля;  $G$  – текущий уровень инсоляции, [Вт/м<sup>2</sup>];  $T_{\text{ФЭС}}$  – текущая температура фотоэлектрического модуля.

ФЭС с МРРТ (*англ.* Maximum Power Point Tracking) солнечным контроллером эквивалентруется управляемым источником постоянного тока, который может подключаться к различным точкам сети. Массив солнечных панелей, входящих в состав подсистемы ФЭС, подключен к распределительной сети через сетевой инвертор либо через статический DC-DC преобразователь в варианте постоянного тока. Инвертор и DC-DC преобразователи в предлагаемой модели представляются статическими передаточными характеристиками.

Для моделирования системы аккумулирования электрической энергии использован метод, основанный на обобщенном соотношении Шеферда [20, 21]:

$$U_{\text{СНЭЭ}} = E_0 - \frac{MQ}{(Q - \int idt)} - Ri + Ae^{(-B \cdot \int idt)}, \quad (8)$$

где  $U_{\text{СНЭЭ}}$  – напряжение массива аккумуляторов [В];  $E_0$  – напряжение холостого хода ненагруженного массива [В];  $M$  – поляризационное сопротивление [Ом];  $Q$  – фактическая емкость массива [А·ч];  $\int idt$  – действительный уровень заряда аккумуляторного массива [А·ч];  $i$  – ток батареи [А];  $R$  – внутреннее сопротивление аккумулятора [Ом];  $A$  – коэффициент, характеризующий величину падения напряжения во время экспоненциальной зоны разряда [В];  $B$  – коэффициент, характеризующий обратную величину емкости массива в конце экспоненциальной зоны разряда [А·ч]<sup>-1</sup>.

СНЭЭ обеспечивает согласование графиков потребления и генерации путем обмена вырабатываемой и потребляемой мощности в течение суток. Данный принцип позволяет реализовать интеллектуальное управление СНЭЭ:

- режим заряда (приёма мощности). Заряд аккумуляторных батарей (АКБ) производится как по технологическим причинам (анализ внешних факторов, анализ системы управления состоянием элементов АКБ по параметру *англ.* SoC – State of Charge), так и для осуществления алгоритмов приёма мощности для дозагрузки ДЭС в необходимом диапазоне. При заряде ток протекает через преобразователь к подсистеме хранения АКБ.
- режим выдачи энергии в нагрузку параллельно с ДЭС и ФЭС (режим источника напряжения). Интеллектуальная функция данного режима состоит в оптимизации текущей генерируемой мощности в

АСЭС и обеспечении стабилизации напряжения в сети у потребителей.

Для целей моделирования ДЭС эквивалентруется управляемым источником постоянного или переменного напряжения [1, 21]. На рис. 4, б представлена блок-схема Simulink-модели постоянного тока, где энергия, распределяемая по всем потребителям, однородна. Распределение входной электроэнергии по различным электроприёмникам предполагается с помощью статических преобразователей. Более подробное описание блоков представлено в работе [22].

В системах электроснабжения постоянного тока дизельный генератор подключен к распределительной сети через полупроводниковый выпрямитель, фотоэлектрические модули – через статические преобразователи [22, 23] с возможностями отслеживания их максимальной мощности в зависимости от инсоляции и температурного режима. По своим выходным характеристикам ФЭС могут замещаться управляемым источником тока. Дизельный генератор – источником напряжения.

При моделировании работа различных электроприёмников объектов в сельской местности учитывалась по различным фазам суток с интервалом в один час. Формирование графиков нагрузок осуществляется в соответствии с нормативными типовыми графиками реальных электрических нагрузок [24].

В конфигурации системы электроснабжения на переменном токе напряжение постоянного тока, генерируемое ФЭС, преобразуется в переменный ток сетевым инвертором и распределяется параллельно с ДЭС по всей сети. Параметры распределительной сети эквивалентированы активно-индуктивными сопротивлениями [25]. Фото-электростанция извлекает максимальную мощность из фотоэлектрической матрицы на напряжении 500 В постоянного тока, инвертирует напряжение 500 В до уровня 220 В переменного однофазного тока, а затем подает его в распределительную сеть.

#### Результаты исследования

В этом разделе авторы путём моделирования сопоставляют обозначенные варианты микросетей постоянного или переменного тока. Имитационная модель позволяет исследовать режимы автономных систем электроснабжения переменного или постоянного тока в принятом масштабе времени: сутки соответствуют времени моделирования 10 с. Экономическое обоснование проекта принимается по максимальному сроку службы генерирующего оборудования, в частности, фотоэлектрических преобразователей – 20 лет. Срок службы ДЭС определяется количеством моточасов эксплуатации дизельных генераторов. С учётом резерва дизельных генераторов в составе ДЭС, реальных условий их эксплуатации, их оптимальной загрузки, планового ремонта и обслуживания период эксплуатации ДЭС принят близким к сроку ФЭС. С учётом данных условий, а также информации, приведённой в табл. 3, в пакете MS Excel рассчитываются главные технико-экономические параметры систем электроснабжения, приведённые в табл. 4.

**Таблица 4.** Техничко-экономические показатели вариантов исполнения фото-дизельной станции, полученные по результатам моделирования

**Table 4.** Simulation results of the technical and economic indicators of the options of the photo-diesel plant configuration

Номер Number	Инвестиции, тыс. р. Investments, ths. rub.	Снижение вред- ных выбросов, т/год Mitigation of atmospheric pollu- tants, t/year	Снижение тарифа, % Decreasing of tariff, %	ЧПС, тыс. р. NPV, ths. rub.	КИУМ, % ICUF, %
1	12 000	1,1	9,3	8 000	17,7
2	21 000	5,5	17	10 200	22

Одними из основных индикаторов сопоставления вариантов систем электроснабжения являются чистая приведённая стоимость (ЧПС) и КИУМ (англ. ICUF – Installed Capacity Utilization Factor). КИУМ – коэффициент использования установленной мощности, энергетического оборудования. Определяется как отношение фактической выработки энергии к теоретической, по выражению:

$$КИУМ = \frac{W}{P_{уст} \cdot T}, \quad (9)$$

где  $W$  – объём энергии, произведенный составной частью гибридной электростанции (ФЭС), за отсчетный период времени, [кВт·ч];  $P_{уст}$  – установленная мощность составной части гибридного комплекса, [кВт];  $T$  – отсчетный период времени, [ч].

Исходя из расчётов (7)–(9), а также других технико-экономических показателей, сформирована табл. 4, в которой 1 – фото-дизельная система электроснабжения на переменном токе, 2 – на постоянном токе, авторы подчёркивают, что с точки зрения затрат минусом системы электроснабжения постоянного тока являются значительные инвестиции на СНЭЭ. Доля СНЭЭ может составлять более 40 % от суммарных инвестиций в проект. Преимуществом обоих вариантов конфигурации является конкурентная особенность, позволяющая получать более дешёвую электроэнергию по сравнению с растущими розничными ценами на электроэнергию. Прирост КИУМ в варианте 2 вызван большим уровнем генерации от ФЭС, который не имеет ограничения из соображений устойчивости параллельной работы сетевого инвертора ФЭС с ДЭС.

Одним из главных условий алгоритма интеллектуального управления режимами ДЭС, ФЭС и СНЭЭ в гибридной системе электроснабжения является оптимизация нагрузки ДЭС на определённом участке установленной мощности. Линейное возрастание абсолютного расхода дизельного топлива, а также линейное убывание удельного расхода аппроксимировано с помощью функции корреляционно-регрессионного анализа MS Excel, уровень достоверности которого близок к единице. По данным корреляционно-регрессионного анализа авторы рассчитали величины абсолютного расхода топлива, которые учитываются в дальнейших расчётах, в частности в зависимости (10).

Стандартная финансовая модель проектов основана на оценке ЧПС. Инвестор принимает инвестиционный проект только в том случае, если у проекта ЧПС больше или, по крайней мере, равен нулю. ЧПС, равный нулю, означает, что инвестор получает ту же норму прибыли, что и в случае других возможных альтернативных инвестиций и, следовательно, ЧПС, равный нулю, представляет собой границу для принятия решения. Данное условие является определяющим в вопросе снижения стоимости 1 кВт·ч электроэнергии, а также в вопросе декарбонизации окружающей среды. Аналитическая зависимость ЧПС определена с помощью следующего выражения:

$$\begin{aligned} \text{ЧПС} &= \sum_{t=1}^T \text{ДП}_t \cdot (1 + r\%)^{-t} = \\ &= \sum_{t=1}^T (p_{new,t} \cdot Q_t + S_t - E_t) \cdot (1 + IRR)^{-t} = 0, \quad (10) \end{aligned}$$

где  $t$  – текущий год эксплуатации проекта;  $\text{ДП}_t$  – генерируемый денежный поток текущего года эксплуатации [тыс. р.];  $r\%$  – ставка дисконтирования, которая рассчитывается по модели CAPM (англ. Capital Asset Pricing Model) либо как ставка кредита нефинансовым организациям по данным Центрального банка России;  $p_{new,t}$  – новая цена электроэнергии для конкретного потребителя в году  $t$  [р./кВт·ч];  $Q_t$  – количество энергии, потребляемое нагрузкой [кВт·ч/год];  $S_t$  – выгоды от интеграции ФЭС (субсидия, сокращение затрат на топливо, сокращение потерь на передачу электроэнергии, продажа излишков электроэнергии в сеть, снижение вредных выбросов и др.) [р.];  $E_t$  – проектные издержки в год  $t$  [р.];  $IRR$  – внутренняя норма доходности (англ. IRR – Internal Rate of Return);  $T$  – временной горизонт проекта [лет].

Но формулу (10) можно применять в обратном порядке, например, чтобы установить ЧПС проекта на нуль (это определение IRR), а затем найти снижение цены на электроэнергию. Эта цена представляет собой выгоду от интеграции ФЭС (снижение затрат на топливо, уменьшение потерь при передаче и др.). В ходе моделирования общее количество домохозяйств ежегодно не изменялось, но учитывалась годовая индексация цен на дизельное топливо в показателе  $E_t$  (рис. 2). Численное моделирование зависимости (10) в пакете MS Excel показало снижение тарифа в варианте переменного тока с 44,9 до 40,7 р/кВт·ч, тогда как система на постоянном токе достигла результата 37,3 р/кВт·ч.

Показатели снижения тарифа на электроэнергию и уровня выбросов в атмосферу производных продуктов углеводородистого энергоносителя не могут рассматриваться в полной картине анализа без технических улучшений, особенно при возрастающих требованиях к энергетической безопасности. Микросеть постоянного тока с централизованным аккумулированием электроэнергии является не самыми дешёвым вариантом для децентрализованных районов часто стагнирующей инвестиционной средой, что предполагает взвешенные решения по выбору конфигурации микросетей.





Рис. 5. Результаты технических показателей компьютерного моделирования  
Fig. 5. Results of technical indicators in Matlab/Simulink model

Тем не менее, на основании технических показателей рис. 5, можно заключить что их улучшение, а также повышение энергетической безопасности АСЭС могут определить выбор проекта системы с ФЭС с перспективой его выполнения на постоянном токе. В частности, спроектированная фото-дизельная система электроснабжения переменного тока с максимально допустимым падением напряжения в 10 % при питании только от ДЭС не обеспечивает требований ГОСТ на качество электроэнергии. Исследование по падению напряжения ( $\delta U_y$ ) проводилось в конце участка ВЛ. При переводе фото-дизельной системы электроснабжения на постоянный ток падение напряжения на ВЛ дополнительно снижается, что позволит увеличить допустимое расстояние транспортировки электроэнергии при прочих равных условиях. Авторы подчёркивают, что данные по уровню  $\delta U_y$ , данные по потерям электроэнергии в проводниках ( $\Delta P_{\text{л}}$ ) получены в условиях переменных нагрузок для различных сезонов года, что не было учтено в предыдущих работах [26, 27].

С точки зрения энергетической безопасности АСЭС постоянного тока обладает существенным преимуществом по сравнению с системой переменного тока, заключающемся в отсутствии необходимости синхронизации между опорным энергоисточником – дизельной электростанцией и сетевым инвертором ФЭС. Это исключает необходимость учитывать так называемое искусственное ограничение на выработку мгновенной мощности ФЭС, к примеру, когда летняя или весенняя инсоляция максимальны, а электропотребление минимально. Это ограничение необходимо для обеспечения условия устойчивости между опорным и вспомогательными источниками [28], что, безусловно, снижает генерацию и, соответственно, КИУМ энергоисточника ВИЭ в системе электроснабжения переменного тока.

#### Заключение

В данной работе сравниваются фото-дизельные системы электроснабжения постоянного и переменного тока для электрификации удалённых сельских районов с точки зрения затрат, эффективности и энергетической безопасности.

Исследование показало, что потери мощности в распределительных сетях, а также потери при преобразовании электроэнергии являются значительными

величинами в микросетях и составляют одну из важнейших частей операционных издержек при эксплуатации. При переходе с переменного тока на постоянный потери мощности в распределительных сетях рассматриваемого примера удалось сократить на 6,8 %, падение напряжения – на 3 %.

За счёт сокращения этапов преобразования электроэнергии и отсутствия реактивной мощности в сети постоянного тока фото-дизельные системы экономически перспективны для электрификации удалённых регионов. Экономическая эффективность дизельной электрической станции достигается оптимальной загрузкой в результате интеллектуального управления режимами генерирующих установок и СНЭЭ. Управление позволило уменьшить стоимость 1 кВт·ч электроэнергии с 40,7 р/кВт·ч на переменном токе до 37,3 р/кВт·ч на постоянном, что на 8,4 % эффективнее.

Оптимизация режима дизельной электрической станции позволила снизить уровень вредных выбросов в атмосферу: углекислый газ, диоксид азота, гидрокарбонаты. Большая энергетическая безопасность систем постоянного тока, а также гибкость построения таких конфигураций в сочетании с улучшенными технико-экономическими характеристиками способна привлечь на себя внимание владельцев дизельных электрических станций в муниципалитетах или иных заинтересованных инвесторов.

Результаты подчеркнули сущность разницы обеспечения стабильности поставки электрической энергии в вариантах постоянного и переменного токов: конфигурация сети переменного тока напрямую зависит от работоспособности опорного источника через сетевой инвертор. Безусловно, это является большой уязвимостью системы переменного тока с сетевым инвертором. Учитывая выводы работы [29], вопрос энергетической безопасности способен сменить вектор предпочтений потребителей, обеспокоенных вопросом стабильности и безопасности поставок электроэнергии, в сторону постоянного тока.

