

**ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ**

Том 328, № 6, 2017

**ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА.
ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ**

Редакционная коллегия

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

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

Подписной индекс в объединённом каталоге «Пресса России» – 18054

© ФГАОУ ВО НИ ТПУ, 2017

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

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

Учредителем является Томский политехнический университет.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Окончательное решение по публикации статьи принимает главный редактор журнала.

Все материалы размещаются в журнале на бесплатной основе.

Журнал издается ежемесячно.

Полнотекстовый доступ к электронной версии журнала возможен на сайтах www.elibrary.ru, scholar.google.com

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

Volume 328, № 6, 2017

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

Editorial Board

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

© Tomsk Polytechnic University, 2017

AIMS AND SCOPES

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

The journal was founded in 1903.

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

ISSN (print) – 2500-1019

ISSN (on-line) – 2413-1830

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

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

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

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

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

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

The publication of manuscripts is free of charge.

The journal is on open access on
www.elibrary.ru, scholar.google.com.

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

- Широкинский рудный узел (восточное Забайкалье): условия образования, геохимия пород и руд, связь оруденения с магматизмом**
Абрамов Б.Н., Калинин Ю.Ал., Ковалев К.Р., Посохов В.Ф.
- Эколого-экономические аспекты ресурсосбережения при разработке месторождений полезных ископаемых**
Голик В.И., Разоренов Ю.И., Лукьянов В.Г.
- Математическое моделирование солнечной радиации с использованием многолетних метеорологических рядов, находящихся в открытом доступе**
Карамов Д.Н.
- Имитационная модель режимов работы автономной фотоэлектрической станции с учетом реальных условий эксплуатации**
Обухов С.Г., Плотников И.А.
- Эколого-гидрогеохимические последствия отработки вольфрамовых и молибденовых месторождений Восточного Забайкалья**
Чечель Л.П.
- Физико-химические свойства трудноизвлекаемых нефтей Российской Арктики**
Ященко И.Г., Полищук Ю.М.
- Вибростойкие металлокерамические пористые проницаемые СВС-материалы на основе окислы легированной стали и добавками ферросилиция**
Коломеец М.А., Мельберт А.А., Маецкий А.В., Новоселова Т.В., Тубалов Н.П., Яковлева О.В.
- Моделирование тепловых и гидравлических процессов в магистральном газопроводе**
Базаров А.А., Данилушкин А.И.
- Численное решение задачи об образовании гидрата двуоксида углерода в пористом пласте, изначально насыщенном гидратом метана**
Гималтдинов И.К., Столповский М.В., Додова М.И.
- Моделирование и идентификация узлов нагрузки с нелинейными вольтамперными характеристиками по данным измерений**
Харлов Н.Н., Булыга Л.Л.
- Дендрогеохимические особенности ископаемой лиственницы (урочище Пазырык) и современных лиственниц Горного Алтая**
Рихванов Л.П., Робертус Ю.В., Миронова А.С., Бакшт Ф.Б., Судыко А.Ф.
- 6 Shirokinsky ore cluster (eastern Trans-Baikal): formation conditions, petrochemistry of rocks and ores, association between mineralization and magmatism**
Abramov B.N., Kalinin Yu.Al., Kovalev K.R., Posokhov V.F.
- 18 Environmental and economic aspects of resource saving in mining**
Golik V.I., Razorenov Yu.I., Lukyanov V.G.
- 28 Mathematical modeling of solar radiation based on open access long-term meteorological observation data**
Karamov D.N.
- 38 Simulation model of operation of autonomous photovoltaic plant under actual operating conditions**
Obukhov S.G., Plotnikov I.A.
- 52 Ecological and hydrochemical consequences of mining tungsten and molybdenum deposits of the eastern Transbaikalia**
Chechel L.P.
- 64 Physico-chemical properties of hard-to-recover oils of Russian Arctic**
Yashchenko I.G., Polishchuk Yu.M.
- 72 Vibration-resistant porous permeable metal-ceramic SHS-materials based on oxides of alloy steels and ferrosilicium addition**
Kolomeets M.A., Melbert A.A., Maetsky A.V., Novoselova T.V., Tubalov N.P., Yakovleva O.V.
- 81 Modeling of thermal and hydraulic processes in the main gas pipeline**
Bazarov A.A., Danilushkin A.I.
- 91 Numerical solution of the problem of CO₂ hydrate generation in a porous medium initially saturated with methane hydrate**
Gimaltdinov I.K., Stolpovsky M.V., Dodova M.I.
- 99 Modeling and identification of load nodes with nonlinear current-voltage characteristics based on measurement data**
Kharlov N.N., Bulyga L.L.
- 108 Dendrogeochemical features of fossil larch (Pazyryk) and modern larches of mountain Altai**
Rikhvanov L.P., Robertus Yu.V., Mironova A.S., Baksht F.B., Sudyko A.F.

УДК 550.42 (571.55)

ШИРОКИНСКИЙ РУДНЫЙ УЗЕЛ (ВОСТОЧНОЕ ЗАБАЙКАЛЬЕ): УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ, ГЕОХИМИЯ ПОРОД И РУД, СВЯЗЬ ОРУДЕНЕНИЯ С МАГМАТИЗМОМ

Абрамов Баир Намжилович¹,
b_abramov@mail.ru

Калинин Юрий Александрович^{2,3},
kalinin@igm.nsc.ru

Ковалев Константин Романович²,
kkr@igm.nsc.ru

Посохов Виктор Федорович⁴,
vitaf1@yandex.ru

¹ Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН,
Россия, 672014, г. Чита, ул. Недорезова, 16 а, а/я 1032.

² Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН,
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. академика Коптюга, 3.

³ Новосибирский национальный исследовательский государственный университет,
630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2.

⁴ Геологический институт СО РАН,
670047, г. Улан-Удэ, ул. Павлова, 2.

Актуальность работы состоит в выявлении условий образования пород и руд Широкинского рудного узла. Отличительной особенностью рудного узла является повышенная золотоносность полиметаллических руд. Концентрации золота в рудах и его запасы соответствуют типичным золоторудным месторождениям. Объектами исследования являются наиболее крупное по запасам Ново-Широкинское золото-полиметаллическое месторождение, менее крупные – Лугининское золото-полиметаллическое и Кочковское золото-сурьмяное.

Цель работы заключается в раскрытии петрогеохимических особенностей пород и руд, в выявлении источников оруденения месторождений Широкинского рудного узла.

Методы исследования. Для определения элементного состава пород использовался рентгенфлуоресцентный метод (ГИН СО-РАН, г. Улан-Удэ). Содержание петрогенных компонентов определялось стандартным химическим методом, концентрации редкоземельных элементов определялись методом сорбционно-атомноэмиссионного анализа с индуктивно-связанной плазмой (ГИН СОРАН, г. Улан-Удэ). Определение изотопного состава кислорода проводилось с использованием установки MIR 10–30 (Центр коллективного пользования, г. Иркутск). Изучение изотопного состава серы сульфидов и содержаний Au и Ag проведены в ЦКП многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (г. Новосибирск).

Результаты исследования. Выявлено, что месторождения Широкинского рудного узла являются производными процессов образования Тайнинской вулcano-купольной структуры, магматические образования которого являются источниками рудного вещества. Это подтверждается зональным распределением рудной минерализации вокруг магматического центра Тайнинской структуры, а также данными изотопного состава кислорода, углерода рудоносных жил и серы сульфидов рудных минералов, указывающий на их магматический источник. Геохимические особенности интрузивных и эффузивных образований Широкинского рудного узла свидетельствуют о наличии в них мантийной составляющей, что подтверждается соответствием их адакитам. Образование свинцово-цинковых руд происходило из разной степени дифференцированных разноглубинных магматических очагов, что подтверждается особенностями распределения редкоземельных элементов в рудах.

Ключевые слова:

Восточное Забайкалье, Широкинский рудный узел, золото-полиметаллические руды, магматизм, источники рудного вещества, изотопия, условия образования руд.

Введение

Изучение закономерностей распределения и условий формирования рудных узлов с полиметаллическим профилем оруденения в последние годы приобретает новую жизнь на современном уровне геологических представлений. Проводятся поисково-оценочные работы на полиметаллы с учетом их золотоносности в пределах Салаирского кряжа. В Забайкальском крае усилиями компаний «Highland Gold Mining Ltd» и «Казцинк» ведутся

разведочные и эксплуатационные работы на Ново-Широкинском золото-полиметаллическом месторождении, одном из наиболее крупных и достаточно хорошо описанных в литературе. Особенности его геологического строения, петрогеохимические особенности рудовмещающих пород, минералогия и последовательность формирования рудных ассоциаций, обуславливающих характеристическую зональность Широкинского рудного узла, освещены во многих работах [1–8]. Основная задача на-

стоящего исследования состоит в изучении петро-геохимических особенностей пород и руд, реконструкции источников и условий их образования в пределах Тайнинской вулкано-купольной структуры (ТВКС). На основе изотопно-геохимических данных изучения руд и флюидных включений акцентировано внимание на вопросах связи оруденения с определенным типом магматических образований. Представленные здесь исследования дополнят знания о месторождениях Широкинского рудного узла.

Методика исследований

Изучение элементного состава пород и руд проведены в аналитических лабораториях Геологического института СО РАН (г. Улан-Удэ) и Института геологии и минералогии СО РАН (г. Новосибирск). Содержания элементов определены РФА методом (аналитик Жалсаева Б.Ж.). Измерения концентраций редкоземельных элементов проведены ISP-AES методом (аналитики Казанцева Т.И., Цыренова А.А.). Содержание Au и Ag определены в ИГМ СО РАН (г. Новосибирск) атомно-абсорбционным методом (аналитик Ильина В.Н.). Определение изотопного состава кислорода проводилось в Геологическом институте СО РАН (г. Улан-Удэ) с использованием установки MIR 10–30 системы лазерного нагрева с лазером CO₂ мощностью 100 ватт и длиной волны 10,6 мкм в инфракрасной области, в присутствии реагента BrF₃ (аналитик Посохов В.Ф.). Изучение изотопного состава серы выполнено в центре коллективного пользования многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (г. Новосибирск), аналитики В.Н. Реутский, М.Н. Колбасова.

Краткая геологическая характеристика Широкинского рудного узла

Широкинский рудный узел юго-восточной части Забайкальского края приурочен к Тайнинской купольно-кольцевой структуре первого порядка, являющейся одной из структур Газимуро-Будюкканской структурно-металлогенической зоны (рис. 1).

Повышенная проницаемость Монголо-Охотской сутуры в средней и поздней юре способствовала проникновению в литосферу мантийного вещества, что привело к образованию очагово-купольных структур. В результате процессов мантийно-корового взаимодействия происходило плавление континентальной коры с образованием в промежуточных камерах известково-щелочной и высококальцевой известково-щелочной магм. Основная рудопроизводящая роль в Широкинской купольно-кольцевой структуре отводится глубоко дифференцированным шопонит-латитовым и известково-щелочным магмам [1]. Рудное вещество имеет мантийные и мантийно-коровые источники. В центральных частях очагово-купольных структур размещаются штоки магматических образований кислого состава (граниты, гранодиориты), в

периферийных частях располагаются эффузивные образования. С такими структурами связано образование месторождений цветных, редких и благородных металлов. Широкинский рудный узел является единственным в Забайкалье, где золото-полиметаллическое оруденение имеет промышленное значение.

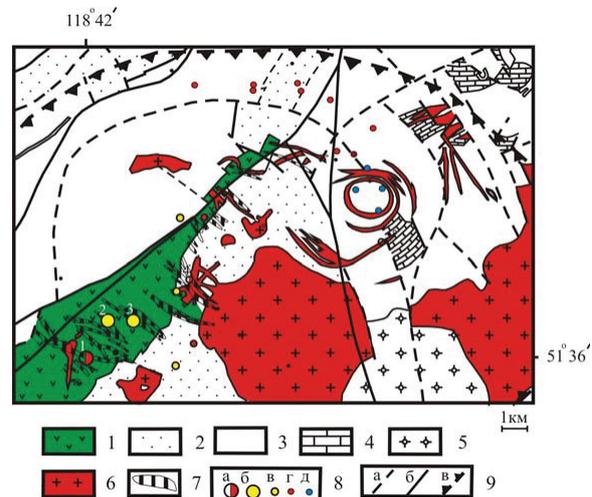


Рис. 1. Схематическая геологическая карта Широкинского рудного узла (по материалам геолого-съёмочных работ, с дополнениями авторов): 1 – вулканогенно-осадочные отложения шадаронской свиты (J_{2-3}); 2 – песчано-алевролитово-аргиллитовые отложения акатуевской свиты (J_1); 3 – песчано-сланцевые отложения ушмунской свиты (ϵ_1); 4 – карбонатно-терригенные отложения джаргалантуевской свиты (ϵ_1); 5 – Ундинский интрузивный комплекс (C); 6 – Шахтаминский интрузивный комплекс (J_{2-3}); 7 – зоны пропилитизированных порфиров, благоприятных для выявления золото-полиметаллического оруденения; 8 – месторождения: а) золото-полиметаллические; б) золоторудные; в) золота; г) полиметаллов; д) молибдена; 9 – тектонические нарушения: а) предполагаемые; б) достоверные, в) Тайнинская кольцевая структура

Fig. 1. Schematic geological map of the Shirokinsky ore cluster (after geological survey works, with additions of authors): 1 are the volcanogenic-sedimentary rocks of shadaronk suite (J_{2-3}); 2 are the sandstone and siltstone rocks of akatuevsk suite (J_1); 3 are the sandstone and shale rocks of ushmunsk suite (ϵ_1); 4 are the carbonate-terrigenous sediments of dzhargalantuysk suite (ϵ_1); 5 is the undinsk intrusive complex (C); 6 is the shakhtaminsk intrusive complex (J_{2-3}); 7 are the propylite-zones of porphyrites, enabling to identify gold-polymetallic mineralization; 8 are the deposits: a) gold-polymetallic; б) gold deposits; ore mineralization: а) gold; б) polymetallic; д) molybden; 9 are the tectonic faults: а) prospective; б) reliable; в) Tayninsk ring structure

Характерными признаками Широкинской структуры является кольцевое расположение магматических образований мезозойского возраста, сконцентрированных в центральной ее части, развитие кольцевых и радиальных разрывных нарушений. Размер структуры в диаметре 40–45 км. Образование куполов связано с процессами внедрения интрузий с образованием специфических ку-

польных структур разных порядков, нарушенных кольцевыми и радиальными тектоническими зонами, которые впоследствии служили местами разгрузки гидротермальных растворов. Общность структурной позиции, магматизма и минерализации указывает на развитие единого рудно-магматического очага. Это подтверждается и зональным распределением разных типов минерализации вокруг магматического центра. В контакте Лугиинского массива, расположенного в центральной части структуры, развиты скарнированные известняки с магнетитовой минерализацией. В ближайшем экзоконтакте Лугиинского массива отмечается кварц-турмалиновая минерализация. Далее, по мере удаления от массива, развиты золото-колчеданная, золото-полиметаллическая, золото-мышьяково-сурьмяная минерализации (рис. 1). В целом в пределах Широкинского рудного узла проявлены следующие рудные стадии: 1) кварц-пирит-турмалиновая, 2) кварц-пиритовая (колчеданная), 3) золото-полиметаллическая, 4) золото-сульфидно-полиметаллическая. Изотопный возраст калийсодержащей слюдки, выделенной из свинцово-цинковых руд, составляет 133 ± 5 млн лет [2].

Площадь Лугиинского золото-полиметаллического месторождения является составной частью северо-западного крыла Широкинской синклинали структуры, простирающейся в субмеридиональном направлении. В геологическом строении месторождения принимают участие вулканогенно-осадочные отложения шадаронской серии (J_{2-3}), несогласно перекрывающие осадочные породы нижней-средней юры, интрузивные образования шахтаминского комплекса (J_{2-3}), представленные дайками кварцевых порфиров, гранодиорит-порфиров, диоритовых порфиритов и лампрофиров. Абсолютный возраст гранитоидов Лугиинского массива составляет $155-146 \pm 6$ млн лет [3]. Гидротермальные изменения проявлены в виде протяженных субпараллельных зон окварцевания, карбонатизации, реже хлоритизации. В пределах Лугиинского месторождения выделяются следующие стадии минерализации: 1) кварц-турмалиновая; 2) серно-колчеданная, 3) карбонатно-полиметаллическая [4]. Среднее содержание золота в рудах составляет $2,03$ г/т и серебра – $4,57$ г/т. Рудные тела представлены прожилково-вкрапленной минерализацией и крутопадающими зонами метасоматически измененных пород. Они характеризуются протяженностью по простиранию $100-600$ м, мощностью $4-30$ м, прослежены по падению до 300 м от поверхности и по простиранию до 2 км. Рудная минерализация представлена пиритом, халькопиритом, галенитом, сфалеритом, при подчиненном распространении арсенопирита, блеклых руд, висмутина, золота, пирротина.

Особенности геологического строения Кочковского золото-сурьмяного месторождения, расположенного в $2,5$ км на северо-восток от Ново-Широкинского золото-полиметаллического месторожде-

ния, во многом аналогичны Лугиинскому. На месторождении известно семь рудных тел, наиболее крупное из которых характеризуется значительным развитием зоны прожилково-вкрапленной антимонит-реальгар-арсенопиритовой минерализации, мощностью до 21 м и протяженностью по латерали до 920 м [5]. На месторождении выделяются три минеральные ассоциации: карбонат-пирит-арсенопиритовая, карбонат-антимонит-реальгаровая и карбонатная. Для первой ассоциации характерны: пирит, марказит, арсенопирит, для второй – антимонит, арсенопирит, реальгар, шеелит, сфалерит, буланжерит, для третьей – кальцит с убогой вкрапленностью пирита. Содержание золота в рудах колеблется от $1,0-20,3$ г/т, серебра – $2,0-35,0$ г/т. Среднее содержание золота в рудах составляет $5,26$ г/т.

В геологическом строении Ново-Широкинского золото-полиметаллического месторождения принимают участие интрузии шахтаминского комплекса (J_{2-3}), эффузивы шадаронской серии (J_{2-3}), осадочные отложения акагуевской свиты (J_{1-2ak}) (рис. 2). Месторождение приурочено к субширотной зоне разлома, пересекающей под углом $60-75^\circ$ юго-западное крыло синклинали складки. Фундаментом Широкинской вулканоплутонической структуры являются отложения нижнего кембрия (известняки, доломиты, песчаники, кварциты). Мощность их превышает 300 м.

Эффузивные образования шадаронской серии (J_{2-3}) разделены на две толщи. Нижняя, существенно туфогенная, сложена туфопесчаниками, туфоалеволитами, туфобрекчиями, которые выше по разрезу сменяются покровами андезитов, андезибазальтов, их туфами. Мощность толщи составляет $800-1000$ м. Верхняя толща имеет однородный состав и представлена андезитами, андезибазальтами, кварцево-плаггиоклазовыми порфиритами с прослоями их туфов и лавобрекчий. Изотопный возраст нижней толщи (К-Аг метод) составляет $175 \pm 9-168 \pm 7$ млн лет, верхней толщи – $156 \pm 6-140 \pm 4$ млн лет [1].

Интрузивный шахтаминский комплекс (J_{2-3}) представлен дайками гранодиорит-порфиров, кварцевых диоритовых порфиритов и лампрофиров, распространенных в центральной и юго-восточной части Широкинского рудного узла. Мощность даек составляет $0,3-80$ м, протяженность – $50-400$ м. Диоритовые порфириты пересекают гранодиорит-порфиры, но, в свою очередь, рвутся самими молодыми лампрофирами, преимущественно спессартитами. Руды карбонатно-полиметаллической стадии, по-видимому, сингенетичны со спессартитами, поскольку в одних случаях спессартиты секут карбонатно-полиметаллические руды, в других пересекаются ими. По совокупности признаков даже выделен самостоятельный ширококинский комплекс, объединяющий эффузивные и интрузивные породы Широкинского рудного района [1].

На месторождении известно 15 рудных тел, представленных серией субпараллельных кварц-

сульфидных жил мощностью до 3 м. В целом Ново-Широкинскую минерализованную зону можно рассматривать как линейный штокверк. Протяженность рудных тел по простиранию колеблется от 50 до 1450 м, по падению – от 40 до 760 м. Рудные тела залегают кулисообразно, с заметным склонением рудных тел с глубиной от флангов месторождения к центру, к штоку гранодиорит-порфиров. Околорудные изменения вмещающих пород, проявляющихся совместно, выражаются в пропилитизации, окварцевании, хлоритизации, серицитизации, доломитизации и пиритизации. Выделяется четыре основных типа постепенно сменяющих друг друга гидротермально-метасоматических процессов: пропилитовый, хлорит-доломитовый, серицит-доломитовый и кварц-доломитовый. По составу, структурно-текстурным особенностям и содержанию ведущих полезных компонентов руды месторождения делятся на три минералогического-генетического типа, соответствующих

стадиям минерализации: а) медисто-сернисто-колчеданные; б) кварц-полиметаллические; в) карбонатно-полиметаллические (табл. 1).

В рудах Ново-Широкинского месторождения среднее содержание золота составляет 3,5 г/т; серебра – 86,5 г/т; свинца – 3,7 мас. %, меди – 0,3 % [6]. В составе руд установлено более 60 рудных и жильных минералов. Среднее содержание основных сульфидных минералов по месторождению: галенита – 4,2 %, сфалерита – 3,1 %, пирита – 5 %, блеклой руды – 0,4 %, халькопирита – 0,1 %. Зона окисления на месторождении развита слабо.