Также авторы выделяют возможные пути развития и совершенствования систем постоянного тока с использованием инверторных дизельных электрических станций на переменной частоте вращения, а также с рассмотрением комбинированных систем накопления электрической энергии для компенсации пиковой мощности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лукутин Б.В. Интеллектуальные системы электроснабжения с ветровыми и солнечными электростанциями. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2019. – 115 с.
2. Драчёв В. Три солнечные электростанции общей мощностью 45 МВт запустили в Бурятии // ТАСС. 2019. URL: <https://tass.ru/ekonomika/7056227> (дата обращения 14.12.2019).
3. Шамоков Р. Две солнечные электростанции запустили в Чите // ТАСС. 2019. URL: <https://tass.ru/ekonomika/7065192> (дата обращения 14.12.2019).
4. Интернет-портал общества ТЭК. В арктическом поселке Тикси смонтировали первую ветроустановку // EnergyLand.info. 2018. URL: <http://energyland.info/news-showtek-alternate-175862> (дата обращения 14.12.2019).
5. Марцинкевич Б. Развитие ВИЭ энергетики в России // Геоэнергетика.ру. 2019. URL: <http://geoenergetics.ru/2019/09/27/razvitiye-vie-energetiki-v-rossii/> (дата обращения 14.12.2019).
6. Opiyo N.N. A comparison of DC- versus AC-based minigrids for cost-effective electrification of rural developing communities // Energy Reports Journal. – 2019. – V. 5. – P. 398–408. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.04.001>.
7. AC and DC technology in microgrids: a review / E. Planas, J. Andreu, J.I. Gárate, I.M. Alegría, E. Ibarra // Renewable and Sustainable Energy Reviews Journal. – 2015. – V. 43. – P. 726–449. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.067>.
8. Суржикова О.А. Проблемы и основные направления развития электроснабжения удаленных и малонаселенных потребителей России // Вестник науки Сибири. – 2012. – № 3 (4). – С. 103–108. URL: <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/16065> (дата обращения 14.12.2019).
9. World Energy Outlook // IEA. 2018. URL: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2018> (дата обращения 14.12.2019).
10. Энергоснабжение изолированных территорий в России и мире / В. Гимади, А. Курдин, Д. Нестер, А. Амирагян, О. Колобов, С. Пих, И. Поминова, А. Мартынюк, А. Кутузова // Аналитический центр при Правительстве Российской Федерации. Энергетический бюллетень. – 2017. – № 51. – С. 14–18.
11. Пятков П.Ю. Потери мощности и электроэнергии в электрических сетях. – Екатеринбург: Изд-во: УрГУПС, 2009. – 36 с.
12. Цены на солярку: полный абсурд и наглость // Авто Mail.ru. 2011. URL: [https://auto.mail.ru/article/34055-ceny\\_na\\_solyarku\\_polnyi\\_absurd\\_i\\_naglost/](https://auto.mail.ru/article/34055-ceny_na_solyarku_polnyi_absurd_i_naglost/) (дата обращения 14.12.2019).
13. Мордюшенко О. Дизель разогревает цены // Газета КОММЕРСАНТЪ. 2017. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/3408522> (дата обращения 14.12.2019).
14. Fairley P. DC versus AC: the second war of currents has already begun [in my view] // IEEE Power and Energy Magazine. – 2012. – V. 10 (6). – P. 102–104.
15. Opiyo N.N. Droop control methods for PV-based minigrids with different line resistances and impedances // Sustainable Energy Grids Netw. – 2018. – V. 9 (6). – P. 101–112.
16. Vallve X., Serrasolses J. Design and operation of a 50 kWp PV rural electrification project for remote sites in Spain // Sol. Energy Journal. – 1997. – V. 59. – P. 111–119.
17. Vossos V., Pantano S., Heard R. DC Appliances and DC power distribution // A bridge to the future net zero energy homes. – Berkeley, California: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2017. – P. 1–14.
18. Jones A.D., Underwood C.P. A thermal model for photovoltaic systems // Solar Energy. – 2001. – V. 70 (4). – P. 349–359.
19. Liu B.Y.H., Jordan R.C., Daily insolation on surfaces tilted towards the equator // ASHRAE Journal. – 1961. – V. 3. – P. 53–59.
20. Shepard C.M. Design of primary and secondary cells. P. 2. An equation describing battery discharge // Journal of Electrochemical Society. – 1965. – V. 112. – P. 657–664.
21. Обухов С.Г., Плотников И.А. Имитационная модель режимов работы автономной фотоэлектрической станции с учетом реальных условий эксплуатации // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 6. – С. 38–51.
22. Lukutin B., Muravyev D. Stand-alone power supply system with DC photo-diesel source // E3S Web of Conferences. – 2019. – V. 114. – P. 1–6.
23. Лукутин Б.В., Муравьев И.О., Плотников И.А. Децентрализованные системы электроснабжения с ветровыми и солнечными электростанциями. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2015. – 100 с.
24. Инструкция по проектированию городских электрических сетей. РД 34.20.185-94. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 48 с.
25. Lukutin B.V., Shandarova E.B., Makarova A.F., Shartsman I.B. Effect of distributed photovoltaic generation on the voltage magnitude in a self-contained power supply system // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – Tomsk, 2016. – Vol. 127. – P. 1–7.
26. Пашкевич Р.И., Павлов К.А. Математическое моделирование комбинированной дизель-солнечной электростанции для децентрализованного электроснабжения потребителей // Электрические станции. Возобновляемая энергетика – 2019. – № 9. – С. 30–35.
27. Лаврик А.Ю., Жуковский Ю.Л., Максимов Н.А. Определение оптимального состава резервируемой гибридной ветро-солнечной электростанции // Промышленная энергетика – 2019. – № 10. – С. 47–53.
28. Дмитриенко В.Н., Лукутин Б.В. Методика оценки энергии солнечного излучения для фотоэлектростанции // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 5. – С. 49–55.
29. Киушкина В.Р. Повышение энергетической безопасности децентрализованных зон электроснабжения регионов северных территорий и арктических зон (на примере Республики Саха (Якутия)): дис. ... д-ра техн. наук. – Нерюнгри, 2019. – 400 с.

Поступила 17.12.2019 г.

## Информация об авторах

**Лукутин Б.В.**, доктор технических наук, профессор отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Муравьев Д.И.**, аспирант отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 621.311.001.57, 338.001.36

## PROSPECTS FOR DECENTRALIZED DC SYSTEMS WITH DISTRIBUTED SOLAR GENERATION

Boris V. Lukutin<sup>1</sup>,  
lukutin48@mail.ruDmitry I. Muravyev<sup>1</sup>,  
dim15@tpu.ru<sup>1</sup> National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

**The relevance** of the research is caused by the need to extend options for stand-alone power supply systems. Photovoltaic is a part of a government decree related to the ratification by Russia of the Paris climate agreement of 23.09.19. DC power supply systems with the integration of renewable energy sources for decentralized consumers can be the preferred alternative to AC. By using this, that most of the Paris Climate Agreement obligations would be met, as well as requirements for improving energy safety.

**The main aim** of the research is improving the quality of electric energy in 0,4 kV distribution networks, decarbonizing the environment from hydrocarbon pollutions, increasing the energy security of a stand-alone power supply system by increasing the contribution to the energy balance of renewable energy resources, as well as reducing the cost of generated electric energy, in the frame of transition from AC to DC.

**Methodology.** Due to the complexity of the full-scale study of electric power systems with the generation of various physical nature, the following research tools were identified: mathematical modelling with subsequent computer implementation in high-level software systems. Among the extensive range of software tools, MatLab meets the most complete simulation conditions, in particular, its Simulink modelling application with support for transient tracking – the SimPowerSystems library.

**Results.** The authors have developed the software tool that allows simulating the operating modes of photo-diesel power supply systems, including generation with current power consumption and insolation in order to determine the rational technical and economic parameters of hybrid generating systems; identified the criteria for the feasibility and effectiveness of designing photo-diesel systems with DC for power supply to rural settlements; proposed new technological solutions to improve energy safety and technical and economic indicators of stand-alone power supply systems and the options of using smart algorithms with adaptive properties that provide improved technical and economic characteristics of the electric power system.

**Key words:**

Stand-alone power supply systems, microgrids, photo-diesel systems, direct and alternating current systems, distributed generation.

## REFERENCES

- Lukutin B.V. *Intellektualnye sistemy elektrosnabzheniya s vetrovyimi i solnechnymi elektrostantsiyami* [Smart power systems with wind and solar power plants]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ., 2015. 114 p.
- Drachev V. *Tri solnechnye elektrostancii obshey moshchnosti 45 MVt zapustili v Buryatii. 2019* [Three solar power plants with a total capacity of 45 MW were launched in Buryatia. 2019]. Available at: <https://tass.ru/ekonomika/7056227> (accessed 14 December 2019).
- Shamukov R. *Dve solnechnye elektrostanebii zapustili v Chite. 2019* [Two solar power plants were launched in Chita. 2019]. Available at: <https://tass.ru/ekonomika/7065192> (accessed 14 December 2019).
- V arkticheskom poselke Tiksi smontirovali pervuyu vetroustanovku. 2018* [The first wind turbine was installed in the Arctic village Tiksi. 2018]. Available at: <http://energyland.info/news-show-tek-alternate-175862> (accessed 14 December 2019).
- Marcinkevich B. *Razvitie VIE energetiki v Rossii. 2019* [Development of renewable energy in Russia. 2019]. Available at: <http://geoenergetics.ru/2019/09/27/razvitie-vie-energetiki-v-rossii/> (accessed 14 December 2019).
- Opiyo N.N. A comparison of DC- versus AC-based minigrids for cost-effective electrification of rural developing communities. *Energy Reports Journal*, 2019, vol. 5, pp. 398–408.
- Planas E., Andreu J., Gárate J.I., Alegria I.M., Ibarra E. AC and DC technology in microgrids: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews Journal*, 2015, vol. 43, pp. 726–449.
- Surzhikova O.A. Problemy i osnovnye napravleniya razvitiya elektroosnabzheniya udalennykh i malochislennykh potrebiteley Rossii [Problems and main directions of development of power supply to remote and sparsely populated consumers of Russia]. *Bulletin of the Science in Siberia*, 2012, no. 3 (4), pp. 103–108.
- IEA. *World Energy Outlook 2018*. Available at: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2018> (accessed 14 December 2019).
- Gimadi V., Kurdin A., Nester D., Amiragyan A., Kolobov O., Pikh S., Pominova I., Martynyuk A., Kutuzova A. *Energosnabzhenie izolirovannykh territoriy v Rossii i mire* [Energy supply of isolated territories in Russia and the world]. *Analytical Center under the Government of the Russian Federation. Energy Bulletin*, 2017, no. 51, pp. 14–18.
- Pyatkov P.Y. *Poteri moshchnosti i elektroenergii v elektricheskikh setyakh* [Electrical and power losses in electrical networks]. Yekaterinburg, UrGUPS Publ., 2009. 36 p.
- Avtonovosti, 2011. Tseny na solyarku: polniy absurd i naglost* [Automobile news, 2011. Prices of diesel fuel: complete absurdity and impudence]. Available at: [https://auto.mail.ru/article/34055-ceny\\_na\\_solyarku\\_polniy\\_absurd\\_i\\_naglost/](https://auto.mail.ru/article/34055-ceny_na_solyarku_polniy_absurd_i_naglost/) (accessed 14 December 2019).
- Gazeta Kommersant, 2017. Dizel razogrevaet tseni: toplivo dorozhayet iz-za remontov NPZ* [The newspaper Kommersant, 2017. Diesel heats up prices: the cost of fuel is higher due to refinery repairs]. Available at: <https://www.kommersant.ru/doc/3408522> (accessed 14 December 2019).
- Fairley P. DC versus AC: the second war of currents has already begun [in my view]. *IEEE Power and Energy Magazine*, 2012, vol. 10 (6), pp. 102–104.
- Opiyo N.N. Droop control methods for PV-based minigrids with different line resistances and impedances. *Sustainable Energy Grids Netw*, 2018, vol. 9 (6), pp. 101–112.
- Vallve X., Serrasolses J. Design and operation of a 50 kWp PV rural electrification project for remote sites in Spain. *Sol. Energy Journal*, 1997, vol. 59, pp. 111–119.
- Vossos V., Pantano S., Heard R. DC Appliances and DC power distribution. *A bridge to the future net zero energy homes*. Berkeley, California, Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL), 2017. pp. 1–14.

18. Jones A.D., Underwood C.P. A thermal model for photovoltaic systems. *Solar Energy*, 2001, vol. 70 (4), pp. 349–359.
19. Liu B.Y.H., Jordan R.C., Daily insolation on surfaces tilted towards the equator. *ASHRAE Journal*, 1961, vol. 3, pp. 53–59.
20. Shepard C.M. Design of primary and secondary cells. P. 2. An equation describing battery discharge. *Journal of Electrochemical Society*, 1965, vol. 112, pp. 657–664.
21. Obukhov S.G., Plotnikov I.A. Simulation model of operation of autonomous photovoltaic plant under actual operating conditions. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328. 6, pp. 38–51. In Rus.
22. Lukutin B., Muravyev D. Stand-alone power supply system with DC photo-diesel source. *E3S Web of Conferences*, 2019, vol. 114, pp. 1–6.
23. Lukutin B.V., Muravlev I.O., Plotnikov I.A. *Sistemi elektrosnabzheniya s vetrovimi i solnechnimi elektrostanciyami* [Power supply systems with wind and solar power plants]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. house, 2015. 100 p.
24. RD 34.20.185-94. *Instruktsiya po proektirovaniyu gorodskikh elektricheskikh setey* [Instructions for the design of urban electrical networks]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1995. 49 p.
25. Lukutin B.V., Shandarova E.B., Makarova A.F., Shartsman I.B. Effect of distributed photovoltaic generation on the voltage magnitude in a self-contained power supply system. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. Tomsk, 2016. Vol. 127, pp. 1–7.
26. Pashkevich P.I., Pavlov K.A. Matematicheskoe modelirovanie kombinirovannoy dizel-solnechnoy elektrostantsii dlya detsentralizovannogo elektrosnabzheniya potrebitel'ey [Mathematical modeling of a combined diesel-solar power station for decentralized power supply to consumers]. *Power Station. Renewable energy*, 2019, no. 9, pp. 30–35.
27. Lavrik A.U., Zhukovskiy U.L., Maksimov N.A. Opredelenie optimal'nogo sostava rezerviruemyy gibridnoy vetro-solnechnoy elektrostantsii [Determination of the optimal composition of the reserved hybrid wind-solar power station]. *Industrial energy*, 2019, no. 10, pp. 47–53.
28. Dmitrienko V.N., Lukutin B.V. Method for estimating solar radiation energy for photovoltaic plants. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 6, pp. 49–55. In Rus.
29. Kiushkina V.R. *Povyshenie energeticheskoy bezopasnosti detsentralizovannykh zon elektrosnabzheniya regionov severnykh territoriy i arkticheskikh zon (na primere Respubliki Sakha (Yakutiya))*. Dis. Dokt. nauk [Improving the energy security of decentralized power supply zones of the regions of the northern territories and the Arctic zones (on the example of the Republic of Sakha (Yakutia)). Dr. Diss.]. Nerungri, 2019. 400 p.

*Received: 17 December 2019.*

#### Information about the authors

**Boris V. Lukutin**, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Dmitry I. Muravyev**, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 621.316.71

## ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПО ОЦЕНКЕ УРОВНЯ ЖИДКОСТИ В НЕФТЕДОБЫВАЮЩИХ И ВОДОЗАБОРНЫХ СКВАЖИНАХ

Денисламов Ильдар Зафирович<sup>1</sup>,  
denislamoviz@mail.ru

Гималтдинов Ильяс Кадинович<sup>1,2</sup>,  
iljas\_g@mail.ru

Якубов Равиль Наилевич<sup>1</sup>,  
rnyakubov@gmail.com

Денисламова Алия Ильдаровна<sup>1</sup>,  
denislamova2014alia@mail.ru

<sup>1</sup> Уфимского государственного нефтяного технического университета,  
Россия, 450062, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

<sup>2</sup> Академии Наук Республики Башкортостан,  
Россия, 450008, г. Уфа, ул. Кирова, 15.

**Актуальность** исследования следует из необходимости оценки динамического уровня жидкости в нефтедобывающих и водозаборных скважинах с необходимой частотой. Измерения уровня жидкости в скважинах различного назначения необходимы для контроля разработки нефтяной залежи, оценки эффективности воздействия на продуктивный пласт и обеспечения безаварийной эксплуатации глубинного скважинного насоса. Информация об уровне жидкости востребована несколькими службами нефтегазодобывающего предприятия, а выполнение таких измерений может рассматриваться как одна из функций интеллектуальной скважины.

**Цель:** поиск и обоснование альтернативных методов определения уровня жидкости в межтрубном пространстве нефтедобывающих и водозаборных скважин. Измерения должны проводиться с необходимой периодичностью без привлечения персонала предприятия в скважинную зону.

**Объектом** исследования являются нефтедобывающие и водозаборные скважины, снабженные датчиками давления, генераторами и приемниками акустических волн и вторичными приборами по передаче скважиной информации на рабочие места персонала предприятия.

**Методы** исследования основаны на общеизвестных законах физической гидродинамики и методах математической статистики.

В результате исследования установлено, что звукометрический метод определения динамического уровня жидкости в межтрубном пространстве скважины имеет погрешность измерений в действующих нефтедобывающих скважинах из-за непостоянства состава попутного нефтяного газа по времени эксплуатации скважины и по глубине насосно-компрессорных труб на фиксированный момент времени. Предложены альтернативные методы измерений, основанные на генерации акустических волн в различных средах и измерении давления в межтрубном пространстве по датчикам на стационарной основе.

### Ключевые слова:

Состав газа, скважина, межтрубное пространство, уровень жидкости, датчик давления, электроцентробежный насос, насосно-компрессорная труба, звуковая волна.

### Введение

Подавляющее большинство нефтедобывающих и водозаборных скважин эксплуатируются с помощью глубинного насосного оборудования, которое должно иметь определенную производительность и устанавливаться на расчетной глубине относительно устья скважины и продуктивного пласта. Как правило, совокупность этих технических решений и обеспечивает сбалансированность системы «пласт–скважина–насос», когда приток жидкости из пласта в скважину соответствует производительности глубинного насоса. Нефтедобывающие и водозаборные скважины нефтяных компаний России оборудованы в подавляющем большинстве электроцентробежными насосами и штанговыми плунжерными установками. Несмотря на разный принцип действия, оба вида насосов весьма чувствительны к величине давления флюидов на вхо-

де в насос. Насосное оборудование рассчитано на транспортировку жидкости, в которой содержание газовой фазы может находиться лишь в определенных пределах. Например, для глубинной электроцентробежной установки по одним источникам [1, 2] содержание свободного газа в зоне приемных отверстий насоса не должно превышать 25–30 %, а по другим данным [3] даже содержание свободного газа в пределах 30–40 % от объема газожидкостного состава может быть оптимальным для работы установки. Содержание свободного газа (ССГ) на приеме насоса в свою очередь зависит от давления в рассматриваемой точке. Это давление формируется как сумма давления попутного нефтяного газа над уровнем жидкости и гидростатического давления столба жидкости в межтрубном пространстве от уровня жидкости до приема насоса. Этими положениями и руководству-

ются при выборе глубины спуска насоса и его погружения под динамический уровень жидкости. Во всех этих расчетах всегда остается неизвестной величиной плотность газожидкостного состава (ГЖС) в межтрубном пространстве (МП) скважины. По экспертным оценкам [4, 5] рассматриваемая плотность ГЖС в нефтедобывающих скважинах может быть понижена до уровня 405–450 кг/м<sup>3</sup>. В водозаборных скважинах с низким газовым фактором плотность может быть выше 1000 кг/м<sup>3</sup>.

Оценка динамического уровня жидкости в скважине по данным термо-манометрической системы (ТМС) и устьевого давления из-за неопределенности плотности газожидкостного состава в МП скважины остается сложной проблемой.