Сульфидные руды месторождения сложены метасоматическими кварц-сланцисто-доломитовыми породами, содержащими вкрапленность и прожилки сульфидов и жильных минералов. В прожилково-вкрапленных рудах отмечаются гнезда, линзы и жилы руд массивной, кокардовой, брекчиевидной и метаколлоидной текстур, а также

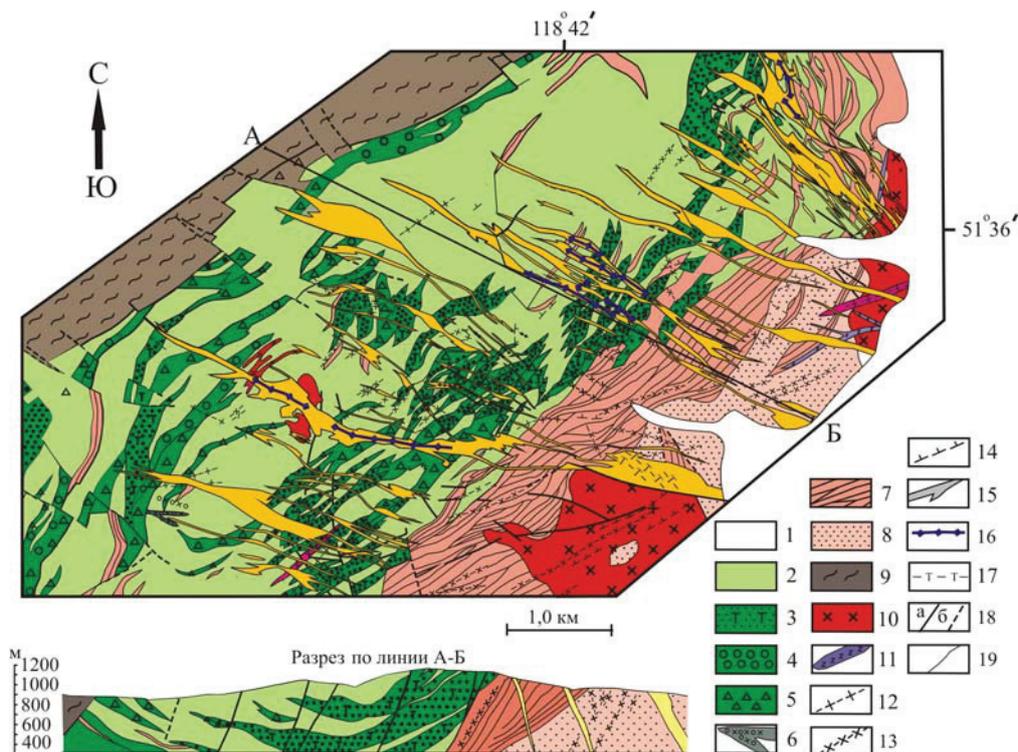


Рис. 2. Схема геологического строения Ново-Широкинского золото-полиметаллического месторождения (по материалам В.И. Гордеева, 2007 г., с дополнениями авторов): 1 – четвертичные отложения; 2–5 – шадаронская серия J_{2-3} ; 2 – верхняя эффузивная толща (андезиты, андезибазальты); 3–5 – нижняя толща (туфопесчаники, туфоалевролиты, туфобрекчии); 6 – кварцевые диоритовые порфиры J_{2-3} ; 7 – J_{1-2} : песчаники, алевролиты; 8 – J_{1-2} : песчаники; 9 – ϵ_{1-2} – слюдистые алевролиты, песчаники, сланцы; мезозойские интрузии: 10 – гранодиориты; 11 – кварцевые порфиры; 12 – гранит-порфиры; 13 – диоритовые порфиры; 14 – лампрофиры; 15 – зоны метасоматитов; 16 – рудоносные кварц-сульфидные жилы; 17 – кварц-турмалиновые жилы; 18 – тектонические нарушения: а) достоверные, б) предполагаемые; 19 – геологические границы

Fig. 2. Scheme of geological structure of Novo-Shirokinsky gold-polymetal deposit (after V.I. Gordeev, 2007, with the additions of the authors): 1 are the quaternary sediments; 2–5 are the shadaronk series (J_{2-3}): 2 is the upper volcanic thickness (andesite, andezibasalt); 3–5 is the lower thickness (tuff-sandstones, tuff-siltstone, tuff-breccias); 6 are the quartz diorite porphyry (J_{2-3}); 7 are the sandstones, siltstones (J_{1-2}); 8 are the sandstones (J_{1-2}); 9 are the micaceous siltstones, sandstones, shales (ϵ_{1-2}); mesozoic intrusions: 10 are the granodiorites; 11 are the quartz porphyries; 12 are the granite-porphyries; 13 are the diorite porphyry; 14 are the lamprophyre; 15 are the metasomatite zones; 16 are the ore-bearing quartz-sulfide veins; 17 are the quartz-tourmaline veins; 18 are the tectonic faults: a) reliable; b) estimated; 19 are the geological boundaries

кварцево-доломитовые жилы симметрично-полосчатой и крустификационной текстур. Жилы, гнезда и линзы богатых руд развиты главным образом в центральной части месторождения, где они вскрыты с поверхности шурфами с рассечками, на горизонте 853 м – обоими штреками и рассечками из них, а на глубоких горизонтах – буровыми скважинами. В целом богатые руды образуют пучок веерообразно расположенных «струй», причем корень пучка приурочен к слепому штоку гранодиорит-порфиоров.

Таблица 1. Стадийность минерализации Ново-Широкинского месторождения

Table 1. Paragenetic sequence of mineral of the Novo-Shirokiisky deposit

Распространенность рудных минералов/Ore minerals		
Главные Main	Второстепенные Minor	Редко встречающиеся Rare
Стадии минерализации/Mineralization stages Турмалиново-колчеданная/Tourmaline-pyrite		
Пирит Pyrite	Халькопирит Chalcopyrite	Мельниковит, молибденит Melnicovite, molibdenite
Медисто-сернисто-колчеданная/Cuprous-sulfite-pyrite		
Пирит Pyrite	Халькопирит Chalcopyrite	Сфалерит, галенит, золото, бурнонит, джемсонит, висмутин Sphalerite, Galena, Aurum, Bournonite, Jamesonite, Bismuthite
Кварцево-полиметаллическая/Quartz-polymetallic		
Пирит, сфалерит, галенит Pyrite, Sphalerite, Galena	Халькопирит Chalcopyrite	Буланжерит, магнетит, золото, гематит, бурнонит, арсенопирит, висмутин Boulangerite, Magnetite, Aurum, Hematite, Bournonite, Arsenopyrite, Bismuthinite
Карбонатно-полиметаллическая/Carbonate-polymetallic		
Сфалерит, галенит Sphalerite, Galena	Пирит/Pyrite	Золото, марказит, арсенопирит, буланжерит Aurum, Marcasite, Arsenopyrite, Boulangerite

Основная масса руд неравномерно-зернистая, размер зерен гипогенных минералов измеряется десятками долями миллиметра, реже встречаются более мелкие (сотые и тысячные доли миллиметра) и более крупные зерна (1–5 мм, редко до 3 см). Характерной особенностью руд Ново-Широкинского месторождения являются повышенные концентрации золота. Наиболее значительные содержания золота (до 186,1 г/т) установлены в рудах медисто-серно-колчеданной стадии минерализации. Золото встречается в пирите, халькопирите, блеклой руде, галените, а также в кварце в виде зерен неправильной и изометричной формы, размером в тысячные и сотые, редко десятые доли мм. Корреляционные анализ установил тесные связи золота с Cu ($r=0,69$), Bi ($r=0,86$), Ag (0,51) (по данным табл. 2). В рудах кварцево-полиметаллической стадии содержание Au по рядовым пробам колеблется от следов до 139 г/т (штрек шахты), причем

золотоносность (как и меденосность) руд этой стадии резко уменьшается к северо-западному флангу месторождения и постепенно увеличивается по направлению к юго-восточному флангу, что объясняется ассимиляцией рудообразующими растворами этой стадии ранее отложившихся медисто-серно-колчеданных руд. Наименее золотоносны руды карбонатно-полиметаллической стадии минерализации. Содержание золота в них колеблется от следов до 16 г/т, составляя в среднем 0,8–1,4 г/т. Необходимо отметить, что почти все высокие содержания золота встречены в центральной части и на юго-восточном фланге месторождения. Преобладающая его часть золота сосредоточена в интервале 0–5 г/т. Эти значения соответствуют концентрации золота в рудах кварц-полиметаллической стадии. В интервале 35–40 г/т отмечается некоторое увеличение значений, что можно объяснить повышенными содержаниями его в минералах серно-колчеданной стадии. Характерной особенностью элементного состава руд Ново-Широкинского месторождения является наличие Bi, концентрации которого в пирит-галенит-сфалеритовых рудах достигают 17800 г/т (табл. 2). Висмутовая минерализация (висмутит, галеновисмутит) отмечается в составе медисто-серно-колчеданной и кварц-полиметаллической стадий рудообразования, но не получила ярко выраженного самостоятельного характера, что более характерно для забайкальских месторождений медно-скарнового типа.

Геохимические особенности пород и руд Широкинского рудного узла

Магматические образования Широкинского рудного узла, с которыми связано рудообразование, представлены интрузиями шахтаминского комплекса и эффузивами шадаронской серии.

По геохимическому составу интрузивные и эффузивные образования Ново-Широкинского месторождения на диаграммах Sr–Y, $(La/Yb)_n$ – Yb_n соответствуют адакитам (рис. 3). Формирование адакитов связано с процессами плавления субдцировавшей океанической литосферы, деламинацией континентальной коры [8–14]. Образование адакитов сопровождается промышленной минерализацией Au, Cu, Mo и других халькофильных элементов [15, 16]. Адакитовые интрузии имеют следующие геохимические характеристики: величина $(La/Yb)_n$ не более 10; содержание Yb – менее 1,8 г/т; $Y < 18,0$ г/т; $Sr > 300$ г/т, которые обусловлены присутствием граната в рестите [9]. Часть магматитов Широкинского узла соответствует адакитам (табл. 3).

Для изучения изотопного состава кислорода были отобраны образцы кварца из кварц-полиметаллических руд. Преобладающие температуры рудообразования Ново-Широкинского месторождения, по данным изучения флюидных включений в минералах, определены в интервале 240–280 °C [7].