Скважины с ТМС в некоторых компаниях составляют более половины фонда добывающих скважин, но их нет в скважинах со штанговыми плунжерными насосами из-за отсутствия линии обратной связи до устьевого зоны. В данной работе рассматриваются некоторые способы определения положения динамического уровня жидкости в скважине.

#### **Определение уровня жидкости в скважинах звукометрическим способом**

Данный метод испытан временем и предельно усовершенствован, он стал достаточно безопасным, доступным и более точным, чем десятилетия назад. Метод основан на генерации акустической волны на устье скважины переносным или стационарным устройством, распространении волны в межтрубном пространстве, отражении от раздела сред – динамического уровня жидкости и вторичной фиксации этой волны на устье скважины приемным устройством. Генератор и приемник акустической волны совмещены в удобном и компактном устройстве серии Микон или Суддос, а сам метод и его реализация в автоматическом режиме применения описаны в работах [6–10].

В работах [11–14] авторы указывают на то, что скорость звуковой волны в попутном нефтяном газе зависит от давления газа, его компонентного состава и структуры газовой среды вблизи контакта с жидкой фазой. Известно, что межтрубное пространство нефтедобывающей скважины в нижней части сообщается с помощью глубинного насоса с колонной насосно-компрессорных труб (НКТ) и с продуктивным пластом – через перфорационные отверстия в обсадной колонне скважины. В верхней части межтрубное пространство периодически сообщается с системой нефтесбора, когда давление в газовой среде превышает давление в выкидной линии скважины. Перепуски попутного нефтяного газа (ПНГ) из скважины в систему нефтесбора носят хаотический характер и зависят в основном от сбалансированности системы «пласт–скважина–насос». Периодически операторы по добыче нефти выпускают в атмосферу ПНГ из МП скважины для снижения содержания свободного газа на приеме электроцентробежного насоса и стабилизации его работы. Описанные процессы не регламентируются производственными документами, происходят в произвольном порядке, поэтому состав ПНГ в

межтрубном пространстве на момент производства измерения динамического уровня жидкости звукометрическим методом не является известным фактором. Измерения уровня жидкости при разных давлениях в МП, а значит и в отличных условиях сепарации легких углеводородов из нефти в газовую среду, показали, что разница в измеренных уровнях жидкости достигает 147 м в интервале 1426–1573 м [6].

В работах [15–17] рассмотрены способы повышения точности измерения уровня жидкости, основанные на использовании акустических волн различной частоты и интерпретации результатов с помощью математических методов анализа частотного спектра отраженных сигналов.

Точность измерений уровня жидкости звукометрическим способом обеспечивается двумя способами:

- 1) непосредственным измерением скорости звука в исследуемой среде путем отбора порции попутного нефтяного газа в трубную камеру известной длины. В камеру будет отобран ПНГ из приустьевой зоны межтрубного пространства, который по составу и плотности будет отличаться от газа над уровнем жидкости. Это обуславливает повышение давления газа в МП по экспоненциальной формуле барометрического нивелирования Лапласа–Бабинэ [18]. На наш взгляд, отбор дискретной пробы ПНГ не даёт объективной информации о скорости звука в исследуемой многокомпонентной газовой среде.
- 2) использованием реперов, установленных на известных глубинах по колонне насосно-компрессорных труб [1]. При расположении единственного репера вблизи устья скважины или уровня жидкости способ имеет тот же недостаток, что отбор газа в длинномерный контейнер (первый способ). Логично, что реперов должно быть не менее трех: вблизи устья скважины и уровня жидкости, а также между этими крайними точками по длине колонны НКТ. В этом случае возникает вопрос о чувствительности уровнемеров серии Микон или Суддос. Наличие такой высокой чувствительности могло бы привести к идентификации каждой муфты от устья скважины до глубинного насоса, и тогда, наложив на эту информацию паспортные данные спущенной в скважину колонны труб относительно глубины муфтовых соединений, можно точно определить положение уровня жидкости.

Данное техническое решение не реализуется по двум причинам:

- 1) в серийных уровнемерах не обеспечена идентификация каждого муфтового соединения;
- 2) при монтаже и спуске колонны НКТ не ведется учет глубины уже смонтированных муфтовых соединений.

Проведенный анализ звукометрического способа оценки уровня жидкости в МП показывает, что метод достиг предела своих возможностей из-за постоянной неопределенности в компонентном составе попутного нефтяного газа как среды распространения контролируемой волны.

В некоторых типах скважин, например наблюдательных, пьезометрических и водозаборных, состав газа и даже жидкой фазы может быть известным и неизменным в течение длительного времени. Поэтому в этой части статьи рассмотрим еще три технических решения, которые интересны с точки зрения идентификации раздела фаз: газообразной и жидкостной. В статье [11] уделено внимание структуре углеводородов вблизи раздела фаз, а в литературе часто упоминается понятие углеводородной пены над динамическим уровнем нефти в межтрубном пространстве действующей скважины. По изобретению [19] предложено положение раздела фаз фиксировать путем помещения в зону раздела зонда с положительной плавучестью. Зонд содержит два генератора волн: «медленной» акустической волны и «быстрой» электромагнитной волны.

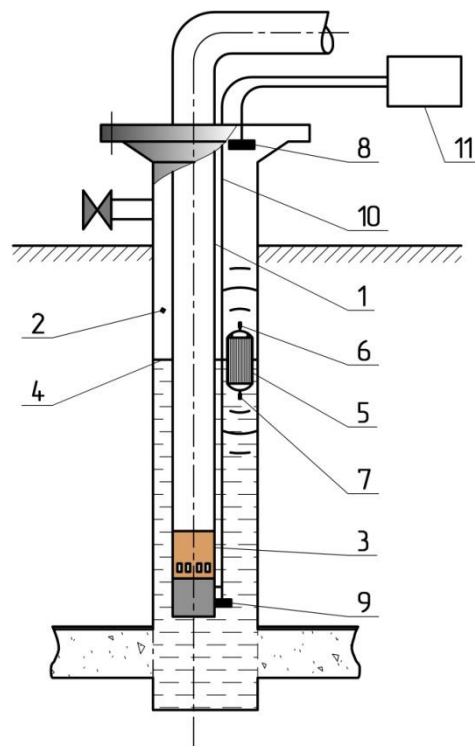
Момент инициирования «медленной» акустической волны определяют по времени прихода на устье скважины «быстрой» электромагнитной волны благодаря их одновременной генерации на уровне жидкости. Отметим, что изобретение основано, в том числе, и на очень быстром прохождении электромагнитного сигнала от уровня жидкости до устья. Это практически невозможно осуществить в скважинах с большой кривизной ствола скважины, так как электромагнитный сигнал будет активно поглощаться металлом обсадной колонны и не проходить выше зоны кривизны скважины.

Хронологическое время инициирования акустической волны с зонда поплавка  $t_0$  остается величиной неизвестной в случае отказа от «быстрой» электромагнитной волны, поэтому остается от этого параметра в сложившейся ситуации избавиться с помощью стандартного математического приема [20]. Для этой цели акустическую волну одновременно создают в газовой и жидкой средах и фиксируют время прихода акустической волны по газовой среде от уровня жидкости до приемника на устье скважины –  $t_{\text{газ}}$  и момент времени прихода второй акустической волны – от уровня жидкости до приемника в зоне глубинной насосной установки –  $t_{\text{жид}}$ . Информация по этим хронологическим временам передается на станцию управления скважины, например, от приемника в зоне насоса – по стандартному кабелю электропитания ПЭД насоса.

Схема расположения генератора акустических волн и приемников в межтрубном пространстве действующей нефтедобывающей скважины приведена на рис. 1.

Два приемника акустических волн расположены в разных концах колонны НКТ для того, чтобы в крайних положениях уровня жидкости в скважине приемники фиксировали акустические волны, а именно – устьевой приемник – 8 фиксировал волны в газовой среде (в попутном нефтяном газе), а глубинный приемник – 9 фиксировал акустические волны, распространяющиеся в жидкой среде.

Способ измерения уровня осуществляется в следующем порядке:



**Рис. 1.** Генерация акустических волн с динамического уровня жидкости скважины: 1 – насосно-компрессорные трубы; 2 – газовая среда; 3 – глубинный насос; 4 – динамический уровень жидкости в межтрубном пространстве; 5 – генератор акустических сигналов с автономной плавучестью; 6 – излучатель акустических волн в газовой среде; 7 – излучатель акустических волн в жидкостной среде; 8 – устьевой приемник акустической волны в газовой среде; 9 – приемник акустической волны в жидкостной среде; 10 – кабель электропитания с обратной информационной функцией; 11 – станция управления скважины

**Fig. 1.** Generation of acoustic waves from a dynamic fluid level of a well: 1 – production tubing; 2 – gas environment; 3 – deep pump; 4 – dynamic fluid level in the annulus; 5 – generator of acoustic signals with autonomous buoyancy; 6 – emitter of acoustic waves in a gaseous medium; 7 – emitter of acoustic waves in a liquid medium; 8 – wellhead receiver of an acoustic wave in a gas medium; 9 – receiver of an acoustic wave in a liquid medium; 10 – pump power cable with reverse information function; 11 – well control station

1. В межтрубное пространство скважины на уровень жидкости помещают генератор – 5 в виде поплавка с положительной плавучестью в жидкостной среде. Генератор имеет плотность в пределах 400–600 кг/м<sup>3</sup> и снабжен двумя излучателями – 6, 7.
2. С необходимой частотой в течение суток, например, ежедневно, генератор – 5 инициирует одновременно две акустические волны: в газовую среду через излучатель – 6 и в жидкостную среду – через излучатель – 7.

3. В момент времени  $t_{\text{газ}}$  приемник – 8 фиксирует приход акустической волны в газе, а в момент  $t_{\text{жид}}$  приемник – 9 фиксирует приход акустической волны в жидкостной среде.
4. Информация от приемников – 8, 9 передается по линии связи – 10 на станцию управления (СУ) – 11.
5. По формуле контроллер станции управления определяет удаленность уровня жидкости от устья или, как принято говорить в нефтедобыче, уровень жидкости в скважине.

Обозначим условное хронологическое время одновременного излучения двух акустических волн через  $t_0$ , тогда время движения волны по газовой среде равно:

$$t_{\text{газ}} - t_0 = H_{\text{ур}} / v_{\text{газ}}, \quad (1)$$

где  $t_{\text{газ}}$  – хронологическое время прихода акустической волны по газовой среде от уровня жидкости до приемника на устье скважины;  $H_{\text{ур}}$  – расстояние от устья до уровня жидкости;  $v_{\text{газ}}$  – скорость распространения акустической волны в газе.

Время движения акустической волны по жидкостной среде равно:

$$t_{\text{жид}} - t_0 = (H_{\text{нас}} - H_{\text{ур}}) v_{\text{жид}}, \quad (2)$$

где  $t_{\text{жид}}$  – время прихода акустической волны в жидкостной среде от уровня жидкости до приемника в зоне глубинной насосной установки;  $H_{\text{нас}}$  – расстояние от устья скважины до глубинной насосной установки, измеряется по длине НКТ;  $v_{\text{жид}}$  – скорость распространения акустической волны в жидкостной среде – в нефти или воде.

Из (1) и (2) следует расчетная формула (3):

$$H_{\text{ур}} = \left( t_{\text{газ}} - t_{\text{жид}} + \frac{H_{\text{нас}}}{v_{\text{жид}}} \right) \cdot \left( \frac{v_{\text{газ}} v_{\text{жид}}}{v_{\text{газ}} + v_{\text{жид}}} \right). \quad (3)$$

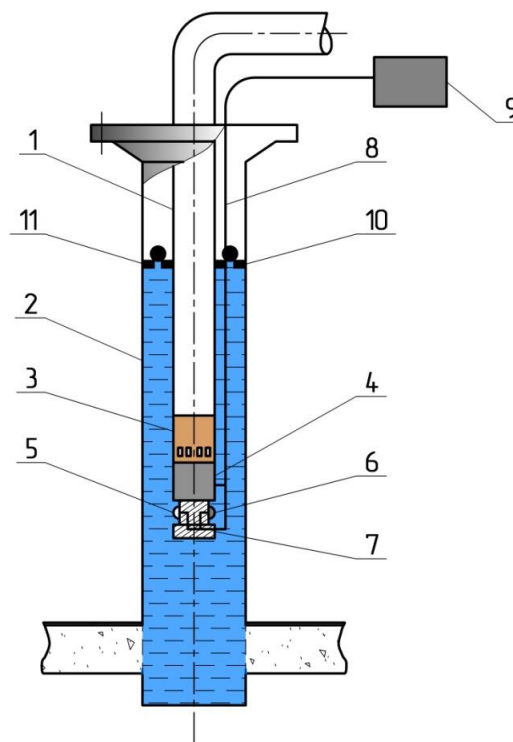
Рассмотрим другой способ определения уровня жидкости в скважине. Предлагается по существующей аналогии в газовой среде акустическую волну создавать в водной среде, и по времени прохождения двойного пути от насоса до динамического уровня воды в межтрубном пространстве оценивать высоту столба воды над глубинным насосом [21]. Генератор и приемник акустической волны (АВ) размещают стационарно в зоне глубинного электроцентробежного насоса скважины, на уровне жидкости скважины размещают шарики, выполненные из карбамидной смолы или из материала с аналогичным свойством положительной плавучести в воде. Акустическую волну генерируют в жидкой среде в зоне глубинного насоса и измеряют время прохождения акустической волны от глубинного насоса до карбамидных шариков, находящихся на уровне жидкости, и время прохождения отраженной АВ от уровня жидкости и шариков из карбамидной смолы до приемника акустической волны в зоне глубинного насоса.

Уровень жидкости определяют по формуле:

$$H_{\text{ур}} = H_{\text{нас}} - \frac{1}{2} \cdot v_{\text{жид}} \cdot (t_2 - t_1), \quad (4)$$

где  $t_1$  – время с момента генерации акустической волны в воде в зоне глубинного насоса;  $t_2$  – время прихода акустической волны к приемнику в зоне глубинного насоса.

Схема расположения генератора и приемника акустических волн в межтрубном пространстве действующей водозаборной скважины приведена на рис. 2.



**Рис. 2.** Определение уровня жидкости в водозаборной скважине: 1 – колонна насосно-компрессорных труб; 2 – обсадная колонна; 3 – глубинный электроцентробежный насос с электроприводом; 4, 5 – генератор акустических волн в жидкой среде; 6 – приемник акустической волны; 7 – блок преобразователя акустической информации; 8 – кабель электропитания установки с обратной информационной функцией; 9 – станция управления скважины; 10 – шарики с положительной плавучестью в жидкости; 11 – динамический уровень воды в межтрубном пространстве

**Fig. 2.** Determination of fluid level in a water well: 1 – tubing string; 2 – casing string; 3 – deep electric centrifugal pump with electric drive; 4, 5 – acoustic wave generator in a liquid medium; 6 – acoustic wave receiver; 7 – acoustic information transducer block; 8 – cable power supply of the installation with an inverse information function; 9 – well control station; 10 – balls with positive buoyancy in the liquid; 11 – dynamic water level in the annulus

Способ измерения уровня осуществляется в следующем порядке:

1. С заданной частотой во времени генератор – 5 создает акустический импульс, а находящийся рядом приемник – 6 фиксирует момент времени инициирования этой волны  $t_1$ .



2. Акустическая волна распространяется с известной скоростью в воде, доходит до границы раздела воды и газа – 11, отражается от твердого препятствия в виде слоя из шариков – 10, отраженная АВ с такой же скоростью распространяется в обратную сторону – к глубинному насосу.
3. Приемник – 6 фиксирует момент времени прихода  $t_2$  отраженной волны в зону глубинного насоса.
4. Информация от приемников – 6 передается на блок преобразователя акустической информации – 7, усиливается, кодируется и передается по линии связи – 8 на станцию управления (СУ) – 9. В качестве линии связи от блока – 7 до СУ в скважинах с глубинным электроцентробежным насосом служит кабель электропитания электродвигателя насосной установки.
5. По формуле (4) контроллер станции управления определяет удаленность уровня воды от устья.

Данный способ применим для случая, когда жидкая фаза не содержит газовые пузырьки и известна скорость распространения акустических волн в ней. Например, на территории республики Татарстан такие залежи с высоковязкой нефтью залегают на глубинах до 300 м и содержат в 1 м<sup>3</sup> нефти не более 50 литров попутного газа [22]. Описанный способ, на наш взгляд, применим и для таких нефтяных скважин.

#### **Анализ нетрадиционных способов оценки уровня жидкости в скважинах**

Наиболее известным и ранним способом измерения уровня жидкости в скважинах с малой глубиной и в емкостном оборудовании (танки и резервуары) является технология, по которой на скребковой проволоке или геофизическом кабеле в газовую среду опускают пустотелый и герметичный снаряд малой плотности. По натяжению проволоки или кабеля судят о моменте вхождения снаряда в среду со значительно большей плотностью. При вхождении снаряда с функцией генератора акустических волн в жидкую среду (водную или нефтяную) происходит исчезновение этих волн в газовой среде, что и можно фиксировать с помощью приемника акустической волны. Способ подробно описан в отечественной и иностранной литературе [7, 23]. Оба способа непригодны для исследования глубоких скважин, имеющих объемную пространственную кривизну относительно вертикальной составляющей.

Прямые способы измерения уровня жидкости в скважине имеют наименьшую погрешность, так как измеряющее устройство спускается непосредственно в исследуемую зону скважины, а способ определения границы раздела сред основан на разнице в свойствах попутного нефтяного газа с одной стороны, нефти и воды – с другой. Геофизические влагомеры и плотномеры основаны на разнице плотности флюидов, их электрического сопротивления и диэлектрической проницаемости [24]. Положение уровня жидкости в межтрубном пространстве, замеряемое через колонну насосно-компрессорных труб, определяют с помощью методов радиометрии по разному содержанию ядер водорода в единице объема жидкости и газа и по различной плотности этих сред [25].

Способы определения уровня жидкости, основанные на использовании спуско-подъемных операций глубинных приборов, применимы во время капитального ремонта скважин для установления герметичности обсадной колонны методом снижения уровня жидкости. Такие исследования выполняются после предварительной установки пакерующего устройства на необходимой глубине скважины. Спуско-подъемные операции аналогичных приборов в действующей нефтескважине требуют снижения давления в МП до атмосферного или применения малогабаритного лубрикатора с его фиксацией к эксцентричному отверстию в план-шайбе устьевого арматуры. Исследовательские подразделения нефтегазодобывающих компаний к настоящему времени не укомплектованы лубрикаторами для работы в межтрубном пространстве скважин.

Попутный нефтяной газ в межтрубном пространстве скважины в первом приближении можно рассматривать как идеальный газ, состояние которого в замкнутом пространстве скважины описывается уравнением Менделеева–Клапейрона. В статье [26] предложено оценивать давление и температуру газовой среды, находить объем ПНГ и высоту цилиндрического газового тела, которое и является уровнем газожидкостного раздела. Если среднее давление в газовой среде еще можно найти по устьевому давлению и по формуле Лапласа–Бабинэ, то для оценки температуры газа на глубине сотен метров необходимо производить спуско-подъемные операции (СПО) спаренного манометра-термометра. Очевидно то, что необходимость СПО глубинного прибора дает возможность определения уровня жидкости путем прямых измерений характеристик среды, в которой находится регистрирующее устройство.

Для устранения данного противоречия по патенту РФ на изобретение [27] часть газа из МП перепускается в камеру известного объема, фиксируется изменение давления благодаря изотермическому расширению газа. Далее по двум состояниям газа с помощью уравнения Бойля–Мариотта определяется глубина уровня жидкости. По изобретению в качестве среднего давления газовой среды используется давление газа в МП в устьевой зоне скважины без учета повышения давления с глубиной по известной экспоненте барометрического нивелирования. Для устранения этого недостатка необходимо рассматривать среднее значение давления газа в МП, но для определения давления газа на границе с жидкой фазой по формуле Лапласа–Бабинэ необходимо знать вертикальную координату ствола скважины от устья до уровня жидкости, которая и является неизвестной величиной. Для выхода из этого положения по изобретению [28] предложен итерационный метод поиска уровня жидкости в МП, заключающийся в том, что на первом этапе в указанную формулу подставляют уровень, соответствующий глубине подвески насоса, находят уточненный уровень жидкости по формуле Бойля–Мариотта, который опять используют для расчетов на втором этапе. Расчеты ведут до приведения уровня жидкости к одной постоянной величине.

Температура среды в межтрубном пространстве скважины также может стать информативной величиной благодаря различной теплопроводности ПНГ и нефти в добывающих скважинах. В изобретении [29] это положение использовано для оценки состояния скважины, эксплуатируемой для добычи высоковязкой нефти с высокой температурой. Авторы изобретения оценивают положение уровня нефти в МП скважины с высокой температурой (90–140 °С) по первому скачку температуры не менее, чем на 10 °С в зависимости температуры среды в межтрубном пространстве от глубины измерения. Чувствительный элемент в виде оптоволоконного кабеля марки КОБ1-400-тип4 предвращают размещают на стационарной основе в МП скважины, и по его данным контролируют положение уровня нефти, находящейся между обсадной колонной и насосно-компрессорными трубами.

Для скважин со штанговым плунжерным насосом специалисты из КНР рассмотрели возможность использования динамограмм, снятых на устье скважины, для диагностики положения уровня жидкости в межтрубном пространстве скважины [30, 31]. Расчетная формула в виде отношения содержит в числителе разницу между нагрузками на полированный шток в верхнем и нижнем положении плунжера насоса, в знаменателе – произведение площади сечения плунжера, плотности нефти в МП и ускорения свободного падения. По нашему мнению, способ применим только в водозаборных скважинах, в которых вода не содержит растворенного газа и имеет постоянную плотность по всей высоте в межтрубном пространстве скважины.

#### Датчики давления для оценки уровня жидкости в скважинах

В нефтегазодобывающем управлении «Чекмагуш-нефть» ОАО «АНК «Башнефть» в период 1990–2010 гг. был накоплен большой опыт по спуско-подъемным операциям спаренных манометров-термометров в пьезометрические и нефтедобывающие скважины. Одной из целей таких исследований было определение расположения водонефтяного контакта в открытом стволе или межтрубном пространстве скважины. Дополнительно отбирались пробы скважинной жидкости с разных глубин погружения прямоточного пробоотборника. Комплекс проведенных работ по скважине позволял однозначно идентифицировать положение водонефтяного контакта в скважине. Примерно такой же механизм исследований описан в [32], когда по данным манометра, спускаемого в скважину, определяют динамический уровень жидкости в межтрубном пространстве.

Выше было отмечено, что спуско-подъемные операции глубинных приборов относятся к сложным и не всегда возможным техническим процедурам на скважинах. Например, спуск прибора в межтрубное пространство скважины с глубинным электроцентробежным насосом совершенно невозможен из-за наличия в этом пространстве силового многожильного кабеля питания погружного электродвигателя установки.

Необходимость установки стационарного датчика давления в зоне глубинного электроцентробежного насоса отмечена в [1]. Сегодня термоманометрические системы помогают решать персоналу нефтяных компаний широкий круг задач эксплуатации системы «пласт–скважина–насос», но, как уже отмечалось во введении, по единственному датчику давления нельзя судить о положении уровня жидкости в скважине. Поэтому датчиков на стационарной основе должно быть несколько. Эта идея указана в работе [28].

Датчики давления в МП скважины располагают равномерно от устья до глубинного насоса так, чтобы вертикальная составляющая между ними была равна 100–150 м. Расположение датчиков давления на условно вертикальной скважине приведено на рис. 3. Часть датчиков находятся в газовой среде, в которой давление с глубиной незначительно растет согласно формуле Лапласа–Бабинэ. Это видно по данным рис. 4, где приведена зависимость давления от глубины пьезометрической скважины. Зависимость получена путем проведения спуско-подъемной операции глубинного манометра-термометра от устья до отметки 1000 м.

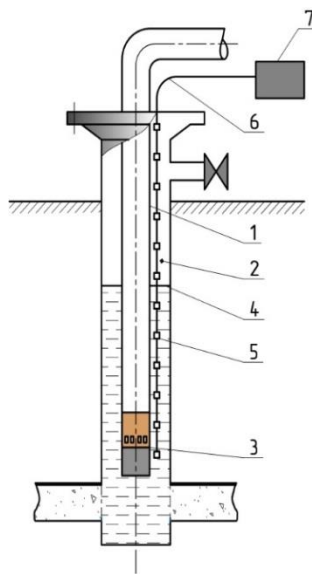


Рис. 3. Датчики давления для контроля уровня в скважине: 1 – колонна лифтовых труб; 2 – межтрубное пространство скважины; 3 – глубинный насос; 4 – динамический уровень жидкости; 5 – датчики давления; 6 – кабель электропитания с функцией обратной связи; 7 – станция управления скважины

Fig. 3. Pressure sensors for continuous monitoring of the dynamic level of the well: 1 – string of elevator pipes; 2 – annular space of the well; 3 – downhole pump; 4 – dynamic level (gas-liquid section); 5 – pressure sensors; 6 – armored communication cable; 7 – well control station

При вхождении манометра в зону нефти ниже глубины 466 м давление значительно растёт, и в среднем градиент давления в жидкостной среде составляет 0,7 МПа на 100 м. По этой информации кон-

тронлер станции управления скважины выявляет область с попутным нефтяным газом, находит уравнение прямой зависимости давления от глубины установки датчика давления:

$$P_{\text{газ.ф.}} = 0,0001 \cdot H + 0,7996. \quad (5)$$

Аналогичное уравнение контроллер выдает по данным датчиков, находящихся в жидкостной фазе МП скважины:

$$P_{\text{жид.ф.}} = 0,007 \cdot H - 2,4127. \quad (6)$$

Совместное рассмотрение уравнений (5) и (6) позволяет оценить уровень жидкости на глубине 465,5 м.

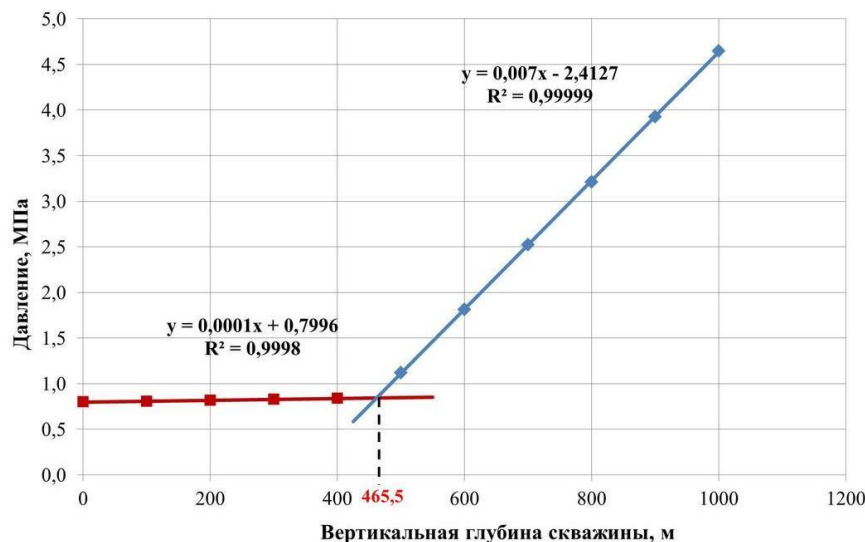


Рис. 4. Определение уровня жидкости в скважине

Fig. 4. Determination of the level of fluid in the well

Приведенный пример показывает надежность и информативность стационарных датчиков давления, расположенных в кольцевом пространстве скважины от устья до глубинного насоса. Для определения нижней границы газовой среды и дальнейшей интерпретации полученной информации в работе [33] предложено наблюдать за коэффициентом корреляции зависимости давления от глубины. Переход газовой среды в жидкую фазу влечет за собой резкое снижение коэффициента корреляции исследуемой зависимости.

Аналогичные результаты по использованию стационарных датчиков давления в составе оптоволоконной линии в скважине представлены в докладе группы авторов [34]. Согласно докладу, концерн Shell и компания SmartFibers в оптоволоконной линии разместили мембранные манометры, чувствительные к изменению давления в окружающей среде. Величина деформации манометра оценивается путем измерения длины волны, отраженной от оптоволоконной береговой решетки. Технология успешно испытана в период с 2010 по 2014 гг. в нескольких скважинах, количество датчиков давления варьировало от 9 до 14.

В статье было отмечено, что давление попутного нефтяного газа в МП растет по экспоненциальной зависимости. Добавим, что и давление жидкости от динамического уровня до глубинного насоса будет расти нелинейно из-за различного содержания свободного газа в нефти по глубине скважины. Наиболее полно состояние нефти с газом в межтрубном пространстве нефтедобывающей скважины описано в работе [35]. По мнению авторов, в узком межтрубном

пространстве существует два встречных потока нефти: вверх движется пластовая нефть со значительным газосодержанием, а вниз – тяжелая нефть с минимальным содержанием газа. Несмотря на существование такого сложного состояния нефти в МП, очевидно, что плотность нефти с растворенным газом вблизи насоса будет выше плотности нефти с окклюдируемым и свободным газом вблизи межфазной поверхности нефти и газа. В связи с этим интерпретацию данных от датчиков давления, равномерно расположенных от устья скважины до насоса можно проводить не по двум массивам данных: в газовой и жидкостной средах, а по «скользящей» информации. По данным первых (верхних) 3–4 датчиков давления определяется коэффициент корреляции прямолинейной зависимости давления от вертикальной составляющей скважины, далее информация по первому датчику удаляется, но добавляется давление по нижележащему датчику, расчет корреляции нового массива данных повторяется. Расчеты, проведенные по данным трех скважин [33], показали, что предложенный математический алгоритм позволяет идентифицировать межфазную поверхность с приемлемой точностью в несколько метров.

#### Выводы

1. Динамический уровень жидкости даже при наличии термо-манометрической системы в скважине продолжает выполнять важную информационную роль в процессе эксплуатации системы «пласт–скважина–насос». Основным методом определения уровня жидкости во всех видах эксплуата-

онных скважинах нефтедобывающих компаний является звукометрический способ, основанный на распространении акустической волны в газовой среде. Из-за изменений в системе разработки вблизи скважины, неконтролируемой работы перепускного клапана на устье скважины и меняющегося давления состав попутного нефтяного газа в межтрубном пространстве не является постоянной величиной, поэтому подавляющее большинство измерений уровня жидкости в нефтедобывающих скважинах производятся с определенной погрешностью.

2. Для водозаборных и нефтедобывающих скважин с минимальным газосодержанием разработаны алгоритмы измерения уровня жидкости, основанные на распространении акустической волны в жидкой среде – воде или нефти. В этих алгоритмах граница между газом и жидкостью идентифицируется как физическая граница разных сред благодаря постоянному нахождению дополнительных тел на этой границе, и этим устраняется существующая сегодня неопределенность в диагностике динамического уровня жидкости звукометрическим методом.
3. Наиболее перспективным и универсальным для скважин любого назначения является способ определения динамического уровня жидкости, основанный на наличии в межтрубном пространстве определенного количества датчиков давления. Наши исследования показали, что уровень жидкости диагностируется с минимальной погрешностью в постоянном режиме времени и без участия персонала предприятия. Способ повышает информационную обеспеченность скважины и является одной из составных частей «интеллектуальной» скважины.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Щуров В.И. Технология и техника добычи нефти. – М.: Недра, 1983. – 510 с.
2. Зейгман Ю.В., Гумеров О.А. Эффективность эксплуатации электроцентробежных насосов в скважинах. – Уфа: ООО «Монография», 2006. – 88 с.
3. Персиянцев М.Н. Добыча нефти в осложненных условиях. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2000. – 653 с.
4. Мищенко И.Т., Леонов И.В. Основы физико-математической модели системы «эксплуатационный объект – добывающая скважина – установка ЭЦН» // Вестник Ассоциации буровых подрядчиков. – 2011. – № 3. – С. 36–40.
5. Денисламов И.З., Гафаров Ш.А., Еникеев Р.М. Интерпретация данных современной телеметрии скважинных электроцентробежных насосов // Нефтегазовые технологии и новые материалы. Проблемы и решения: сб. науч. тр. – Уфа: ООО «Монография», – 2014. – Вып. 3 (8). – С. 243–250.
6. Сухоруков М.П., Торгаева Д.С., Мамлина В.В. Сравнительный анализ методов определения динамического уровня жидкости в межтрубном пространстве нефтяной скважины // Электронные средства и системы управления: XIII Международная научно-практическая конференция, посвященная 55-летию ТУСУРа. – Томск, 2017. – С. 178–181.
7. Wei Jia, Wei Zhou, Tai-fu Li. A review of dynamic fluid level detection for oil well // Mechanics and Materials. – 2014. – V. 456. – P. 582–586.
8. Burgstaller C. New approaches of using fluid level data for production optimization and reservoir engineering applications //

#### Заключение

Контролирование динамического уровня жидкости в межтрубном пространстве нефтедобывающих и водозаборных скважин и давления на приеме глубинного насоса обеспечивает эффективность работы системы «пласт–скважина–насос» по нескольким причинам. Неизменность уровня жидкости будет наблюдаться при равенстве притока пластовой жидкости и производительности глубинного насоса. Наблюдение за плотностью газированной нефти в межтрубном пространстве как результат такого информационного обеспечения позволит косвенно судить о содержании свободного газа на приеме насоса и предупреждать аварийные ситуации в эксплуатации электроцентробежного насоса, связанные со срывом подачи пластовой продукции и перегревом установки в целом – насоса или погружного электродвигателя.

Сегодня данные термо-манометрических систем и переносных уровнемеров типа Микон и Суддос анализируются на рабочих местах геологов и технологов нефтегазодобывающих компаний на момент их поступления, а это происходит с различной периодичностью. Датчики давления, находящиеся в скважине от устья до насоса на стационарной основе, устраняют этот недостаток, дают возможность оперативно и без участия персонала предприятия принимать технические решения по изменению режима эксплуатации глубинного насоса, а значит и всей рассматриваемой системы взаимодействия продуктивного пласта, скважины и глубинного насоса.