Таблица 2. Содержания элементов в сульфидно-кварцевых жилах Ново-Широкинского рудного узла (г/т), Zn, Pb, Cu в (%)
Table 2. Elemental composition of sulfide-quartz veins of the Novo-Shirokinsky deposit, ppm (Zn, Pb, Cu, wt. %)

Элементы/Elements	Номера проб/Numbers of samples														
	112	112-1	116	117	119	120	123	129	131	132	134	154	156	157	
Ново-Широкинское месторождение/Novo-Shirokinsky deposit															
Bi	–	–	–	–	150	–	–	800	–	3	400	17800	–	266	
Pb	13	22	50	43	30	10,5	9,12	20,68	21,06	8,63	1,75	13,9	21,12	0,21	
Zn	27	16	11,5	2,6	11,7	16,1	1,09	1,22	1,29	6,74	0,5	1,07	7,61	0,17	
Rb	81	124	238	207	143	49	248	175	170	96	39	339	141	47	
Sr	31	28	–	–	–	89	16	–	2	374	49	–	–	55	
Au	17,0	33,0	53,0	41,0	12,0	0,78	25,0	14,0	24,0	12,0	3,60	73,0	16,0	42,0	
La	–	–	–	–	–	2,9	2,2	–	1,8	6,6	3,1	–	–	–	
Ce	–	–	–	–	–	5,9	4,4	–	3,2	12,0	6,1	–	–	–	
Pr	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1,7	–	–	–	–	
Nd	–	–	–	–	–	2,7	1,65	–	1,3	5,2	2,9	–	–	–	
Sm	–	–	–	–	–	0,47	0,35	–	0,36	1,1	0,64	–	–	–	
Eu	–	–	–	–	–	1,34	0,12	–	0,13	0,32	0,32	–	–	–	
Gd	–	–	–	–	–	0,89	0,7	–	–	1,1	0,70	–	–	–	
Tb	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	
Dy	–	–	–	–	–	0,74	0,34	–	–	0,96	0,75	–	–	–	
Ho	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,24	0,13	–	–	–	
Er	–	–	–	–	–	0,42	0,2	–	0,3	0,51	0,38	–	–	–	
Tm	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	
Yb	–	–	–	–	–	0,18	0,14	–	0,10	0,34	0,22	–	–	–	
Lu	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	
Y	–	–	–	–	–	3,8	1,6	–	1,33	4,2	2,6	–	–	–	
ΣTR	–	–	–	–	–	19,34	11,70	–	8,52	34,27	17,84	–	–	–	
(La/Yb) _n	–	–	–	–	–	11,17	10,95	–	12,46	13,47	9,81	–	–	–	
Eu/Eu*	–	–	–	–	–	6,36	0,74	–	–	0,89	1,64	–	–	–	
Eu/Sm	–	–	–	–	–	2,85	0,34	–	0,36	0,29	0,50	–	–	–	

Продолжение таблицы 2

Table 2

Элементы/Elements	Номера проб/Numbers of samples															
	140	141	142	143	144	145	146	147	171	172	173	174	175	176	177	179
Лугиинское месторождение/Lugiinsky deposit								Кочковское месторождение/Kochkovsky deposit								
Bi	–	3	2	3	4	–	2	2	–	–	–	–	–	–	3	–
Pb	44	33	53	42	41	35	27	37	0,58	0,0023	109	22	0,0018	24	20	1,12
Zn	33	37	47	32	43	34	39	42	0,9	0,0066	0,1	35	0,0065	45	51	1,68
Rb	126	10	3,3	18	122	25	88	113	82	62	198	1,3	20	21	47	35
Sr	709	314	386	231	462	143	341	402	263	625	311	395	542	489	418	712
Au	–	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,06	0,81	2,6	0,56	0,10	–	7,3	1,1	0,47
La	–	10	6,7	13,8	–	–	–	–	21	6,6	–	–	–	–	6,9	–
Ce	–	17	12	19	–	–	–	–	30	13,5	–	–	–	–	14,3	–
Pr	–	2,15	1,6	2,1	–	–	–	–	3,7	–	–	–	–	–	–	–
Nd	–	6,1	3,6	4,8	–	–	–	–	10,5	6,4	–	–	–	–	6,3	–
Sm	–	1,1	0,64	0,95	–	–	–	–	2,1	1,4	–	–	–	–	1,3	–
Eu	–	0,17	0,12	0,14	–	–	–	–	1,31	0,43	–	–	–	–	0,46	–
Gd	–	0,9	0,7	0,8	–	–	–	–	1,8	1,5	–	–	–	–	1,5	–
Tb	–	0,9	–	–	–	–	–	–	0,22	–	–	–	–	–	–	–
Dy	–	–	–	–	–	–	–	–	1,1	1,0	–	–	–	–	1,3	–
Ho	–	–	–	–	–	–	–	–	0,22	–	–	–	–	–	–	–
Er	–	0,55	0,50	0,50	–	–	–	–	0,60	0,6	–	–	–	–	0,7	–
Tm	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Yb	–	0,6	0,57	0,56	–	–	–	–	0,41	0,28	–	–	–	–	0,4	–
Lu	–	–	–	–	–	–	–	–	0,06	–	–	–	–	–	–	–
Y	–	4,8	3,8	4,4	–	–	–	–	6,2	4,3	–	–	–	–	5,8	–
ΣTR	–	44,27	30,92	47,05	–	–	–	–	78,12	35,01	–	–	–	–	37,66	–
(La/Yb) _n	–	11,55	8,16	17,12	–	–	–	–	35,56	16,43	–	–	–	–	11,98	–
Eu/Eu*	–	0,52	0,55	0,49	–	–	–	–	2,05	0,91	–	–	–	–	1,00	–
Eu/Sm	–	0,15	0,19	0,15	–	–	–	–	0,62	0,31	–	–	–	–	0,35	–

Таблица 3. Содержания элементов-примесей в магматических породах Широкинского рудного узла (г/т)

Table 3. Elemental composition of magmatic formations of the Shirokinsky ore cluster, ppm

Элементы Elements	Номера проб/Numbers of samples													
	136	137	138	118	126	130	149	150	161	164	165	167	168	169
As	6	9	11	29	35	115	15	401	32	20	36	14	20	12
Rb	94	113	102	80	100	271	47	109	75	46	32	67	65	114
Sr	782	679	710	384	571	390	353	1738	665	627	545	475	474	266
Nb	8,5	10,3	7,3	8,3	8,7	4,5	6,8	7,0	6,2	7,2	8,1	7,0	6,8	6,6
La	30,9	33,0	30,5	27,5	30,2	17,8	21,8	28,4	24,9	22,3	27,2	24,6	25,8	26,2
Ce	54,0	60,9	53,0	52,0	58,6	32,8	41,6	55,9	48,4	46,3	52,2	50,0	48,6	49,1
Pr	6,0	6,8	6,0	6,9	7,3	3,85	4,8	6,5	5,6	5,7	5,9	6,04	5,8	5,6
Nd	19,8	24,5	20,0	25,0	26,8	14,7	19,8	28,7	23,1	21,4	25,1	24,0	23,3	23,4
Sm	3,4	4,2	3,3	5,7	4,31	2,63	3,4	5,15	4,0	3,4	4,5	4,6	4,3	4,5
Eu	0,81	0,87	0,80	1,17	1,26	0,71	0,91	1,4	1,16	1,14	1,25	1,18	1,14	1,17
Gd	2,5	3,0	2,5	3,9	4,0	2,0	3,15	4,3	3,9	3,6	4,3	4,0	3,8	4,1
Tb	0,50	0,57	0,38	0,54	0,51	0,39	0,66	0,73	0,70	0,45	0,56	0,66	0,60	0,65
Dy	1,7	2,1	1,7	2,5	2,96	1,38	2,4	2,9	3,0	3,0	3,06	3,2	3,07	2,9
Ho	0,32	0,37	0,34	0,42	0,51	0,25	0,44	0,44	0,54	0,55	0,50	0,62	0,55	0,47
Er	0,82	0,98	0,81	1,26	1,4	0,70	1,2	1,2	1,45	1,5	1,4	1,6	1,5	1,29
Tm	0,13	0,18	0,17	0,2	0,27	0,15	0,18	0,19	9,23	0,32	0,24	0,30	0,26	0,19
Yb	0,82	1,0	0,75	1,0	1,14	0,66	1,0	1,0	1,3	1,28	1,3	1,48	1,4	1,14
Lu	0,08	0,1	0,08	0,14	0,14	0,07	0,12	0,09	0,14	0,15	0,16	0,17	0,15	0,14
Y	9,63	12,5	9,1	13,4	15,4	7,5	12,8	14,5	16,6	15,4	16,5	18,0	17,3	16,0
ΣTR	131,9	151,1	129,4	114,1	154,8	85,6	114,3	151,4	144,0	126,5	144,2	140,5	137,6	136,9
(La/Yb) _n	26,16	22,9	30,54	19,1	22,0	18,7	15,1	19,7	13,0	12,1	14,6	12,4	12,8	16,0
Eu/Eu*	0,85	0,75	0,85	0,76	0,65	0,94	1,00	0,91	0,90	1,00	0,87	0,84	0,86	0,83
Eu/Sm	0,24	0,21	0,24	0,20	0,29	0,27	0,27	0,27	0,29	0,33	0,28	0,26	0,26	0,26
Rb/Sr	0,12	0,17	0,14	0,21	0,17	0,69	0,13	0,06	0,11	0,07	0,06	0,14	0,14	0,43

Примечание. Пробы: гранитоиды – 136, 137, 138; диоритовые порфириды – 118, 149; базальты, андезитобазальты – 126, 130, 150, 161, 164, 165, 167, 168, 169.

Note. Samples: Granitoids – 136, 137, 138; Diorite porphyry – 118, 149; Basalt, andesite-basalt – 126, 130, 150, 161, 164, 165, 167, 168, 169.

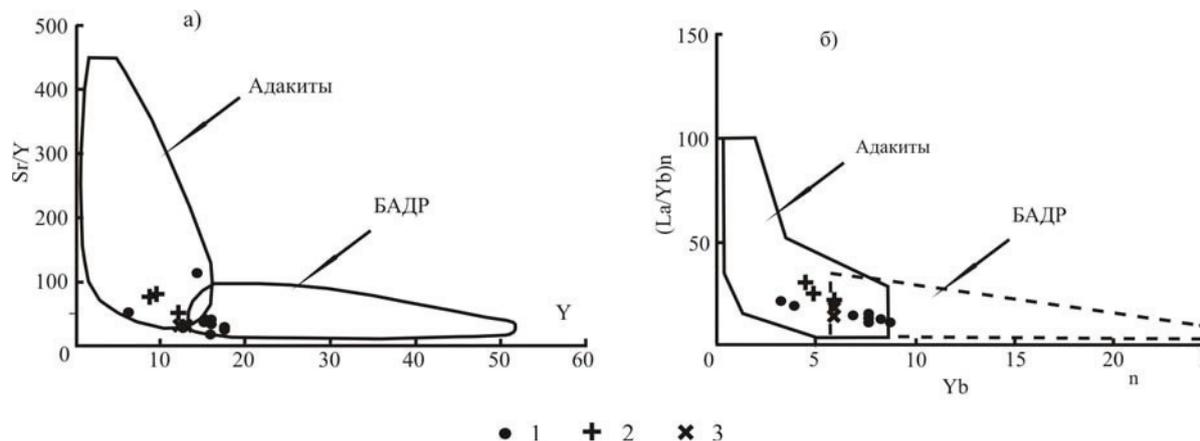


Рис. 3. Дискриминационные диаграммы и геохимические спектры интрузивных и эффузивных образований Широкинского рудного узла: а) дискриминационная диаграмма Sr/Y–Y; б) дискриминационная диаграмма (La/Yb)_n–Yb_n по [17]. БАДР – породы базальт-андезит-дацит-риолитовых ассоциаций островных дуг и активных континентальных окраин; 1 – андезитобазальты и андезиты шадаронской свиты, шахтаминский комплекс; 2 – граниты; 3 – диоритовые порфириды

Fig. 3. Discrimination diagram and geochemical spectra of intrusive and volcanic formations of the Shirokinsky ore cluster: a) Sr/Y versus Y; b) (La/Yb)_n versus Yb_n [17]. BADR are the rocks of basalt-andesite-dacite-riolite associations of island arcs and active continental margins; 1 are the andesite-basalt and andesite of shadaronsk and shakhtaminsk complex; 2 are the granites; 3 are the diorite-porphyrates

Изотопный состав кислорода кварца изменяется от +8,7 до +13,7 ‰ (табл. 4). Изотопный состав кислорода гидротермального флюида рассчитан в системе кварц–вода по уравнению

$$\delta^{18}\text{O}_{\text{кварц}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}} = 3,34 (10^6/T^2) - 3,31,$$
 где T – температура по Кельвину [18]. Рассчитанный изотопный состав $\delta^{18}\text{O}$ во флюиде в равновесии с кварцем продуктивного этапа 240–280 °C ме-

няется от $-0,69$ до $+6,09$ ‰ (табл. 4). Эти данные можно объяснить взаимодействием рудоносных флюидов с метеорной водой. Значение $+6,09$ ‰ соответствует образованиям флюидов магматической воды [19]. Изотопный состав углерода во флюиде, из которого кристаллизовался доломит, рассчитан по уравнению [20]:

$$\Delta_{\text{доломит}}^{-\text{CO}_2} = -0,891(10^9/T^3) + 8,737(10^6/T^2) - 18,11(10^3/T) + 8,44.$$

Рассчитанный изотопный состав кислорода во флюиде кварц-карбонатных жил при температуре минералообразования $240\text{--}280^\circ\text{C}$ колеблется от $+0,56$ до $+6,03$. Значения $\delta^{18}\text{O}$ доломита укладываются в интервал значений изотопного состава углерода в карбонатах мезотермальных месторождений золота: от $+7$ до -25 ‰ [21].

Таблица 4. Изотопный состав кислорода, углерода и расчетный состав флюида при формировании Широкинского рудного узла

Table 4. Isotopic composition of oxygen, carbon and estimated composition of fluid in formation of Shirokinsky ore cluster

Номера проб Numbers of samples	Состав руд Ore composition	Минерал Mineral	Изотопный состав флюида при различных температурах, $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ Isotopic composition of fluid at different temperatures, $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$					
			$\delta^{18}\text{O}$, ‰ SMOW		$\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$			
			240 °C	280 °C	240 °C	280 °C		
Кварц-сульфидные жилы/Quartz-sulfide veins								
112-2	Gn-sf	Кварц Quartz	11	+1,62	+3,39			
131			13,7	+4,32	+6,09			
132			13,7	+4,32	+6,09			
134			13,6	+4,22	+5,99			
141	Q-tr		8,7	-0,69	+1,02			
142			11	+1,62	+3,39			
143			10,6	+1,22	+2,99			
Кварцево-карбонатно-сульфидные жилы Quartz-carbonate-sulfide veins								
			$\delta^{13}\text{C}$ (PDT)	$\delta^{18}\text{O}$, ‰ SMOW	$\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$		$\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$	
					240 °C	280 °C	240 °C	280 °C
123	Gn-sf	Доломит Dolomite	0,4	11,3	+0,56	+1,41	+3,23	+4,73
112-3			3,1	11,6	+3,23	+4,11	+3,53	+5,03
175	Q-ant		3,0	11,5	+3,16	+4,01	+3,43	+4,93
177			3,6	12,6	+3,76	+4,61	+4,53	+6,03

Примечание. Пробы: 112–2, 112–3, 131, 132, 134 – Ново-Широкинское месторождение; 141, 142, 143 – Лугинское месторождение; 175, 177 – Кочковское месторождение. Руды: Gn-sf – галенит-сфалеритовые; Pr-gn-sf – пирит-галенит-сфалеритовые; Q-tr – кварц-турмалиновые; Q-ant – кварц-антимонитовые.

Note. Samples: 112–2, 112–3, 131, 132, 134 – Novo-Shirokinsky deposit; 141, 142, 143 – Lugiinsky deposit; 175, 177 – Kochkovsky deposit. Ores: Gn-sf – galena-sphalerite; Q-tr – quartz-tourmaline; Q-ant – quartz-antimonite.

Установлено, что значения $\delta^{18}\text{O}$ флюида ртутно-сурьмяных месторождений юго-западной Аляски варьируют от -12 до $+14$ ‰, что предполагает участие в рудообразовании метеорных вод [22]. В полиметаллических рудах месторождений Прогноз (Якутия) и Купол (Чукотка) изотопные

составы рудоносных флюидов при температуре 200°C колеблются от -8 до $+2,0$ ‰, что указывает на участие метеорных вод в рудообразовании [23]. Рассчитанные значения изотопных составов кислорода и углерода во флюиде Широкинского рудного узла указывают на магматический источник рудоносных флюидов, вступивший во взаимодействие с метеорной водой (рис. 4).



Рис. 4. Изотопный состав кислорода минералообразующего флюида Широкинского рудного узла: 1 – рудоносный кварц с галенитом, сфалеритом; 2 – кварц-турмалиновой стадии; 3 – кварц-доломитовые жилы с галенитом, сфалеритом; 4 – кварц-доломитовые жилы с антимонитом

Fig. 4. Oxygen isotopic compositions of hydrothermal fluid of the Shirokinsky ore cluster: 1 is the ore-bearing quartz with galena and sphalerite; 2 is the quartz-tourmaline stage; 3 are the quartz-dolomite veins with galena and sphalerite; 4 are the quartz-dolomite veins with antimonite

Изотопный состав серы во флюиде ($\delta^{34}\text{S}$), находящемся в равновесии с сульфидами в момент минералообразования, был рассчитан по уравнениям фракционирования [20, 24], исходя из предположения, что в растворах преобладал H_2S :

$$\Delta_{\text{пирит-H}_2\text{S}} = \delta^{34}\text{S}_{\text{пирит}} - \delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}} = 0,4 (10^6/T^2);$$

$$\Delta_{\text{халькопирит-H}_2\text{S}} = \delta^{34}\text{S}_{\text{халькопирит}} - \delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}} = 0,05(10^6/T^2);$$

$$\Delta_{\text{галенит-H}_2\text{S}} = \delta^{34}\text{S}_{\text{галенит}} - \delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}} = -0,64 (106/T^2);$$

$$\Delta_{\text{сфалерит-H}_2\text{S}} = \delta^{34}\text{S}_{\text{сфалерит}} - \delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}} = 0,1 (106/T^2).$$

Преобладающий изотопный состав серы во флюиде Широкинского рудного узла при температуре 280°C характеризуется повышенными значениями изотопов серы сфалерита от $+6,33$ до $+9,43$ ‰; галенита – $+16,85$ до $+18,46$ ‰, что указывает на образование их за счет магматического источника и частичного заимствования из вмещающих пород. Облегченное значение изотопов серы во флюиде сфалерита (проба 179) можно объяснить участием в рудообразовании метеорной воды (табл. 5).

Распределение редкоземельных элементов (РЗЭ) в рудах Широкинского рудного узла показывает, что наибольшими концентрациями легких РЗЭ характеризуются руды кварц-антимонитового состава, наименьшими – свинцово-цинковые руды (табл. 2). Анализ распределения РЗЭ показывает, что формирование свинцово-цинковых руд происходило из двух в разной степени дифференцированных разноглубинных магматических очагов. Первый, более глубокий магматический очаг, характеризовался положительными значениями

Таблица 5. Изотопный состав серы сульфидных минералов и расчетный состав серы во флюиде Широкинского рудного узла

Table 5. Sulfur isotopic compositions of sulfide minerals and current composition of sulfur in fluid of the Shirokinsky ore cluster

Образец Sample	Минерал Mineral	$\delta^{34}\text{S}, \text{‰}$ CDT	Изотопный состав серы во флюиде Sulphur isotopic composition in fluid $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$ ‰ CDT	
			240 °C	280 °C
Ново-Широкинский месторождение/Novo-Shirokinsky deposit				
112	Сфалерит Sphalerite	9,3	+7,57	+8,00
112-2	Сфалерит Sphalerite	9,5	+7,77	+8,23
117	Халькопирит Chalcopyrite	11,9	+11,03	+11,27
119	Сфалерит Sphalerite	8,8	+7,07	+7,53
120		8,3	+6,57	+7,07
132		10,6	+8,87	+9,33
134		10,7	+8,97	+9,43
179		-2,1	-0,37	-0,83
116	Галенит Galena	10,3	+21,41	+18,46
117		9,4	+20,51	+17,55
123		9,6	+20,71	+17,75
129		9,5	+20,61	+17,65
131		8,7	+19,81	+16,85
Лугинское месторождение/Lugiinsky deposit				
150	Пирит/Pyrite	11,7	+4,76	+6,60
Кочковское месторождение/Kochkovsky deposit				
161	Реальгар/Realgar	5	–	–
162	Антимонит/Antimonite	6,9	–	–
163	Сфалерит/Sphalerite	7,6	+5,87	+6,33

Примечание. Прочерк – нет данных.

Note: Dash – no date.

европиевого минимума ($\text{Eu}/\text{Eu}^* - 1,64-6,36$), повышенными значениями Eu/Sm отношений ($\text{Eu}/\text{Sm} - 0,50-2,85$). Второй магматический очаг имел соответственно следующие значения ($\text{Eu}/\text{Eu}^* - 0,74-0,89$; $\text{Eu}/\text{Sm} - 0,29-0,36$) (табл. 2, рис. 5). Наличие двух разноглубинных, в разной степени дифференцированных магматических очагов подтверждается распределением РЗЭ в свинцово-цинковых рудах на диаграмме $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{pm}}-(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{pm}}$. Здесь четко выделяются две группы свинцово-цинковых руд с разными геохимическими характеристиками. Изучение изотопного состава свинца галенитов Ново-Широкинского месторождения показало, что на месторождении обосновано выделение двух источников свинца корового и мантийно-корового, имеющего резко подчиненную роль. Мантийно-коровый источник, вероятно, связан с внутриплитными магматическими образованиями трахибазальтовой серии [8].