*Работа выполнена в рамках госзадания в сфере научной деятельности № FEUR-2020-0004. Наименование проекта «Решение актуальных задач и исследование процессов в нефтехимических производствах, сопровождающихся течениями многофазных сред».*

- 78th EAGE Conference and Exhibition. – Vienna, Austria, 30 May–2 June 2016.
9. Fully automated fluid level measurement tool / G. Sam, C. Burgstaller, M. Kaestenbauer, E. Chevelcha // SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition. – Jakarta, Indonesia, 20–22 September 2011.
10. Song C., Guan X. The monitoring system design of oil well dynamic fluid level // Journal of Physics: 4th International Conference on Intelligent Computing and Signal Processing. – Xi'an, China, 29–31 March 2019.
11. Пугачев Е.В., Налимов Г.П., Гаус П.О. Определение уровня жидкости и скорости звука в затрубном пространстве добывающей скважины // Нефтяное хозяйство. – 2003. – № 2. – С. 50–52.
12. Исследование состава флюидов и процессов в межтрубном пространстве нефтедобывающих скважин / И.З. Денисламов, Ш.А. Гафаров, П.А. Засов, А.И. Денисламова // Нефтепромысловое дело. – 2018. – № 4. – С. 38–42.
13. Налимов К.Г. Информационная система эхометрирования многоимпульсными сигналами для определения уровня жидкости в нефтедобывающих скважинах: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2007. – 23 с.
14. Lieberman S. Automated continuous fluid level monitoring // SPE Production Operations Symposium. – Oklahoma City, USA, 16–19 April 2005.
15. Study on the measurement method of oil well's dynamic liquid level based on air column resonance / W. Zhou, L. Gan, P. Zhou, T. Li, X. Gu // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – Zhuhai, China, 28–30 April 2017.

16. Implementation of Tikhonov regularization in oil well liquid level reading data / N. Irianto, S. Rachmat, L. Mucharam, W.S. Indratno // *Modern Applied Science*. – 2017 – V. 11. – № 10. – P. 81–90.
17. Zhou W., Liu J., Gan L. Dynamic liquid level detection method based on resonant frequency difference for oil wells // *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Science*. – 2018. – V. 26 (6). – P. 2967–2975.
18. Коротаяев Ю.П., Ширковский А.И. Добыча, транспорт и подземное хранение газа. – М.: Недра, 1984. – 487 с.
19. Способ определения уровня жидкости в скважинах: пат. Рос. Федерация № 2038473, заявл. 01.02.1993; опубл. 27.06.1995. Бюл. № 18. – С. 184.
20. Способ определения уровня жидкости в скважине: пат. Рос. Федерация № 2612704, заявл. 10.03.2016; опубл. 13.03.2017. – Бюл. № 8.
21. Способ определения уровня жидкости в водозаборной скважине: пат. Рос. Федерация № 2623756, заявл. 16.05.2016; опубл. 29.06.2017. – Бюл. № 19.
22. Технологии подготовки сверхвязкой нефти Татарстана / Ф.Р. Губайдуллин, Р.З. Сахабутдинов, Т.Ф. Космачева, С.Н. Судькин, А.Н. Судькин. – Казань: Центр инновационных технологий, 2015. – 280 с.
23. Chen D.F., Han X.L., Jing Y. Discuss on survey method for liquid level of oil well // *WellTesting*. – 2008. – V. 17. – P. 60–62.
24. Моисеев В.Н. Применение геофизических методов в процессе эксплуатации скважин. – М.: Недра, 1990. – 240 с.
25. Кузнецов Г.С., Леонтьев Е.И., Резванов Р.А. Геофизические методы контроля разработки нефтяных и газовых месторождений. – М.: Недра, 1991. – 223 с.
26. Wu D.N., Liu P.L. To test the liquid level of a pump well by a material balance method // *Well Testing*. – 2003. – V. 12. – P. 31–33.
27. Способ измерения уровня жидкости в скважине и устройство для его осуществления: пат. Рос. Федерация № 2232267, заявл. 07.10.2002; опубл. 10.07.2004. Бюл. № 19. – С. 500–501.
28. Способ определения уровня жидкости в скважине: пат. Рос. Федерация № 2559979, заявл. 08.07.2014; опубл. 20.08.2015. – Бюл. № 23.
29. Способ определения уровня жидкости в нефтяной скважине с высокой температурой, добывающей сверхвязкую нефть: пат. Рос. Федерация № 2494248. Заявл. 19.10.2012; опубл. 27.09.2013. Бюл. № 27. – С. 282.
30. Liu Z., Wang H., Yang D. Determination of real-time dynamic fluid levels by analysis of the dynamometer card // *Canadian International Petroleum Conference*. – Calgary, Alberta, January 2007.
31. Real time calculation of fluid level using dynamometer card of sucker rod pump well / H. Yang, L. Mu, Y. Zeng, W. Huang, H. Xin, Q. Gan, M. Li, L. Zhang, E. Han // *International Petroleum Technology Conference*. – Kuala Lumpur, Malaysia, 10–12 December 2014.
32. Zhang H. Discussion of detecting fluid level by pressure gauge // *Well Testing*. – 2003. – V. 12. – P. 81–84.
33. Денисламов И.З., Бисенова А.А., Еникеев Р.М. Обучающие алгоритмы для интеллектуальной скважины // *Время коллонта. – 2015. – № 2. – С. 56–60.*
34. Development and field application of a permanent fiberoptic wellbore fluid level monitoring system / C. Staveley, C. Djyle, C. Coetzee, A. Franzen, H. Den Boer, A. van Rooyen, W. Birch, A.B. Biderkab, E. Moes // *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference*. – Abu Dhabi, UAE, 13–16 November 2017.
35. Разработка нефтяных месторождений. Т. 2. Эксплуатация добывающих и нагнетательных скважин / под ред. Н.И. Хисамутдинова, Г.З. Ибрагимова. – М.: ВНИИОЭНГ, 1994. – 272 с.

Поступила: 07.10.2019 г.

#### Информация об авторах

**Денисламов И.З.**, кандидат технических наук, доцент кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газонефтяных месторождений Уфимского государственного нефтяного технического университета.

**Гималтдинов И.К.**, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физики Уфимского государственного нефтяного технического университета; член-корреспондент Академии Наук Республики Башкортостан.

**Якубов Р.Н.**, кандидат технических наук, доцент кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газонефтяных месторождений Уфимского государственного нефтяного технического университета.

**Денисламова А.И.**, студент кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газонефтяных месторождений Уфимского государственного нефтяного технического университета.

UDC 621.316.71

## TECHNICAL SOLUTIONS FOR ESTIMATING LIQUID LEVEL IN OIL AND WATER WELLS

Ildar Z. Denislamov<sup>1</sup>,  
denislamoviz@mail.ru

Ilias K. Gimaltdinov<sup>1,2</sup>,  
iljas\_g@mail.ru

Ravil N. Yakubov<sup>1</sup>,  
rnyakubov@gmail.com

Aliya I. Denislamova<sup>1</sup>,  
denislamova2014alia@mail.ru

<sup>1</sup> Ufa State Petroleum Technological University,  
1, Kosmonavtov street, Ufa, 450062, Russia.

<sup>2</sup> Academy of Sciences of the Republic of Bashkortostan,  
15, Kirov street, Ufa, 450008, Russia

**The relevance** of the research follows from the need to assess the dynamic level of liquid in oil producing and water wells with the necessary frequency, which can be provided as one of the functions of an intelligent well.

**The aim** of the research is to search for alternative methods for determining the liquid level in the annulus of wells without involving personnel in the well zone.

**Objects:** oil producing wells equipped with pressure sensors, generators and receivers of acoustic waves and secondary instruments for transmitting information to the workplaces of the personnel of the enterprise.

**Methods:** based on the well-known laws of physical hydrodynamics and methods of mathematical statistics.

**Results.** The soundometric method for determining the dynamic liquid level in the annulus of a well has an error in measurements in existing oil wells due to the inconstancy of the composition of associated petroleum gas in time and in the depth of the tubing at a fixed point in time.

### Key words:

Gas composition, well, annulus, fluid level, pressure sensor, electric centrifugal pump, tubing, sound wave.

*This work was carried out as part of the state assignment in the field of scientific activity no. FEUR-2020-0004. The name of the project is «Solving urgent problems and researching processes in petrochemical industries accompanied by multiphase flow».*

### REFERENCES

- Shchurov V.I. *Tekhnologiya i tekhnika dobychi nefiti* [Technology and technique of oil production]. Moscow, Nedra Publ., 1983. 510 p.
- Zeigman Yu.V., Gumerov O.A. *Effektivnost ekspluatatsii elektrosentrobezhnykh nasosov v skvazhinakh* [Efficiency of operation of electric centrifugal pumps in wells]. Ufa, Monografiya Publ., 2006. 88 p.
- Persiyanov M.N. *Dobycha nefiti v oslozhnennykh usloviyakh* [Oil production in the complicated conditions]. Moscow, Nedra-Biznesstsentr Publ., 2000. 653 p.
- Mishchenko I.T., Leonov I.V. Fundamentals of physical-mathematical model of «development target – producing well – ESP» system. *Bulletin of the Association of Drilling Contractors*, 2011, no. 3, pp. 36–40. In Rus.
- Denislamov I.Z., Gafarov Sh.A., Enikeev R.M. Interpretatsiya dannykh sovremennoy telemekhaniki skvazhinnykh elektrosentrobezhnykh nasosov [Data telemetry of downhole electric centrifugal pumps interpretation]. *Neftegazovye tekhnologii i novye materialy. Problemy i resheniya* [Oil and gas technologies and new materials. Problems and solutions]. Ufa, Monografiya Publ., 2014. Vol. 3 (8), pp. 243–250.
- Sukhorukov M.P., Torgaeva D.S., Mamlina V.V. Sravnitelny analiz metodov opredeleniya dinamicheskogo urovnya zhidkosti v mezhtrubnom prostranstve neftyanoy skvazhiny [Comparative analysis of methods of determination of dynamic level of liquid in the annular space of oil wells]. *Elektronnye sredstva i sistemy upravleniya. XIII Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya, posvyashchennaya 55-letiyu TUSURa* [Electronic tools and systems management. XIII international scientific-practical conference dedicated to the 55<sup>th</sup> anniversary of TUSUR]. Tomsk, 2017. pp. 178–181.
- Wei Jia, Wei Zhou, Tai-fu Li. A review of dynamic fluid level detection for oil well. *Mechanics and Materials*, 2014, vol. 456, pp. 582–586.
- Burgstaller C. New approaches of using fluid level data for production optimization and reservoir engineering applications. *78<sup>th</sup> EAGE Conference and Exhibition*. Vienna, Austria, 30 May–2 June 2016.
- Sam G., Burgstaller C., Kaestenbauer M., Chevelcha E. Fully automated fluid level measurement tool. *Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition*. Jakarta, Indonesia, 20–22 September 2011.
- Song C., Guan X. The monitoring system design of oil well dynamic fluid level. *Journal of Physics: 4<sup>th</sup> International Conference on Intelligent Computing and Signal Processing*. Xi'an, China, 29–31 March 2019.
- Pugachev E.V., Nalimov G.P., Gaus P.O. Determination of the liquid level and sound speed in the hole clearance of the producing well. *Oil industry*, 2003, no. 2, pp. 50–52. In Rus.
- Denislamov I.Z., Gafarov Sh.A., Zasov P.A., Denislamova A.I. Investigation of fluids composition and processes in the tubing-casing annulus of oil producing wells. *Oilfield engineering*, 2018, no. 4, pp. 38–42. In Rus.
- Nalimov K.G. *Informatsionnaya sistema ekhometrirvaniya mnogoimpul'snymi signalami dlya opredeleniya urovnya zhidkosti v neftedobyvayushchikh skvazhinakh*. Avtoreferat Diss. Kand. nauk [Information system of multi-pulse echometry signals to determine the liquid level in oil wells. Cand. Diss. Abstract]. Tomsk, 2007. 23 p.

14. Lieberman S. Automated continuous fluid level monitoring. *SPE Production Operations Symposium*. Oklahoma City, USA, 16–19 April 2005.
15. Zhou W., Gan L., Zhou P., Li T., Gu X. Study on the measurement method of oil well's dynamic liquid level based on air column resonance. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Zhuhai, China, 28–30 April 2017.
16. Irianto N., Rachmat S., Mucharam L., Indratno W.S. Implementation of Tikhonov regularization in oil well liquid level reading data. *Modern Applied Science*, 2017, vol. 11, no. 10, pp. 81–90.
17. Zhou W., Liu J., Gan L. Dynamic liquid level detection method based on resonant frequency difference for oil wells. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 2018, vol. 26 (6), pp. 2967–2975.
18. Korotaev Yu.P., Shirkovskii A.I. *Dobycha, transport i podzemnoe khranenie gaza* [Production, transport and underground storage of gas]. Moscow, Nedra Publ., 1984. 487 p.
19. Vygodskii E.M., Sultanov V.G., Gafarov Sh.A., Ivanov S.V. *Sposob opredeleniya urovnya zhidkosti v skvazhinakh* [Method for determining the liquid level in wells]. Patent RF, no. 2038473, 1995.
20. Denislamov I.Z., Ishbaev R.R., Yafaev B.M., Denislamova G.I. *Sposob opredeleniya urovnya zhidkosti v skvazhine* [Method for determining the fluid level in the well]. Patent RF, no. 2612704, 2017.
21. Denislamov I.Z., Zeigman Yu.V., Denislamova G.I. *Sposob opredeleniya urovnya zhidkosti v vodozabornoi skvazhine* [Method for determining the liquid level in a water well]. Patent RF, no. 2623756, 2017.
22. Gubaidullin F.R., Sahabutdinov R.Z., Kosmacheva T.F., Sudykin S.N., Sudykin A.N. *Tekhnologii podgotovki sverkhvysokoy nefiti Tatarstana* [Technology of preparation of extra-viscous oil fields in Tatarstan]. Kazan, Tsentr innovatsionnykh tekhnologii Publ., 2015. 280 p.
23. Chen D.F., Han X.L., Jing Y. Discuss on survey method for liquid level of oil well. *Well Testing*, 2008, vol. 17, pp. 60–62.
24. Moiseev V.N. *Primenenie geofizicheskikh metodov v protsesse ekspluatatsii skvazhin* [Application of geophysical methods in well operation]. Moscow, Nedra Publ., 1990. 240 p.
25. Kuznetsov G.S., Leontev E.I., Rezvanov R.A. *Geofizicheskie metody kontrolya razrabotki neftyanykh i gazovykh mestorozhdenii* [Geophysical methods of control of development of oil and gas fields]. Moscow, Nedra Publ., 1991. 223 p.
26. Wu D.N., Liu P.L. To test the liquid level of a pump well by a material balance method. *Well Testing*, 2003, vol. 12, pp. 31–33.
27. Abramov G.S., Barychev A.V., Kayurov K.N., Lukyanov E.E. *Sposob izmereniya urovnya zhidkosti v skvazhine i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [Method for measuring the level of fluid in the well and the device for its implementation]. Patent RF, no. 2232267, 2004.
28. Denislamov I.Z., Enikeev R.M. *Sposob opredeleniya urovnya zhidkosti v skvazhine* [Method for determining the fluid level in the well]. Patent RF, no. 2559979, 2015.
29. Ibragimov N.G., Salikhov I.M., Akhmadullin R.R., Akhmetzyanov M.S., Aslamov N.A. *Sposob opredeleniya urovnya zhidkosti v neftyanoy skvazhine s vysokoy temperaturoy, dobyvayushchey sverkhvysokuyu nefi* [Method for determining the liquid level in a high-temperature oil well producing ultra-viscous oil]. Patent RF, no. 2494248, 2013.
30. Liu Z., Wang H., Yang D. Determination of real-time dynamic fluid levels by analysis of the dynamometer card. *Canadian International Petroleum Conference*. Calgary, Alberta, January 2007.
31. Yang H., Mu L., Zeng Y., Huang W., Xin H., Gan Q., Li M., Zhang L., Han E. Real time calculation of fluid level using dynamometer card of sucker rod pump well. *International Petroleum Technology Conference*. Kuala Lumpur, Malaysia, 10–12 December 2014.
32. Zhang H. Discussion of detecting fluid level by pressure gauge. *Well Testing*, 2003, vol. 12, pp. 81–84.
33. Denislamov I.Z., Bisenova A.A., Enikeev R.M. Learning algorithms for smart wells. *Coiled Tubing Times*, 2015, no. 2, pp. 56–60. In Rus.
34. Staveley C., Djyle C., Coetzee C., Franzen A., Den Boer H., van Rooyen A., Birch W., Biderkab A.B., Moes E. Development and field application of a permanent fiberoptic wellbore fluid level monitoring system. Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference. Abu Dhabi, UAE, 13–16 November 2017.
35. *Razrabotka neftyanykh mestorozhdenii. T. 2. Ekspluatatsiya dobyvayushchikh i nagnetatelnykh skvazhin* [Oil field development. Vol. 2. Operation of production and injection wells.] Eds. N.I. Khisamutdinova, G.Z. Ibragimova. Moscow, VNIIOENG Publ., 1994. 272 p.

Received: 7 October 2019.

#### Information about the authors

**Ildar Z. Denislamov**, Cand. Sc., associate professor, Ufa State Petroleum Technological University.

**Ilias K. Gimaltdinov**, Dr. Sc., professor, Ufa State Petroleum Technological University; corresponding member, Academy of Sciences of the Republic of Bashkortostan.

**Ravil N. Yakubov**, Cand. Sc., associate professor, Ufa State Petroleum Technological University.

**Aliya I. Denislamova**, bachelor student, Ufa State Petroleum Technological University.

УДК 624.131.412

## ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ НА СТРУКТУРУ КАОЛИНИТА В ОГНЕУПОРНЫХ ГЛИНАХ НИЖНЕ-УВЕЛЬСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПО ДАННЫМ ИК-СПЕКТРОСКОПИИ

Ситева Ольга Сергеевна<sup>1</sup>,  
sisesin@rambler.ru

Медведева Наталья Александровна<sup>2</sup>,  
nata-kladova@yandex.ru

Середин Валерий Викторович<sup>2</sup>,  
seredin@nedra.perm.ru

Иванов Дмитрий Владимирович<sup>2</sup>,  
dm-psu@yandex.ru

<sup>1</sup> ООО НИПППД «Недра»,  
Россия, 614064, г. Пермь, ул. Льва Шатрова, 13а.

<sup>2</sup> Пермский государственный национальный исследовательский университет,  
Россия, 614068, г. Пермь, ул. Букирева, 15.

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью изучения структуры каолиновых глин в связи с их широким промышленным применением. Физические и физико-химические свойства глин изменяются при различных техногенных воздействиях на них, что обусловлено преобразованием кристаллической структуры.

**Цель:** изучение влияния давления на структуру каолинита.

**Объект:** каолиновая глина Нижне-Увельского месторождения Челябинской области.

**Метод:** инфракрасная спектроскопия. Инфракрасные спектры регистрировались на ИК Фурье-спектрометре в интервале 400...3800 см<sup>-1</sup>. Обработка ИК-спектров проводилась с помощью программного обеспечения Fspres.

**Результаты** экспериментальных исследований показали, что обогащенная каолиновая глина Нижне-Увельского месторождения Челябинской области, не подверженная воздействию давлением, характеризуется частично упорядоченной (дефектной) структурой. При воздействии давлений от 10 до 650 МПа глина характеризуется частично упорядоченной структурой, при давлениях от 700 до 800 МПа – слабо и неупорядоченной структурой. Обработка каолина давлением повышает дефектность структуры на уровне пакета. Связи между Al-OH, Si-O-Al, внутренними и внутриповерхностными гидроксильными группами разрушаются, что приводит к вытеснению Al из октаэдрического и Si из тетраэдрического листов и формированию «дырочных» энергетических центров в кристаллической решетке каолинита. При этом влияние давления до 150 МПа на формирование дефектов в каолините выше, чем при давлениях от 150 до 800 МПа. Кроме того, при обработке каолина давлением происходит образование дефектов структуры на межпакетном уровне за счет скольжения, вращения и прокатки структурных пакетов между собой.

### Ключевые слова:

Огнеупорная глина, месторождение, каолинит, модификация, инфракрасная спектроскопия, степень совершенства структуры.

### Введение

В настоящее время в связи с широким промышленным применением глин многие исследователи работают над модификацией природных алюмосиликатов для улучшения их поверхностных свойств. К таким свойствам относятся: лиофильность, сорбционная способность, ионный обмен, которые зависят не только от дисперсности грунтов, но и от особенностей реального строения их кристаллической структуры [1, 2].

Наибольшей изменчивостью совершенства (дефектности) структуры среди глинистых минералов обладают минералы группы каолинита [3], хотя кристаллическая решетка минералов этой группы самая простая. Она представляет собой двухслойные пакеты типа 1:1, где чередуются октаэдрические и тетраэдрические слои.

Структурная упорядоченность каолинитов обуславливает поверхностные свойства глинистых частиц при взаимодействии с жидкими и газообразны-

ми средами. Их лиофильность, в свою очередь, определяет степень применения каолиновых глин в качестве огнеупорного сырья в промышленности.

Совершенство структуры природных глин определяется их генезисом. Различают два основных типа каолинов: первичные и вторичные. По данным [4] первичные каолины (элювиальные) являются конечным продуктом выветривания магматических и метаморфических пород, которые остаются на месте своего образования. Вторичные каолины (осадочные или переотложенные) являются производными первичных каолинов. Они образуются вследствие размыва и переотложения в водной среде продуктов каолинового выветривания. Высокая степень совершенства кристаллической структуры характерна для каолинитов, составляющих первичные каолины, низкая – для вторичных каолинов [4].

Согласно Ю.А. Русько [5], под «степенью упорядоченности» каолинита понимается относительная мера нарушения строгой периодичности реальной



исследуемой структуры, вызванная дефектами внутреннего строения отдельных слоев и главным образом неупорядоченностью их взаимного расположения. По мнению Ф.Д. Овчаренко и др. [4], наиболее распространенный тип дефектов структуры каолинита обуславливается неупорядоченностью наложения последующих двухэтажных каолиновых слоев, приводящей к их возможному смещению, а также отклонением формы элементарной ячейки каолинита от триклинной, вызванным нарушением упорядоченности внутри слоя. При многочисленных нарушениях такого характера слои могут располагаться с образованием моноклинной ячейки. По данным, указанным в работах Э.П. Солотчиной и др. [6] и М.А. Пластининой, Е.Г. Куковского [7], основным дефектом упаковки слоев является простое смещение вакансий октаэдрических мест от одного слоя к другому или же от одной области одного и того же слоя к другой.

При определении степени совершенства структуры каолинита в основном используется метод Хинкли. Индекс Хинкли, определяемый по дифрактограммам, варьируется от 1,65 для вполне упорядоченных каолинитов до нуля для неупорядоченных [4].

При изучении глинистых минералов и совершенства структуры каолинитов также используется инфракрасная (ИК) спектроскопия. На колебательный спектр каолинитов оказывают влияние: механическое измельчение [8–12], термическая обработка [9, 13], обработка кислотами и щелочами [14], воздействие давлением [3, 12].

При механическом измельчении происходит ослабление интенсивностей полос поглощения и расширение полос ОН-групп и Si-O. Структура каолинита становится менее совершенной, вплоть до рентгеноаморфного состояния. При термической обработке происходит процесс дегидратации, который затем сменяется на гидроксидирование, при этом происходит уменьшение интенсивностей колебаний всех гидроксильных групп. При воздействии кислоты и щелочи на хорошо упорядоченный каолинит интенсивность пиков в целом сохраняется, а вот у слабо упорядоченного она падает. При обработке каолинита кислотой также образуется аморфный кремний и происходит выход Al из октаэдрического слоя.

По опытным данным В.А. Дрица [3] в одних и тех же условиях под давлением в 5–10 тс/см<sup>2</sup> несовершенные каолиниты становятся рентгеноаморфными, в то время как каолиниты с совершенной структурой выдерживают подобную обработку без существенных изменений. По работам М.А. Пластининой и др. [12] при воздействии давления 686·10<sup>6</sup> Н/м<sup>2</sup> на каолиниты индекс кристалличности Хинкли уменьшался от 1,2 до 0,65, в то время как в ИК-спектре положение, форма и интенсивность полос поглощения не изменились. Авторы предположили, что механизм действия давления заключается в параллельном смещении слоев и не затрагивает энергетического взаимодействия связей в слое. При испытании каолинитов различного генезиса (первичные и вторичные каолины) и месторождений могут быть получены другие показатели в зависимости от совершенства кристаллической структуры.

Таким образом, вопросы оценки дефектности структуры каолиновой глины, подверженной техногенной обработке, изучены недостаточно полно, поэтому **целью** работы является исследование влияния давления на структуру каолинита в глине Нижне-Увельского месторождения.

#### Объект исследования

Объектом исследования являлась обогащенная глина на основе каолинов, добываемых Челябинским рудоуправлением на Нижне-Увельском месторождении. Данное месторождение огнеупорных глин находится в непосредственной близости от ст. Нижне-Увельской Южноуральской железной дороги, в 5 км от г. Южноуральска, в 40 км к северу от г. Троицка Челябинской области. Обзорная геологическая схема представлена на рис. 1.

Залежи глин приурочены к озерно-аллювиальным отложениям наурзумской свиты миоцена. Мощность свиты составляет от 2 до 20 м. Особенности состава пород наурзумской свиты определены тем, что, с одной стороны, материалом для их формирования служили зрелые образования коры выветривания, а с другой – тем, что в условиях влияния климата этот материал претерпел при переотложении существенные преобразования. Добыча на месторождении ведется открытым способом, послойно и селективно. Глины широко используются как огнеупорное, формовочное и керамическое сырье.

Гранулометрический состав природной и обогащенной глин, исследуемых в работе, приведен в табл. 1.

**Таблица 1.** Гранулометрический состав природной и обогащенной каолиновой глины

**Table 1.** Granulometric composition of natural and enriched kaolin clay

Глина каолиновая Kaolin clay	Содержание частиц во фракциях, % Content of particles in fractions, %				
	0,25–0,1	0,1–0,05	0,05–0,01	0,01–0,005	<0,005
	мм/мм				
Природная Natural	0,3	9,5	30,2	15,5	44,5
Обогащенная Enriched	–	–	7,7	7,8	84,5

По результатам рентгеноструктурного анализа обогащенная глина содержит: каолинит (76,7 %), монтмориллонит (15,6 %), кварц (7,7 %) [15].

#### Методика

Подготовка образцов включала в себя обогащение природного каолина и обработку его давлением.

Обогащение природного Челябинского каолина осуществляли методом седиментации для увеличения процентного содержания тонкодисперсной фракции размером менее 0,005 мм. Полученная таким образом глина была высушена и перетерта в порошок. Часть порошка массой около 0,2 г помещалась в рабочую зону специально изготовленного прибора высокого давления [15], рабочие поверхности которого выполнены из твердосплавного материала. После чего прессом подавались вертикальные давления на обра-

зец грунта. В качестве нагрузочного устройства использовался пресс марки ПЛГ-20. Каждый образец уплотнялся под определенным давлением от 10 до

800 МПа. Давление выдерживалось 1 минуту. В результате сжатия и сдвига получены образцы в форме «таблеток» площадью 0,75 см<sup>2</sup>.



**УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ**

НЕОГЕН	МИОЦЕН	ПОЗДНИЙ РАННИЙ-СРЕДНИЙ	90	$N_1^{3zl}$	Жиландинская свита. Глины красные, кирпично-красные, комковатые, вязкие, иногда с железисто-марганцовистым бобовником и карбонатными конкрециями; с линзами песков в основании (до 25 м). Золотоносные и хрусталеносные россыпи, месторождения кирпичных и гончарных глин	
			100	$N_1^{2-3sv}$	Светлинская свита. Глины пестроцветные, желтовато-зеленовато-серые, комковатые, с включениями гипса, с железисто-марганцовистым бобовником и карбонатными конкрециями; прослой разнозернистых песков и галечников (до 35 м). Золотоносные и хрусталеносные россыпи, месторождения кирпичных, гончарных и отбеливающих (бентонитовых) глин	
			300	$N_1^{1-2nr}$	Наурзумская свита. Глины существенно каолинитовые, внизу белые, серые, сверху - пестроцветные; пески кварцевые разнозернистые; галечники кварцево-кремнистые (до 20м). Золотоносные и хрусталеносные россыпи, месторождения и проявления огнеупорных, керамических и кирпичных глин, месторождения строительных и формовочных песков	
	ПАЛЕОГЕН	ОЛИГОЦЕН	ПОЗДНИЙ РАННИЙ-СРЕДНИЙ	700	$P_3kr$	Куртамышская свита. Пески кварцевые мелкозернистые; алевриты, глины гидрослюдисто-каолинитовые серые, иногда тонкоплитчатые, с растительными остатками (до 50 м). Месторождения огнеупорных, кирпичных и цементных глин, строительных, формовочных и стекловых песков
				800	$P_2^{2-3cg}$	Чеганская свита. Глины алевритистые зеленовато-серые листоватые, алевритистые с тонкими прослоями кварцевых и глауконит-кварцевых песков и алевритов (до 90 м). Пункты минерализации сидерита, месторождения кирпичных и керамзитовых глин
				1000	$P_2^{1-2ir}$	Ирбитская свита. Диатомиты и трепелы глинистые и песчаные, глины диатомовые, опоки, глауконит-кварцевые пески и песчаники, в основании иногда гравелиты и галечники (до 95м). Месторождения кирпичных глин и диатомитов
ПАЛЕОЦЕН	ПОЗДНИЙ РАННИЙ-СРЕДНИЙ	1100	$P_2^{sr}$	Серовская свита. Опоки, опоквидные глины; пески и песчаники глауконит-кварцевые с опоко-кремнистым цементом, часто с галечниками в основании (до 60 м)		
		1300	$P_1^{1-2tl}$	Талицкая свита. Глины темно-серые гидрослюдисто-монтмориллонитовые аргиллитоподобные, аргиллиты, пески и песчаники кварц-глауконитовые со стяжениями фосфорита и марказита (до 40 м)		

Рис. 1. Обзорная геологическая схема (по Б.А. Пужакову и др., 2010 г.)

Fig. 1. Survey geological scheme (according to B.A. Puzhakov et al., 2010)

Для инфракрасной спектроскопии образцы глины в виде «таблеток» растирались до порошка (массой не более 0,5–2 мг), затем смешивали с вазелиновым маслом для создания однородного распределения частиц в луче. Полученную однородную пасту аккуратно наносили на солевое окно КВг и раздавливали в тонкий слой вторым окном [16–18].

Вазелиновое масло имеет сильное поглощение в области деформационных ( $1350\text{--}1500\text{ см}^{-1}$ ) и валентных ( $2700\text{--}3000\text{ см}^{-1}$ ) колебаний СН-связей. Согласно литературным данным [19], в данных областях не наблюдаются пики поглощения, характерные для глинистых минералов.

Инфракрасные спектры регистрировались на ИК Фурье-спектрометре ФСМ 1202 фирмы «Инфраспек» в интервале  $400\text{--}3800\text{ см}^{-1}$  с разрешением  $2\text{ см}^{-1}$  (FT-IR), с помощью программного обеспечения Fspec [18].

### Результаты и обсуждения

#### Структура исходного каолина

Для обогащенного образца каолина, не подверженного давлению, получен инфракрасный спектр от  $400$  до  $3800\text{ см}^{-1}$ , который представлен на рис. 2.

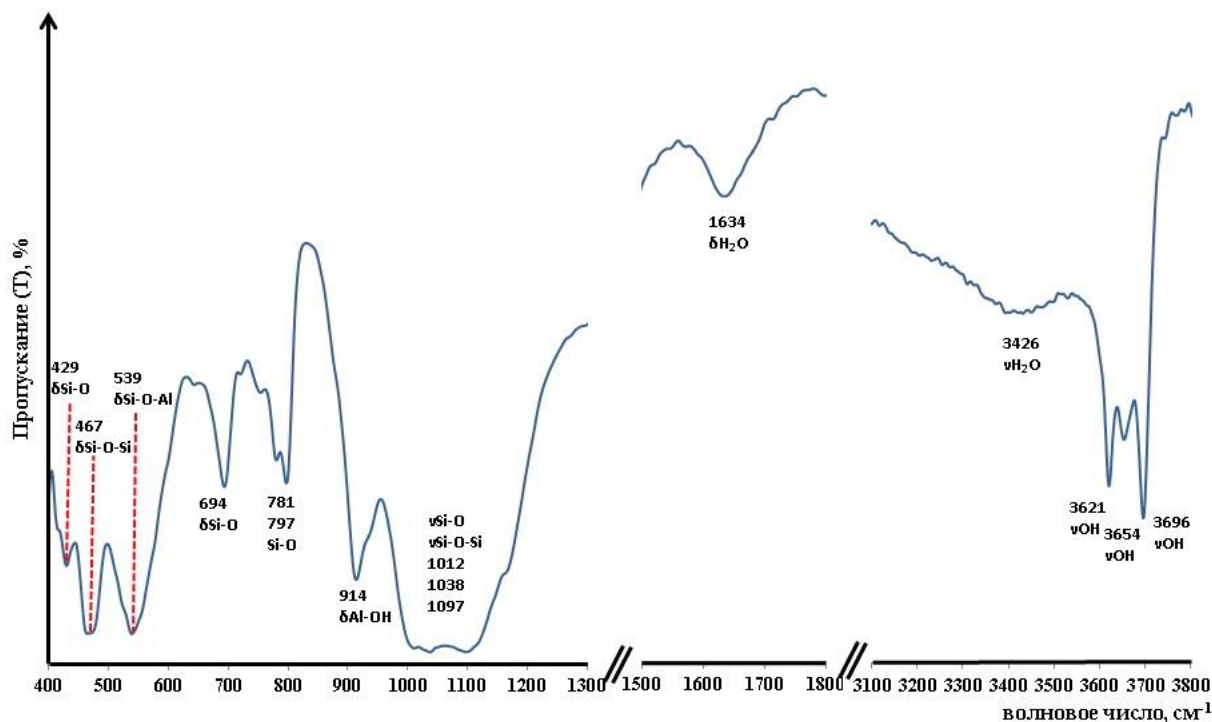


Рис. 2. Инфракрасный спектр исходного каолина

Fig. 2. Infrared spectrum of the native kaolin

Анализ инфракрасного спектра показал, что валентные колебания кремнекислородных групп характерны для области  $950\text{--}1200\text{ см}^{-1}$ . Глинистые минералы группы каолинита имеют две сильные полосы при волновых числах  $1038$  и  $1012\text{ см}^{-1}$ , которые относятся к валентным колебаниям Si-O-Si. Полоса апикальных связей Si-O появляется в районе волнового числа  $1097\text{ см}^{-1}$ .