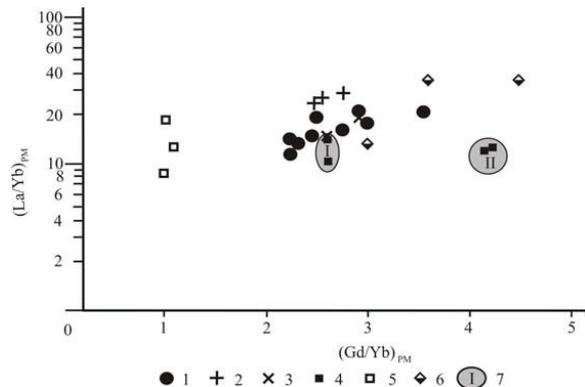


Рис. 5. Диаграмма $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{pm}}-(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{pm}}$ пород Широкинского рудного узла. 1 – эффузивы шадаронской серии, интрузии шахтаминского комплекса; 2 – граниты, 3 – диоритовые порфириды; 4 – свинцово-цинковые руды; 5 – кварц-турмалиновая минерализация, 6 – кварц-доломит-сурьмяная минерализация; 7 – поля развития свинцово-цинковых руд с разными геохимическими характеристиками (I – свинцово-цинковые руды, образованные из недифференцированных глубоких магматических очагов, II – свинцово-цинковые руды, образованные из дифференцированных магматических очагов)

Fig. 5. Diagram $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{pm}}$ versus $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{pm}}$ from rocks of the Shirokinsky ore cluster. 1 are the volcanic rocks of shadaronk series, shahdaminsk intrusion complex; 2 are the granites, 3 are the diorite-porphiry; 4 are the lead-zinc ores; 5 is the quartz-tourmaline mineralization, 6 is the quartz-dolomite-antimony mineralization; 7 are the fields of development of lead-zinc ores with different geochemical characteristics: I are the lead-zinc ores, formed from undifferentiated deep magma chambers, II are the lead-zinc ore, formed of differentiated magma chambers

Заключение

Таким образом, месторождения Широкинского рудного узла являются производными процессов эволюции Тайнинской вулcano-купольной структуры, магматические образования которой являются источниками рудного вещества. Это подтверждается зональным распределением рудной минерализации вокруг магматического центра структуры, а также данными изотопного состава кислорода, углерода рудоносных жил и серы сульфидов, указывающие на их магматический источник. Геохимические особенности интрузивных и эффузивных образований Широкинского рудного узла свидетельствуют о наличии в них мантийной составляющей, что подтверждается соответствием их адакитам. Образование свинцово-цинковых руд происходило из разной степени дифференцированных, разноглубинных магматических очагов, что подтверждается особенностями распределения редкоземельных элементов в рудах.

Работа выполнена в рамках госзадания (проект 0330-2016-0001) и при частичной поддержке РФФИ (грант 16-05-00353).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зорина Л.Д., Санин Б.П. Петрохимия и геохимические особенности Широкинского вулcano-плутонического комплекса (Восточное Забайкалье) // Геохимия. – 1980. – № 2. – С. 17–25.
2. Комаров П.В., Томсон И.Н. Возрастная последовательность оруденения и плутогенные минерагенические циклы на примере Восточного Забайкалья // Отечественная геология. – 1995. – № 10. – С. 26–36.
3. Зорина Л.Д., Кравченко В.М., Романов В.А. Новые данные о магматизме Широкинского рудного района // Доклады АН СССР. – 1986. – Т. 290. – № 5. – С. 1221–1224.
4. Шадрина А.А., Редин Ю.О. Минеральный состав руд Лугинского золото-полиметаллического месторождения (Восточное Забайкалье) // Металлогения древних и современных океанов. – 2011. – № 17. – С. 222–225.
5. Павленко Ю.В. Геолого-структурный прогноз: Кочковское золото-сурьмянное месторождение // Вестник Забайкальского государственного технического университета. – 2012. – № 12 (91). – С. 129–139.
6. Трубачев А.И., Секисов А.Г.Б., Лавров А.Ю. Ассоциации минералов в рудах и продуктах обогащения Восточно-Забайкальских месторождений цветных и благородных металлов // Известия Сибирского отделения наук о Земле РАЕН. – 2016. – № 3 (56). – С. 44–56.
7. Али А.А., Прокофьев В.Ю., Кряжев С.Г. Геохимические особенности формирования Ново-Широкинского золото-полиметаллического месторождения (Восточное Забайкалье, Россия) // Вестник МГУ. – 2014. – № 2. – С. 15–21.
8. Дриль С.И. Изотопный состав свинца полиметаллических руд Ново-Широкинского месторождения Восточного Забайкалья: источники вещества и возможная связь с внутриплитным магматизмом региона // Известия Сибирского отделения Секция наук о Земле РАЕН. – 2015. – № 3 (52). – С. 7–12.
9. Ефремов С.В., Дриль С.И., Сандмирова Г.П. Образование гранитоидов с адакитовой геохимической характеристикой в коллизионных орогенах на примере раннепалеозойских гранитоидов хребта Мунку-Сардык (Восточный Саян) // Геохимия. – 2016. – № 7. – С. 633–640.
10. Гусев А.И., Коробейников А.Ф. Петрология и золотоносность адакитовых гранитоидов Усть-Беловского комплекса Макарьевского ареала Горного Алтая // Вестник Томского государственного университета. Инжиниринг ресурсов. – 2015. – Т. 326. – № 10. – С. 81–91.
11. Martin H. Adakitic magmas: modern analogues of Archaean granitoids // Lithos. – 1999. – V. 46. – P. 411–429.
12. Kay R.W. Aleutian magnesian andesites: melts from subducted Pacific Ocean crust // J. Volcanology and Geothermal Research. – 1978. – V. 4. – P. 117–132.
13. Defant M.J., Drummond M.S. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere // Nature. – 1990. – V. 347. – P. 662–665.
14. Dacite genesis via both slab melting and differentiation: petrogenesis of La Yeguada Volcanic Complex, Panama / M.J. Defant, P.M. Richerson, J.Z. Boer et al. // J. Petroleum. – 1991. – V. 32. – № 6. – P. 1101–1142.
15. Petrogenesis of adakitic porphyries in an extensional tectonic setting, Dexing, South China: implications for the genesis of porphyry copper mineralization / Q. Wang, Ping Jian, Bao Zhi-Wei et al. // J. Petroleum. – 2006. – V. 47. – P. 119–144.
16. Hou Z.-Q., Qu X.-M., Li Y.-G. Melt components derived from a subducted slab in late orogenic ore bearing porphyries in the Gangdese copper belt, southern Tibetan plateau // Lithos. – 2004. – V. 74. – P. 131–148.
17. Sharp Z.D. A laser-based microanalytical method for the in-situ determination of oxygen isotope ratios of silicates and oxides // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 1990. – V. 54. – P. 1353–1357.
18. Matsuhisa Y., Goldsmith J.R., Clouton R.N. Oxygen isotopic fractionation in the system quartz-albite-anortite-water // Geochim. Cosmochim. Acta. – 1979. – V. 43. – P. 1131–1140.
19. Bortnikov N.S., Prokofyev V.Y. World-class mesothermal gold deposits of Russia: Composition and origin of ore-forming fluids // Mineral exploration and research: Digging Deeper. Proceed. of the 9th Biennial SGA Meeting. – Dublin, 2007. – V. 1. – P. 793–796.
20. Ohmoto H., Rye R.O. Isotope of sulfur and carbon // Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits. – N.Y.: J. Wiley and Sons, 1979. – P. 509–567.
21. Jia Y., Kerrich R. Giant quartz vein systems in accretionary orogenic belts: for a metamorphic fluid origin from $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{13}\text{C}$ studies // Earth Planet. Sci. Lett. – 2000. – V. 184. – P. 211–224.
22. Grau J.E., Snee L.W., Wilson F.H. Epithermal mercury-antimony and gold-bearing vein lodes of southwestern Alaska // Economic Geology Monograph 9. – 1997. – P. 287–305.
23. Бортников Н.С. Геохимия и происхождение рудообразующих флюидов в гидротермально-магматических системах и тектонически активных зонах // Геология рудных месторождений. – 2006. – Т. 48. – № 1. – С. 2–28.
24. Гаманин Г.Н., Викентьева О.В., Прокофьев В.Ю., Бортников Н.С. Аркачан – новый золото-висмут-сидерит-сульфидный тип месторождений в оловоносном Западно-Верхоянском районе (Якутия) // Геология рудных месторождений. – 2015. – Т. 57. – № 6. – С. 513–543.

Поступила 11.04.2017 г.

Информация об авторах

Абрамов Б.Н., доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории геохимии и рудогенеза Института природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН.

Калинин Ю.А., доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник лаборатории прогнозно-металлогенических исследований Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН; доцент, Новосибирский национальный исследовательский государственный университет.

Ковалев К.Р., доктор геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории прогнозно-металлогенических исследований Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН.

Посохов В.Ф., старший научный сотрудник лаборатории физических методов анализа Геологического института СО РАН.

UDC 550.42 (571.55)

SHIROKINSKY ORE CLUSTER (EASTERN TRANS-BAIKAL): FORMATION CONDITIONS, PETROCHEMISTRY OF ROCKS AND ORES, ASSOCIATION BETWEEN MINERALIZATION AND MAGMATISM

Bair N. Abramov¹,
b_abramov@mail.ru

Yuri A. Kalinin^{2,3},
kalinin@igm.nsc.ru

Konstantin R. Kovalev²,
kkr@igm.nsc.ru

Victor F. Posokhov⁴,
vitaf1@yandex.ru

¹ Institute of Natural resources, Ecology, and Cryology SB RAS,
PO box 1032, 16 a, Nedorezov street, Chita, 672014, Russia.

² V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS,
3, Koptuyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russia

³ National Research Novosibirsk State University,
2, Pirogov street, Novosibirsk, 630090, Russia.

⁴ Geological Institute SB RAS,
2, Pavlov street, Ulan-Ude, 670047, Russia.

Relevance of the work is in revealing conditions of formation of rocks and ores from the Shirokinsky ore cluster. The distinctive feature of the ore cluster is the high gold mineralization of its polymetallic ores. The concentrations of gold in ores and its reserves correspond to typical lode gold deposits. The targets of investigation are the Novo-Shirokinsky gold-polymetallic deposit that is the largest with respect to reserves and massively smaller – the Lugiinsky gold-polymetallic and Kochkovsky gold-antimony deposits.