Деформационные колебания связей Si-O-Si и Si-O находятся в более удаленной области инфракрасного спектра с пиками сильной интенсивности около  $694$ ,  $467$  и  $429\text{ см}^{-1}$ .

Максимум  $914\text{ см}^{-1}$  возникает из-за деформационных колебаний структурных гидроксильных групп, связанных с катионами  $\text{Al}^{3+}$  октаэдрического листа каолинита. Полоса  $539\text{ см}^{-1}$  относится к деформационному колебанию связи Si-O-Al.

Колебания внутренней гидроксильной группы характеризуются поглощением в области  $3621\text{ см}^{-1}$ . К внутриповерхностным OH-группам относятся полосы в интервале частот  $3696$  и  $3654$ , а также слабо выра-

женный пик  $3672\text{ см}^{-1}$ . Внутренние OH-группы расположены в плоскости, общей для октаэдрического и тетраэдрического листов. Они присутствуют как у каолинита, так и у монтмориллонита. Внутриповерхностные OH-группы расположены на поверхности октаэдрических слоев напротив тетраэдрических кислородов соседнего каолинитового пакета. Они отсутствуют в структуре монтмориллонита [20].

Широкая полоса поглощения с максимумом  $3426\text{ см}^{-1}$  отвечает валентным колебаниям молекул воды, адсорбированных на поверхности частиц. Полоса поглощения с максимумом  $1634\text{ см}^{-1}$  принадлежит деформационным колебаниям молекул воды.

Согласно проведенному ранее рентгеноструктурному анализу [15], глина содержит  $7,7\%$  кварца и  $15,6\%$  монтмориллонита. Колебания молекул кварца в инфракрасном спектре частично накладываются на колебания связи Si-O каолинита, но имеют характерный дуплет в диапазоне  $781$  и  $797\text{ см}^{-1}$  [19]. Колебания глинистых минералов группы монтмориллонита схожи с колебаниями минералов группы каолинита,

за исключением колебаний внутриверхностных ОН-групп, которые отсутствуют в монтмориллоните.

В табл. 2 приведено сравнение полученных нами экспериментальных данных с данными по литературному обзору [19–28].

Из таблицы видно, что полосы поглощения, полученные нами, сопоставимы с опубликованными данными [19–28].

Из чего следует, что для обогащенной каолиновой глины, не обработанной давлением, выявлены полосы поглощения, которые не противоречат литературным данным.

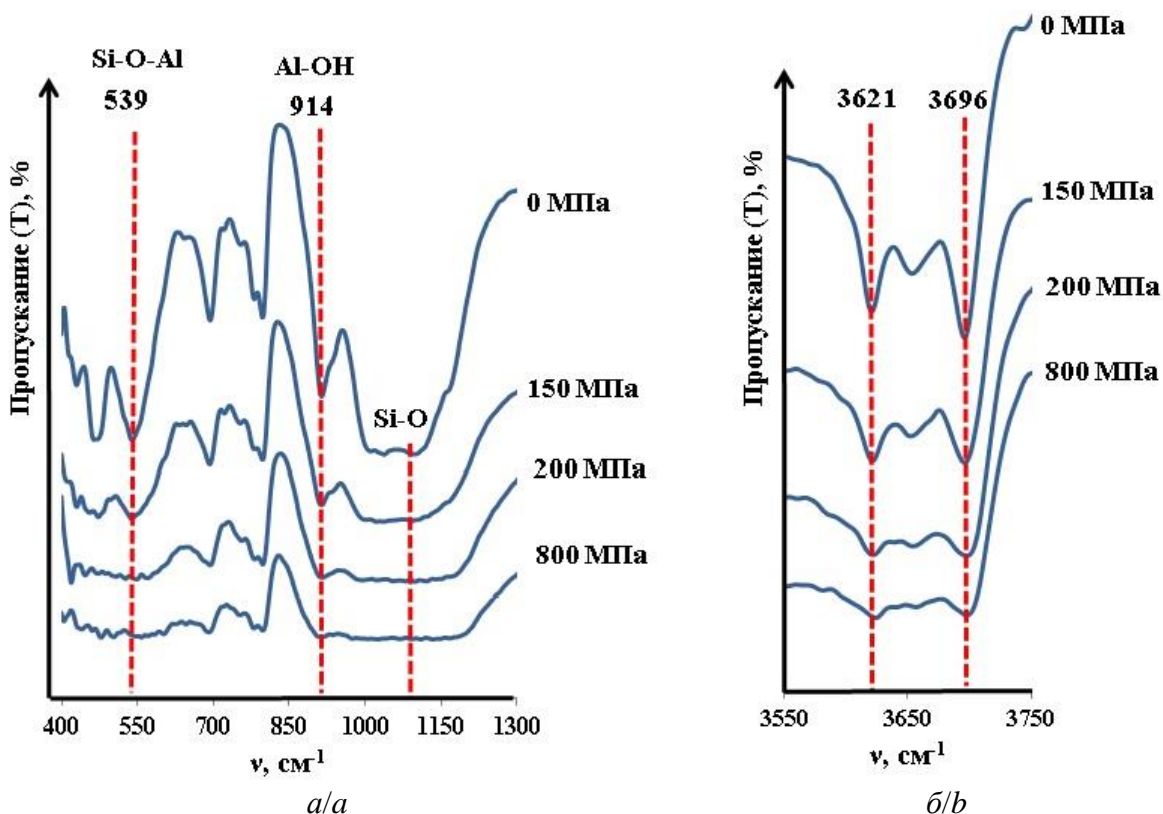
Влияние давления на изменение структуры каолинита

Воздействие давлением на образцы каолина приводит к тому, что на инфракрасных спектрах наблюдается снижение интенсивностей полос пропускания всех связей и уширение некоторых. На рис. 3, а, б представлен колебательный спектр в диапазоне волновых чисел 400–1300 см<sup>-1</sup> и 3550–3750 см<sup>-1</sup> отмученных образцов глин, подверженных сжатию при давлениях 150, 200 и 800 МПа. Особое внимание стоит уделить деформационным колебаниям связей Si-O-Al, Al-OH и, в особенности, валентным колебаниям гидроксильных групп, которые являются чувствительным индикатором совершенства кристаллической структуры каолинита.

**Таблица 2.** Полосы поглощения исходного образца каолина

**Table 2.** Absorption bands of the original kaolin sample

Природа колебаний Nature of vibrations	Полосы поглощения исходного образца каолинита, см <sup>-1</sup> Absorption bands of the original kaolin sample, cm <sup>-1</sup>	Полосы поглощения по литературным данным, см <sup>-1</sup> Absorption bands according to the literature review, cm <sup>-1</sup>
νOH <sub>внутриверхностные</sub> νOH <sub>inner-surface</sub>	3696	3705–3690
	3672	3671–3663
	3654	3652–3650
νOH <sub>внутренние</sub> νOH <sub>inner</sub>	3621	3635–3620
νH <sub>2</sub> O	3426	3440–3416
δH <sub>2</sub> O	1634	1605–1650
νSi-O	1097	1115–1100
νSi-O-Si	1038	1037–1033
	1012	1012–1002
δAl-OH	914	940–935
		918–915
Si-O (кварц дублет) Si-O (quartz doublet)	797	797
	781	779
δSi-O	694	695–694
δSi-O-Al	539	545–510
δSi-O-Si	467	470
δSi-O	429	433–425



**Рис. 3.** Инфракрасный спектр образцов каолина, подверженных сжатию, в диапазоне волновых чисел 400–1300 см<sup>-1</sup> (а) и 3550–3750 см<sup>-1</sup> (б)

**Fig. 3.** Infrared spectrum of kaolin samples subjected to compression in the range of wave numbers 400–1300 cm<sup>-1</sup> (a) and 3550–3750 cm<sup>-1</sup> (b)

Из рис. 3, *a* видно, что полоса колебаний Si-O-Al (максимум которой соответствует волновому числу  $539\text{ см}^{-1}$ ) до давления 150 МПа уменьшается, а при давлениях свыше 200 МПа становится размытой, затем совсем пропадает. Это говорит о нарушении связи и вытеснении Al из кристаллической решетки каолинита.

Полоса валентных колебаний кремнекислородных групп в области  $950\text{--}1200\text{ см}^{-1}$  также ослабевает и расширяется при увеличении давления. Возможной причиной является искажение самих структурных многогранников в кристаллической решетке минералов (их сплющивание, расширение, разворот и т. д.).

Интенсивность полос колебаний гидроксильных групп Al-OH (с максимумом волнового числа  $914\text{ см}^{-1}$ ), внутренних гидроксидов ( $3621\text{ см}^{-1}$ ), внутриверхностных гидроксидов ( $3696\text{ см}^{-1}$ ) при возрастании давления также уменьшается. Но в отличие от колебания связи Si-O-Al, эти полосы прослеживаются в инфракрасном спектре при давлениях до 800 МПа.

У образца каолина при  $P=0$  МПа полоса OH-внутриверхностных гидроксидов ( $3696\text{ см}^{-1}$ ) более сильная, чем OH-внутренних гидроксидов ( $3621\text{ см}^{-1}$ ). Это обусловлено кристаллическим строением минералов группы каолинита. В интервале пороговых давлений 150–200 МПа и выше наблюдается выравнивание интенсивностей двух пиков, что связано с более интенсивным разрывом связей OH-внутриверхностных гидроксидов, которые разрушаются в первую очередь при механическом сжатии. Выравнивание интенсивностей OH-полос  $3621$  и  $3696\text{ см}^{-1}$  должно свидетельствовать также о меньшей степени упорядоченности распределения Al в октаэдрических позициях.

Можно заключить, что при обработке каолина давлением наблюдается изменение (уменьшение) интенсивности полос колебаний и уширение рефлекса (пика) на половине его высоты. Эти изменения можно трактовать, как изменение (увеличение) дефектности структуры минералов группы каолинита. Также обработка каолина давлением может вызывать скольжение, вращение и прокатку структурных пакетов между собой.

Для оценки дефектности структуры каолинита проведен качественный и количественный анализ ИК-спектров.

#### Оценка степени дефектности структуры каолинита

Качественная оценка степени совершенства структуры каолинита

По качественному критерию, наличию гидроксильных групп, структуру исходного образца Челябинского каолинита можно охарактеризовать как частично упорядоченную, так как в инфракрасном спектре присутствуют три четких пика колебаний OH-групп  $3696$ ,  $3654$ ,  $3621\text{ см}^{-1}$  и один слабо выраженный пик  $3672\text{ см}^{-1}$ . Упорядоченный (бездефектный) каолинит имеет все четыре четкие полосы поглощения около  $3696$ ,  $3672$ ,  $3654$  и  $3621\text{ см}^{-1}$  [13, 21, 28].

В каолините, обработанном давлением  $P=10\text{--}800$  МПа, наблюдались существенные изменения полос поглощения гидроксильных групп. При увеличе-

нии давления до 125–200 МПа происходит слияние слабого пика  $3672\text{ см}^{-1}$  и пика  $3654\text{ см}^{-1}$  в один общий пик, что характерно для частично упорядоченного каолинита. Полоса этого объединенного пика прослеживается до давления 650 МПа, после чего пропадает. При более высоких давлениях до 800 МПа выделяются только два пика – около  $3696$  и  $3621\text{ см}^{-1}$ , что объясняется слабо- и неупорядоченной структурой каолинита.

Следовательно, по качественному критерию при давлениях от 10 до 650 МПа каолинит характеризуется частично упорядоченной структурой, при давлениях от 700 до 800 МПа – слабо и неупорядоченной структурой.

Количественная оценка степени совершенства структуры каолинита

Для количественной оценки совершенства (дефектности) структуры каолинита использовалась высота полос пропускания на ИК-спектрах.

Из рис. 3 видно, что с увеличением давления наблюдается тенденция к уменьшению интенсивности полос пропускания. Так, высота полосы Al-OH уменьшается в 5 раз,  $OH_{\text{внутр}}$  – в 2 раза и  $OH_{\text{внутриверх}}$  – в 2,5 раза.

Снижение интенсивности свидетельствует о том, что связи между Al-OH, Si-O-Al,  $OH_{\text{внутр}}$ ,  $OH_{\text{внутриверх}}$  в кристаллической решетке каолинита разрушаются. Это приводит к вытеснению Al из октаэдрического и Si из тетраэдрического листов каолинита. Такое вытеснение формирует «дырочные» энергетические зоны в кристаллической решетке минерала, которые во многом определяют физико-химические свойства глин. При этом влияние давления до  $P=150$  МПа на формирование дефектов в каолините выше, чем давления  $P=150\text{--}800$  МПа, что согласуется с ранее полученными данными [29].

Для оценки степени дефектности используется критерий интенсивности гидроксильных групп ( $R$ ). Он трактуется следующим образом, чем ниже значение  $R$ , тем выше дефектность структуры каолинита. Критерий  $R$  рассчитывается по формуле:

$$R = D_{3696}/D_{3621},$$

где  $D$  – оптическая плотность в максимуме полосы поглощения.

Результаты экспериментальных исследований представлены на рис. 4.

Из рис. 4 видно, что с увеличением давления показатель  $R$  снижается, то есть дефектность структуры возрастает. Полученные данные согласуются с результатами исследований других авторов [12, 30], которые отмечали, что более высокие значения  $R$  наблюдаются в каолинах с более совершенной структурой.

В ранее проведенных исследованиях [31] авторы пришли к схожим выводам. Так, по данным рентгеновской дифрактометрии при воздействии давлений до 800 МПа наблюдается уширение рефлексов, в то время как интегральная интенсивность рефлексов уменьшается. Это свидетельствует об увеличении дефектности кристаллической структуры, переходе от

упорядоченных к неупорядоченным каолинитам и образованию аморфной фазы.

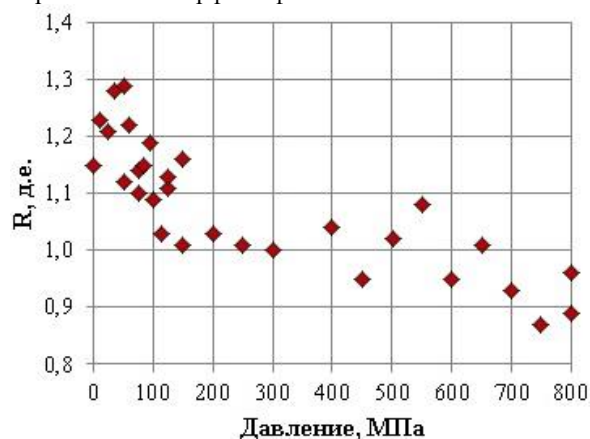


Рис. 4. Изменение отношения интенсивностей полос 3696 и 3621  $\text{см}^{-1}$

Fig. 4. Changes in the intensity ratio of the bands of 3696 and 3621  $\text{cm}^{-1}$

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Куковский Е.Г. Превращения слоистых силикатов. – Киев: Изд-во «Наукова думка», 1973. – 101 с.
2. Медведева Н.А., Ситева О.С., Середин В.В. Сорбционная способность глин, подверженных сжатию // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2018. – Т. 18. – № 2. – С. 118–128. DOI: 10.15593/2224-9923/2018.4.2
3. Дриц В.А. Природа нарушения упорядоченности в структурах некоторых слоистых силикатов // Рентгенография минерального сырья: сб. статей. – 1966. – Вып. 5. – С. 94–105.
4. Каолины Украины / Ф.Д. Овчаренко, Н.Н. Круглицкий, Ю.А. Русько, И.И. Мороз, М.С. Комская, Ю.Н. Теодорович. – Киев: Изд-во «Наукова думка», 1982. – 367 с.
5. Русько Ю.А. Структурные и морфологические различия каолинита в породах коры выветривания украинского щита // Каолины. – М.: Изд-во «Наука», 1974. – С.95–106.
6. Солотчина Э.П., Сухоруков Ф.В. О тонкой кристаллической структуре каолинитов коры выветривания на гранитах // Доклады Академии наук СССР. – 1979. – Т. 244. – № 4. – С. 964–968.
7. Пластинина М.А., Куковский Е.Г. Степень совершенства каолинитов по данным рентгенографии и ИК-спектроскопии // Минералогический журнал. – 1979. – Т. 1. – № 2. – С. 67–72.
8. Murray H.H., Lyons S.C. Further correlations of kaolinite crystallinity with chemical and physical properties // Clays Mineralogy. – 1960. – V. 8. – P. 11–17.
9. The effect of micronization on kaolinites and their sorption behavior / G. Suraj, C.S.P. Iyer, S. Rugmini, M. Lalithambika // Applied Clay Science. – 1997. – V. 12. – P. 111–130.
10. Modification of low- and high-defect kaolinite surfaces: implications for kaolinite mineral processing / R.L. Frost, E. Horváth, É. Makó, J. Kristóf // Journal of Colloid and Interface Science. – 2004. – V. 270. – P. 337–346.
11. Вяхирев Н.П. Промежуточные формы в непрерывном ряду аморфное вещество – каолинит // Рентгенография минерального сырья: сб. статей. – 1966. – Вып. 5. – С. 128–131.
12. Некоторые особенности проявления несовершенства каолинитов на их инфракрасных спектрах поглощения / М.А. Пластинина, Е.Г. Куковский, Ю.Г. Федоренко, В.М. Кадошников // Минералогический сборник. – 1979. – № 33. – Вып. 1. – С. 27–32.
13. Тарасевич Ю.И., Овчаренко Ф.Д. Адсорбция на глинистых минералах. – Киев: Изд-во «Наукова думка», 1975. – 351 с.
14. Pentrak M., Madejova J., Komadel P. Acid and alkali treatment of kaolins // Clay Minerals. – 2009. – V. 44. – P. 511–523.
15. Влияние давления на площадь активной поверхности частиц глинистых грунтов / В.В. Середин, А.В. Растегаев, Н.А. Медведева, Т.Ю. Паршина // Инженерная геология. – 2017. – № 3. – С. 18–27. DOI: 10.25296/1993-5056-2017-3-18-27.