The aim of the research is to identify petrochemical features of rocks and ores; to reveal mineralization sources of Shirokinsky ore cluster.

Methods of investigation. X-ray fluorescence analysis was used (at GIN SB RAS, Ulan-Ude) for determining an element composition of rocks. Content of major elements was determined by the standard chemical method, concentrations of rare earth elements were determined using sorption-atomic-emission spectrometer with inductively coupled plasma (ISP-SAES) (at GIN SB RAS, Ulan-Ude). Determination of oxygen isotopic composition was performed using the MIR 10–30 equipment (at Common User Center, Irkutsk). The authors studied sulfide sulfur isotopic composition and contents of Au and Ag at CUC SB RAS of multi-element and isotope investigation (Novosibirsk).

Investigation results. It was ascertained that deposits of the Shirokinsky ore cluster are derivatives of Taininsky volcanic-dome structure formation. Its magmatic rocks serve as sources of ore matter. This is supported by zonal distribution of ore mineralization around the magmatic center, as well as by the data on isotope compositions of oxygen and carbon of ore-bearing veins and sulfur of sulfide ore minerals indicating their magmatic source. The geochemical features of intrusive and volcanic igneous rocks of the Shirokinsky ore cluster evidence the presence of mantle constituent and adakites. Formation of lead-zinc ores is associated with differentiated, different depth magmatic magma chambers. This is proved by the peculiarities of REE distribution in ores.

Key words:

Eastern Transbaikal, Shirokinsky ore cluster, gold-polymetallic ores, magmatism, sources of ore, isotopy, conditions of ore formation.

The research was carried out within the State Task (project 0330–2016–0001) and it was partially financially supported by the RFBR (grant 16–05–00353).

REFERENCES

1. Zorina L.D., Sanin B.P. Petrological Geochemistry and geochemical features of Shirokinsky volcano-plutonic complex (Eastern Transbaikalia). *Geochemistry International*, 1980, no. 2, pp. 17–25. In Rus.
2. Komarov P.V., Tomson I.N. Age sequence of mineralization and mineral plutogene cycles on the example of Eastern Transbaikalia. *Otechestvennaya geologiya*, 1995, no. 10, pp. 26–36. In Rus.
3. Zorina L.D., Kravchenko B.M., Romanov V.A. New data on magmatism of Shirokinsky ore district. *Doklady Earth Sciences*, 1986, vol. 290, no. 5, pp. 121–124. In Rus.
4. Shadrina A.A., Redin Yu.O. Mineral composition of ores of Lugiinsk gold-polymetallic Deposit (East Transbaikalia). *Metallogeniya drevnikh i sovremennykh okeanov*, 2011, no. 17, pp. 222–225. In Rus.
5. Pavlenko Yu.V. Structural forecast: Kochkovsky gold-antimony field. *Vestnik Zabaykalskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2012, no. 12 (91), pp. 129–139. In Rus.

6. Trubachev A.I., Sekisov A.G., Lavrov A.Yu. Mineral Association in ores and dressing products in the East Transbaikalian deposits of nonferrous and precious metals. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya nauk o Zemle RAEN*, 2016, no. 3 (56), pp. 44–56. In Rus.
7. Ali A.A., Prokofev V.Yu., Kryazhev S.G. Geochemical features of formation of Novo-Shirokinsky gold-polymetallic Deposit (East Transbaikalia, Russia). *Moscow University Geology Bulletin*, 2014, no. 2, pp. 15–21. In Rus.
8. Dril S.I. Isotopic composition of lead ores of Novo-Shirokinsky deposits of Eastern Transbaikalia: the sources of substances and possible link with intraplate magmatism of the region. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya. Sektsiya nauk o Zemle RAEN*, 2015, no. 3 (52), pp. 7–12. In Rus.
9. Efremov S.V., Dril S.I., Sandimirova G.P. Formation of granitoids with additive geochemical feature in collisional orogens by the example of early-Paleozoic granitoids of Munku-Sardyk range (Eastern Sayan). *Geochemistry International*, 2016, no. 7, pp. 633–640. In Rus.
10. Gusev A.I., Korobeynikov A.F. Petrology and gold content of adakitic granitoids of Ustbelovskii complex in Makarevskii range of Gorny Altai. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2015, vol. 326, no. 10, pp. 81–91. In Rus.
11. Martin H. Adakitic magmas: modern analogues of Archaean granitoids. *Lithos*, 1999, vol. 46, pp. 411–429.
12. Kay R.W. Aleutian magnesian andesites: melts from subducted Pacific Ocean crust. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 1978, vol. 4, pp. 117–132.
13. Defant M.J., Drummond M.S. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature*, 1990, vol. 347, pp. 662–665.
14. Defant M.J., Richerson P.M., Boer J.Z. Dacite genesis via both slab melting and differentiation: petrogenesis of La Yeguada Volcanic Complex, Panama. *Journal of Petrology*, 1991, vol. 32, no. 6, pp. 1101–1142.
15. Wang Q., Jian Ping, Zhi-Wei Bao. Petrogenesis of adakitic porphyries in an extensional tectonic setting, Dexing, South China: implications for the genesis of porphyry copper mineralization. *Journal of Petrology*, 2006, vol. 47, no. 1, pp. 119–144.
16. Hou Z.-Q., Qu X.-M., Li Y.-G. Melt components derived from a subducted slab in late orogenic ore bearing porphyries in the Gangdese copper belt, southern Tibetan plateau. *Lithos*, 2004, vol. 74, pp. 131–148.
17. Sharp Z.D. A laser-based microanalytical method for the in-situ determination of oxygen isotope ratios of silicates and oxides. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1990, vol. 54, pp. 1353–1357.
18. Matsuhisa Y., Goldsmith J.R., Clouton R.N. Oxygen isotopic fractionation in the system quartz-albite-anortite-water. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1979, vol. 43, pp. 1131–1140.
19. Bortnikov N.S., Prokofyev V.Y. World-class mesothermal gold deposits of Russia: Composition and origin of ore-forming fluids. *Mineral exploration and research: Digging Deeper. Proceed. of the 9th Biennial SGA Meeting*. Dublin, 2007. Vol. 1, pp. 793–796.
20. Ohmoto H., Rye R.O. Isotope of sulfur and carbon. *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*. N.Y., J. Wiley and Sons, 1979. pp. 509–567.
21. Jia Y., Kerrich R. Giant quartz vein systems in accretionary orogenic belts: for a metamorphic fluid origin from $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{13}\text{C}$ studies. *Earth and Planetary Science Letters*, 2000, vol. 184, pp. 211–224.
22. Grau J.E., Snee L.W., Wilson F.H. Epithermal mercury-antimony and gold-bearing vein lodes of southwestern Alaska. *Economic Geology Monograph* 9, 1997. pp. 287–305.
23. Bortnikov N.S. Geokhimiya i proiskhozhdenie rudoobrazuyushchikh flyuidov v gidrotermalno-magmatischenkikh sistemakh i tektonicheski aktivnykh zonakh [Geochemistry and origin of ore-forming fluids in magmatic-hydrothermal systems and tectonically active zones]. *Geology of Ore Deposits*, 2006, vol. 48, no. 1, pp. 2–28.
24. Gamyanyan G.N., Vikenteva O.V., Prokofev V.Yu. Arkachan – Novy zoloto-bismut-siderit-sulfidny tip mestorozhdeniy v olovonosnom Zapadno-Verkhoyanskom rayone (Yakutiya) [Arcachon – new gold-bismuth-siderite-sulfide type deposits of tin in the Western Verkhoyansk region (Yakutia)]. *Geology of Ore Deposits*, 2015, vol. 57, no. 6, pp. 513–543.

Received: 11 April 2017.

Information about the authors

Bair N. Abramov, Dr. Sc., leading researcher, Institute of Natural resources, Ecology, and Cryology SB RAS.

Yuri A. Kalinin, Dr. Sc., senior researcher, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS; assistant professor, National Research Novosibirsk State University.

Konstantin R. Kovalev, Dr. Sc., senior researcher, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS.

Victor F. Posokhov, senior researcher, Geological Institute SB RAS.

УДК 504.55.054:622(470.6)

ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РЕСУРСОБЕРЕЖЕНИЯ ПРИ РАЗРАБОТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Голик Владимир Иванович^{1,2},
v.i.golik@mail.ru

Разоренов Юрий Иванович¹,
yiri1963@mail.ru

Лукьянов Виктор Григорьевич³,
lukyuanov@tpu.ru

¹ Северокавказский государственный технологический университет,
Россия, 362021, г. Владикавказ, ул. Николаева, 44.

² Владикавказский научный центр,
Россия, 362002, г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а.

³ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность. Горное производство вышло в «признанные лидеры» по воздействию на окружающую природную среду, в том числе при разрушении горными работами земной поверхности с катастрофическими последствиями. Минимизация вредного воздействия горных технологий становится актуальным направлением исследований в глобальном масштабе, но практических решений по выходу из сложившегося положения мало.

Целью исследования является доказательство эколого-экономической эффективности природоохранных и ресурсосберегающих технологий разработки рудных месторождений твердых полезных ископаемых и обоснование их перспективности.

Методы исследования включают в себя анализ и обобщение результатов выполненных ранее собственных и привлеченных теоретических и экспериментальных исследований, литературных и патентных данных.

Результаты. Дана историческая справка о динамике этапов эволюции горного производства. Показано, что природные и техногенные факторы поражения экосистем усиливают друг друга за счет синергетического эффекта. Определены направления снижения опасности: закладка технологических пустот твердеющими смесями; подземное выщелачивание бедных и потерянных руд; кучное выщелачивание бедных руд; выщелачивание хвостов обогащения и металлургии с активацией процессов в активаторах типа дезинтегратор. В качестве перспективного направления решения экологической проблемы рекомендована утилизация хвостов первичной переработки руд после извлечения из них металлов до уровня санитарных требований путем комбинирования химического обогащения и активации.

Выводы. Утилизации хвостов обогащения является реальным направлением выживания технологически насыщенного региона добычи и переработки минерального сырья в условиях непрогнозируемого развития технического прогресса, решая проблему упрочнения минерально-сырьевой базы горных предприятий и сохранения окружающей природной среды от деградации.

Ключевые слова:

Горное производство, экосистема, технология, закладка, выщелачивание, ресурсы, утилизация, запасы, хвосты, обогащение, дезинтегратор.

Введение

Человеческое сообщество, опираясь на возможности разума, радикально изменяет природное равновесие на планете Земля. Современный арсенал воздействия на природу включает в себя химическое, радиационное, тепловое, шумовое и др. виды загрязнения окружающей среды. Особенно активно воздействует горное производство.