#### Выводы

1. Обогащенная каолиновая глина, не подверженная воздействию давления, характеризуется частично упорядоченной (дефектной) структурой по данным ИК-спектроскопии. При воздействии давлений от 10 до 650 МПа глина характеризуется частично упорядоченной структурой, при давлениях от 700 до 800 МПа – слабо- и неупорядоченной структурой.
2. Обработка каолина давлением повышает дефектность структуры на уровне пакета. Связи Al-OH, Si-O-Al, OH<sub>внутр.</sub>, OH<sub>внутриповерх</sub> в кристаллической решетке минералов группы каолинита разрушаются, что приводит к вытеснению Al из октаэдрического и Si из тетраэдрического листов и формированию «дырочных» энергетических центров в кристаллической решетке. При этом влияние давления до 150 МПа на формирование дефектов в каолините выше, чем при давлении от 150 до 800 МПа.

16. Кубекова Ш.Н., Танау А. Использование метода ИК-спектроскопии для определения молекулярного состава неорганических веществ. Методические указания к лабораторным занятиям. – Алматы: КазНТУ им. К.И. Сатпаева, 2014. – 17 с.
17. Папко Л.Ф., Кравчук А.П. Физико-химические методы исследования неорганических веществ и материалов. Практикум. – Минск: БГТУ, 2013. – 95 с.
18. Специализированный практикум по физико-химическим методам анализа: Теория и практика. Ч. II / А.П. Нечипоренко, С.М. Орехова, Л.В. Плотнокова, Е.Н. Глазачева, К.В. Волкова, М.В. Успенская. – СПб.: Университет ИТМО, 2016. – 181 с.
19. Chukanov N.V. Infrared spectra of mineral species. – Dordrecht: Springer, 2014. – 1726 p.
20. Плюснина И.И. Инфракрасные спектры минералов. – М.: Изд-во Моск. Ун-та, 1976. – 190 с.
21. Уоррел У. Глины и керамическое сырье. – М.: Изд-во «Мир», 1978. – 241 с.
22. Идентификация минеральных макрокомпонентов неорганической части канско-ачинских углей / А.С. Заворин, К.В. Буваков, В.Е. Гладков, Л.Г. Красильникова // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309. – № 4. – С. 123–129.
23. Defects in structure as the sources of the surface charges of kaolinite / Xiaoyan Zhu, Zhichao Zhu, Xinrong Lei, Chunjie Yan // Applied Clay Science. – 2016. – V. 124–125. – P. 127–136.
24. Insight into morphology and structure of different particle sized kaolinites with same origin / Yude Zhang, Qinfu Liu, Jingjing Xiang, Shilong Zhang, R.L. Frost // Journal of Colloid and Interface Science. – 2014. – V. 426. – P. 99–106.
25. Madejova J., Gates W.P., Petit S. Ch. 5. IR Spectra of Clay Minerals // Developments in Clay Science. – 2017. – V. 8. – P. 107–149. DOI: 10.1016/B978-0-08-100355-8.00005-9.
26. Characterization and differentiation of kaolinites from selected Czech deposits using infrared spectroscopy and differential thermal analysis / L. Vaculikova, E. Plevova, S. Vallova, I. Koutnik // Acta Geodynamica et Geomaterialia. – 2011. – V. 8. – № 1 (161). – P. 59–67.
27. A spectroscopic comparison of selected Chinese kaolinite, coal bearing kaolinite and halloysite – a mid-infrared and near-infrared study / Hongfei Cheng, Jing Yang, Qinfu Liu, Jinshan Zhang, R.L. Frost // Spectrochimica Acta Part A. – 2010. – V. 77. – P. 856–861.
28. Wilson M.J. Clay mineralogy: spectroscopic and chemical determinative methods. – London: Chapman & Hall, 1994. – 367 p.
29. Закономерности изменения содержания связанной воды в каолиновой глине при ее сжатии высокими давлениями / В.В. Середин, Н.А. Медведева, А.В. Анохина, А.В. Андриа-

- нов // Вестник Пермского университета. – 2018. – Т. 17. – № 4. – С. 359–369. DOI: 10.17072/psu.geol.17.4.359
30. Дятлова Е.М., Бобкова Н.М., Сергиевич О.А. ИК-спектроскопическое исследование каолинового сырья белорусских месторождений // Проблемы недропользования. – 2019. – № 2. – С. 143–149.
31. Влияние давления и гранулометрического состава на энергетическую активность глин / В.В. Середин, А.В. Растегаев, В.И. Галкин, Т.Ю. Паршина, Г.А. Исаева // Инженерная геология. – 2017. – № 4. – С. 62–71. DOI: 10.25296/1993-5056-2017-4-62-71.

Поступила 03.06.2020 г.

#### Информация об авторах

**Ситева О.С.**, инженер-геолог, ООО НИПППД «Недра».

**Медведева Н.А.**, кандидат химических наук, доцент кафедры физической химии Пермского государственного национального исследовательского университета.

**Середин В.В.**, доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий кафедрой инженерной геологии Пермского государственного национального исследовательского университета.

**Иванов Д.В.**, старший преподаватель кафедры фармакологии и фармации Пермского государственного национального исследовательского университета.

UDC 624.131.412

## INFLUENCE OF PRESSURE ON KAOLINITE STRUCTURE IN FIRE-CLAYS OF THE NIZHNE-UVELSKOE DEPOSIT BY IR SPECTROSCOPY

**Olga S. Siteva**<sup>1</sup>,  
sisesin@rambler.ru

**Natalia A. Medvedeva**<sup>2</sup>,  
nata-kladova@yandex.ru

**Valeriy V. Seredin**<sup>2</sup>,  
seredin@nedra.perm.ru

**Dmitriy V. Ivanov**<sup>2</sup>,  
dm-psu@yandex.ru

<sup>1</sup> «Nedra»,  
13a, Lva Shatrova street, Perm, 614064, Russia.

<sup>2</sup> Perm State National Research University,  
15, Bukirev street, Perm, 614068, Russia.

**The research is relevant** due to the need to study the structure of kaolin clays in relation to their wide industrial application. Physical and physico-chemical properties of clays change under various technogenic impacts on them. The change is caused by crystalline structure transformation.

**The main aim** of the research is to study the effect of pressure on the structure of kaolinite.

**The object** of the research is the kaolin clay of the Nizhne-Uvelskoe deposit of the Chelyabinsk region.

**The method** of the research is the infrared spectroscopy. Infrared spectra were recorded on an IR Fourier-spectrometer in the range 400...3800 cm<sup>-1</sup>. IR spectrum was processed using Fspec software.

**The results** of experimental studies showed that the enriched kaolin clay of the Nizhne-Uvelskoe deposit of the Chelyabinsk region, which was not exposed to pressure, is characterized by a partially ordered (defective) structure. Under the influence of pressures from 10 to 650 MPa, the clay is characterized by a partially ordered structure, at pressures from 700 to 800 MPa – a poorly ordered and disordered structure. Pressure treatment of kaolin increases the defectiveness of the structure at the packet level. The bonds between Al-OH, Si-O-Al, inner and inner-surface hydroxyls are destroyed, which leads to the displacement of Al from the octahedral and Si from tetrahedral sheets and the formation of «hole» energy centers in the kaolinite crystal lattice. Moreover, the effect of pressure up to 150 MPa on formation of defects in kaolinite is higher than at pressures from 150 to 800 MPa. In addition, during the processing of kaolin by pressure, structural defects are formed at the inter packet level due to sliding, rotation and rolling of structural packets between themselves.

### Key words:

Fire-clay, deposit, kaolinite, modification, infrared spectroscopy, degree of structure perfection.

### REFERENCES

- Kukovskiy E.G. *Prevrashcheniya sloistykh silikatov* [Transformations of layered silicates]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1973. 101 p.
- Medvedeva N.A., Siteva O.S., Seredin V.V. Sorption ability of clays exposed to compression. *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Geology. Oil and gas and mining*, 2018, vol. 18, no. 2, pp. 118–128. In Rus. DOI: 10.15593/2224-9923/2018.4.2
- Drits V.A. Priroda narusheniya uporyadochennosti v strukturakh nekotorykh sloistykh silikatov [The nature of the disorder in the structures of some layered silicates]. *Rentgenografiya mineralnogo syr'ya*, 1966, vol. 5, pp. 94–105.
- Ovcharenko F.D., Kruglitskiy N.N., Rusko Yu.A., Moroz I.I., Komskeya M.S., Teodorovich Yu.N. *Kaoliny Ukrainy* [Kaolins of Ukraine]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1982. 367 p.
- Rusko Yu.A. Strukturnye i morfologicheskie razlichiya kaolinita v porodakh kory vyvetrivaniya ukrainskogo shchita [Structural and morphological differences of kaolinite in the rocks of the weathering crust of the Ukrainian shield]. *Kaoliny* [Kaolins]. Moscow, Nauka Publ., 1974. pp. 95–106.
- Solotchina E.P., Sukhorukov F.V. O tonkoy kristallicheskoj strukture kaolinitov kory vyvetrivaniya na granitakh [The fine crystal structure kaolinites weathering crust on granites]. *Doklady Akademii nauk SSSR*, 1979, vol. 244, no. 4. pp. 964–968.
- Plastinina M.A., Kukovskiy E.G. Stepen sovershenstva kaolinitov po dannym rentgenografii i IK-spektroskopii [The degree of perfection of kaolinites according to x-ray and infrared spectroscopy]. *Mineralogicheskij zhurnal*, 1979, vol. 1, no. 2, pp. 67–72.
- Murray H.H., Lyons S.C. Further correlations of kaolinite crystallinity with chemical and physical properties. *Clays Mineralogy*, 1960, vol. 8, pp. 11–17.
- Suraj G., Iyer C.S.P., Rugmini S., Lalithambika M. The effect of micronization on kaolinites and their sorption behavior. *Applied Clay Science*, 1997, vol. 12, pp. 111–130.
- Frost R.L., Horváth E., Makó É., Kristóf J. Modification of low- and high-defect kaolinite surfaces: implications for kaolinite mineral processing. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2004, vol. 270, pp. 337–346.
- Vyakhirev N.P. Promezhutochnye formy v nepreryvnom ryadu amorfnoe veshchestvo – kaolinit [Intermediate forms in a continuous row amorphous substance – kaolinite]. *Rentgenografiya mineralnogo syr'ya*, 1966, vol. 5, pp. 128–131.
- Plastinina M.A., Kukovskiy E.G., Fedorenko Yu.G., Kadoshnikov V.M. Nekotorye osobennosti proyavleniya nesovershenstva kaolinitov na ikh infrakrasnykh spektrakh pogloshcheniya [Some features of the manifestation of imperfection of kaolinites on their infrared absorption spectra]. *Mineralogicheskij sbornik*, 1979, vol. 1, no. 33, pp. 27–32.
- Tarasevich Yu.I., Ovcharenko F.D. *Adsorbtsiya na glinistykh mineralakh* [Adsorption on clay minerals]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1975. 351 p.
- Pentak M., Madejova J., Komadel P. Acid and alkali treatment of kaolins. *Clay Minerals*, 2009, vol. 44, pp. 511–523.



15. Seredin V.V., Rastegaev A.V., Medvedeva N.A., Parshina T.Yu. Influence of pressure on the active surface area of clay soil particles. *Engineering Geology*, 2017, no. 3, pp. 18–27. In Rus. DOI: 10.25296/1993-5056-2017-3-18-27.
16. Kubekova Sh.N., Tanau A. *Ispolzovanie metoda IK-spektroskopii dlya opredeleniya molekulyarnogo sostava neorganicheskikh veshchestv* [Use of IR spectroscopy for determining the molecular composition of inorganic substances]. Almaty, KazNTU by K.I. Satpaeva, 2014. 17 p.
17. Papko L.F., Kravchuk A.P. *Fiziko-khimicheskie metody issledovaniya neorganicheskikh veshchestv i materialov* [Physico-chemical methods for the study of inorganic substances and materials]. Minsk, BGTU Publ., 2013. 95 p.
18. Nechiporenko A.P., Orekhova S.M., Plotnikova L.V., Glazacheva E.N., Volkova K.V., Uspenskaya M.V. *Spetsializirovanny praktikum po fiziko-khimicheskim metodam analiza: teoriya i praktika. Ch. II* [Specialized workshop on physico-chemical methods of analysis: theory and practice. P. II]. St-Petersburg, ITMO University Publ., 2016. 181 p.
19. Chukanov N.V. *Infrared spectra of mineral species*. Dordrecht, Springer, 2014. 1726 p.
20. Plyusnina I.I. *Infrakrasnye spektry mineralov* [Infrared spectra of minerals]. Moscow, Moscow University Publ., 1976. 190 p.
21. Uorrel U. *Gliny i keramicheskoe syre* [Clays and ceramic raw materials]. Moscow, Mir Publ., 1978. 241 p.
22. Zavorin A.S., Buvakov K.V., Gladkov V.E., Krasilnikova L.G. Identification of the mineral macrocomponents of the inorganic part of the Kansk-Achinsk coal. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2006, vol. 309, no. 4, pp. 123–129.
23. Xiaoyan Zhu, Zhichao Zhu, Xinrong Lei, Chunjie Yan. Defects in structure as the sources of the surface charges of kaolinite. *Applied Clay Science*, 2016, vol. 124–125, pp. 127–136.
24. Yude Zhang, Qinfu Liu, Jingjing Xiang, Shilong Zhang, Frost R.L. Insight into morphology and structure of different particle sized kaolinites with same origin. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2014, vol. 426, pp. 99–106.
25. Madejova J., Gates W.P., Petit S. Ch. 5. IR Spectra of Clay Minerals. *Developments in Clay Science*, 2017, vol. 8, pp. 107–149. DOI: 10.1016/B978-0-08-100355-8.00005-9.
26. Vaculikova L., Plevova E., Vallova S., Koutnik I. Characterization and differentiation of kaolinites from selected Czech deposits using infrared spectroscopy and differential thermal analysis. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, 2011, vol. 8, no. 1 (161), pp. 59–67.
27. Hongfei Cheng, Jing Yang, Qinfu Liu, Jinshan Zhang, Frost R.L. A spectroscopic comparison of selected Chinese kaolinite, coal bearing kaolinite and halloysite – a mid-infrared and near-infrared study. *Spectrochimica Acta*, 2010, vol. 77, pp. 856–861.
28. Wilson M.J. Clay mineralogy: spectroscopic and chemical determinative methods. London, Chapman & Hall, 1994. 367 p.
29. Seredin V.V., Rastegaev A.V., Galkin V.I., Isaeva G.A., Parshina T.Yu. Changes of energy potential on clay particle surfaces at high pressures. *Applied Clay Science*, 2018, vol. 155, pp. 8–14. DOI: 10.1016/j.clay.2017.12.042
30. Dyatlova E.M., Bobkova N.M., Sergievich O.A. IR-study of kaolin materials of Belarusian deposits. *Problem of the subsoil use*, 2019, no. 2, pp. 143–149. In Rus.
31. Seredin V.V., Rastegaev A.V., Galkin V.I., Parshina T.Yu., Isaeva G.A. Influence of pressure and particle-size composition on energy activity of clays. *Engineering Geology*, 2017, no. 4, pp. 62–71. In Rus. DOI: 10.25296/1993-5056-2017-4-62-71.

Received: 3 June 2020.

#### Information about the authors

**Olga S. Siteva**, geologist, «Nedra».

**Natalia A. Medvedeva**, Cand. Sc., associate professor, Perm State National Research University.

**Valeriy V. Seredin**, Dr. Sc., professor, head of the Department of Engineering Geology, Perm State National Research University.

**Dmitriy V. Ivanov**, lecturer, Perm State National Research University.

**Компьютерная верстка** *О.Ю. Аршинова*  
**Корректурa и перевод на английский язык** *С.В. Жаркова*  
**Дизайн обложки** *Т.В. Буланова*

Фотографии на обложке взяты из личного архива  
*Валерия Касаткина*

Руководство для авторов и образец оформления статьи: [izvestiya.tpu.ru](http://izvestiya.tpu.ru)

Подписано к печати 29.06.2020. Формат 60x84/8. Бумага «Снегурочка».  
Печать XEROX. Усл. печ. л. 25,36. Уч.-изд. л. 22,93.  
Заказ 83-20. Тираж 500 экз.



**Издательство**

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