Деятельность добывающих предприятий изменяет химический состав подземных вод, понижает уровень грунтовых вод, создает условия для деформирования земной поверхности и т. д. Добыча минералов вышла в лидеры среди разрушающих природу технологий по многоплановости и необратимости воздействий на экосистемы Земли.

Если техногенное возмущение экосистемы превышает уровень, при котором биота еще сохраняет способность к самовосстановлению после снятия

нагрузки, воздействие горного производства на экосистемы по своим последствиям можно квалифицировать как прогрессирующую техногенную катастрофу [1].

Горное производство давно вышло в «лидеры» по воздействию на окружающую среду, поэтому исследования эколого-экономических аспектов ресурсосбережения при разработке месторождений полезных ископаемых приобретают особую актуальность [2].

Результаты и обсуждение

Процессы добычи полезных ископаемых (извлечение минералов, вскрытие, подготовка, дробление, выдача на поверхность, измельчение, обогащение и металлургический передел) в любом случае нарушают равновесие экосистемы. Наибольшую опасность представляет та часть отходов,

которая не утилизируется, а остается в окрестностях горного предприятия на хранении (рис. 1).

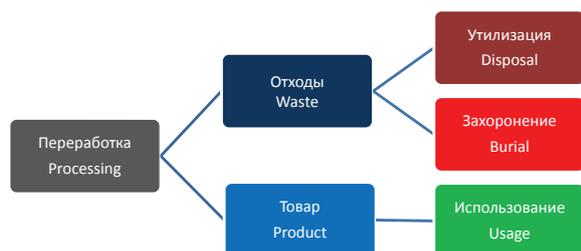


Рис. 1. Влияние процессов горного производства на окружающую среду

Fig. 1. Impact of mining production on the environment

Радикальным воздействием на окружающую среду является разрушение земной поверхности. Техногенные воздействия горных работ нередко генерируют сейсмические эффекты. Так, в 1971 г. на Старогрозненском нефтяном месторождении (Россия, Чечня) произошло вызванное разработкой нефтяной залежи землетрясение интенсивностью 7 баллов.

В результате горных работ из сельскохозяйственного производства изымаются земли под отвалы, выемки, карьеры и др. объекты. При добыче 1 млн т угля нарушается 3–43 га земли, железной руды – 14–600 га, известняка – 60–120 га, фосфоритов – 22–77 га.

Взрывы на карьерах образуют облака объемом в десятки млн м³ с высотой до 1500 м. Концентрация пыли в воздухе на расстоянии до 1,5 км достигает 10 мг/м³ в течение часа.

Техногенное влияние на экосистемы проявляется в формах:

- преобразование поверхности;
- подтопление и осушение территорий, загрязнение подземных вод и горизонтов;
- рассеяние химических элементов, веществ и соединений с нарушением баланса;
- изменение структуры и режима водно-теплового баланса;
- развитие оползневых явлений, карстов, просадок, селей и т. п.;
- истощение земных недр;
- перераспределение напряжений и деформаций в массиве.

Для удовлетворения своих нужд человечество использует слои биосферы, опускаясь на глубину 4 км и поднимаясь на высоту более 4 км [3]. Элементы техногенной катастрофы типизированы нами в таблице [2].

Природные и техногенные факторы поражения экосистем взаимодействуют, создавая синергетический эффект (рис. 2).

Влияние технологий интенсифицирует природные процессы и создает условия для возникновения природно-техногенных катастроф с аккумулятивным эффектом. Приоритетной экологической проблемой является обращение с отходами, потому что перерабатывается не более 1 % старых, лежалых и

до 40 % текущих отходов [4]. В России эксплуатируются более 300 крупных хранилищ отходов переработки минерального сырья с емкостью от 500 до 600 тыс. м³, создающих угрозу. Так, в 1992 г. в результате прорыва дамбы на хранилище хвостов Магнитогорского металлургического комбината в природу выброшено одновременно 2 млн м³ шлама. Под отвалы отводят 0,1 га площади земли на каждые 1000 т сырья. В более чем 2 тыс. отвалов хранится более 3 млрд м³ горной массы.

Таблица. Типизация техногенных катастроф

Table. Typification of technological disasters

Сферы Sphere	Факторы воздействия Impacts	Причины Reasons
Атмосфера Atmosphere	Выбросы пылегазовых частиц; нарушение баланса газов; радиоактивное загрязнение; изменения флоры и фауны; разрушение озонового слоя; температурная инверсия Emissions of dust and gas particles; imbalance of gases; radioactive contamination; changes in flora and fauna; destruction of the ozone layer; temperature inversion	Некорректность процессов, климатические условия Incorrect processes, climatic conditions
Гидросфера Hydrosphere	Миграция загрязнителей в флору; радиоактивное загрязнение; деградация флоры и фауны Migration of contaminants in flora; contamination; degradation of flora and fauna	Некорректность процессов, климатические условия, наличие гидравлических связей Incorrect processes, climatic conditions, presence of hydraulic connections
Литосфера Lithosphere	Разрушение литосферы; изъятие, заболачивание, обезвоживание почв; радиоактивное загрязнение Destruction of lithosphere; removal, waterlogging, dewatering of soils; contamination	Некорректность процессов добычи и переработки сырья Incorrectness of extraction and processing of raw materials
Живое вещество Living matter	Уничтожение, деградация и перерождение флоры и фауны; мутационные изменения, ослабление иммунной способности Destruction, degradation and rebirth of flora and fauna; mutational changes, immune ability weakening	Некорректность процессов, климатические условия, длительность воздействия Incorrect processes, climatic conditions, duration of exposure

Только в г. Кривой Рог накоплено более 3 млрд т вскрышных пород и 2 млрд т хвостов обогащения, в воздух ежегодно выбрасывается более 1,2 млн т пылевидных частиц, из подземных пустот откачивают около 40 млн м³ высокоминерализованных вод. Такое же положение характерно для Норильска, Магнитогорска, Усть-Каменогорска и других горнопромышленных регионов [5]. Пылеобразные и газообразные отходы содержат радиоизотопы U²³⁸, U²³⁵, Th²³².

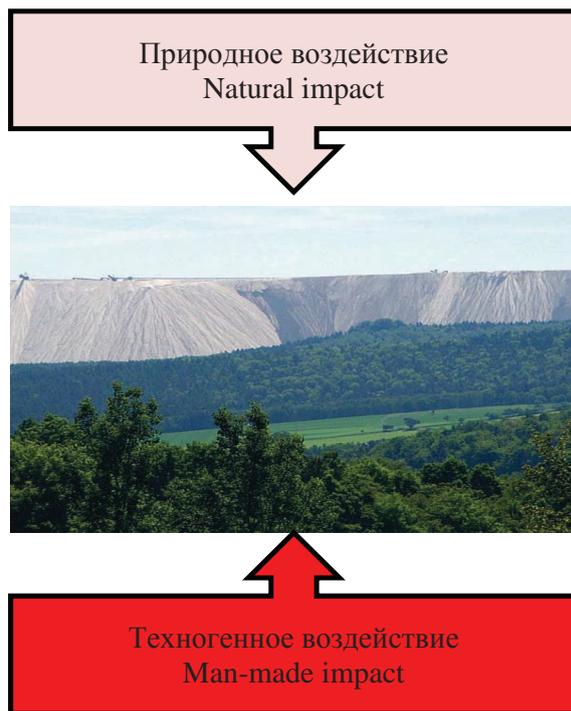


Рис. 2. Взаимодействие факторов воздействия на экосистемы и живое вещество

Fig. 2. Interaction of factors of impact on ecosystems and living matter

Отличие отходов горного производства от отходов других производств состоит в том, что они представляют собой готовое сырье для будущих технологий и могут быть востребованы в будущем [6]. В стоки выбрасывают тысячи тонн жидких руд. Так, оловянные рудники Дальнего Востока образуют ореолы рассеяния металлов, по содержанию металлов сравнимые с запасами в недрах.

Горное производство прошло долгий путь от простого собирательства до современного состояния:

- собирательство 10 тыс. лет до н.э.;
- первые подземные работы с использованием орудий из камня и рогов оленя, мускулы 10 тыс. лет до н. э.;
- металлические орудия, тепловая энергия, использование животных, примитивная механизация н.э.–ср. века;
- механизация процессов, появление ВВ, паровой и электрический привод, создание крупных горных предприятий XVIII в.;
- механизация и автоматизация процессов, первые специальные технологии XIX в.;
- модернизация традиционных технологий, специальные технологии, комплексная механизация процессов XX в.;
- технологии будущего с использованием новых видов энергии.

Опасность горных технологий определяется возможностями применяемых орудий производства, размерами выработок и глубиной разрабо-

ток. Орудия производства прошли путь эволюции от примитивных приспособлений до обладающей большими возможностями техники.

Древнейшие выработки – шурфы – достигали 20×30 м глубины при сужающемся сечении 1,5×2 м поверху и 1 м внизу. Из шурфов проходили штреки размерами 0,6×1,0 м. Большинство древних выработок имеет ширину до 0,5 м при высоте 1 м. В середине прошлого века в Европе шахты достигали глубины 300 м. В настоящее время глубина работ достигла 4 км, а объемы выработок в земной коре измеряются миллионами кубических метров [7].

Вплоть до середины прошлого века обрушение земной поверхности под влиянием горных разработок считалось неизбежным и допустимым, и только во второй половине XX в. оформилось направление гуманизации горного дела, включающее в себя применение технологий с закладкой выработанного пространства (рис. 3).

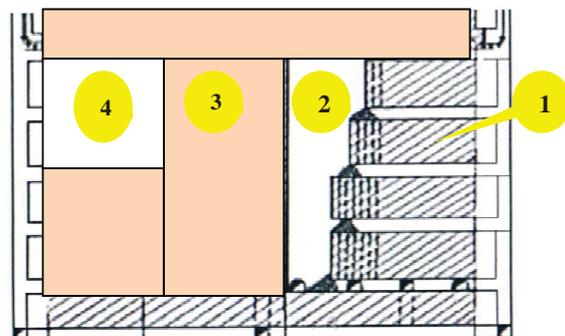


Рис. 3. Система разработки с отбойкой подэтажными ортами с закладкой выработанного пространства твердеющей смесью: 1 – руда; 2 – камера в отработке; 3 – заложённая камера; 4 – камера в стадии закладки

Fig. 3. Development system with sublevel breaking orfts with backfilling of the worked-out space with hardening mixture: 1 is the ore; 2 is the testing camera; 3 is the filled camera; 4 is the camera in the filling stage

Наконец, появились способы добычи с выщелачиванием, предоставившие возможность добывать металлы, не извлекая большую часть руды на земную поверхность (рис. 4) [8].

В ходе экономических реформ многие эксплуатируемые месторождения превратились в техногенные и доступны для повторной разработки [9]. Одним из направлений совершенствования горных работ является подготовка объектов к выщелачиванию уже в ходе первичной разработки.

Геотехнологические методы добычи металлов из техногенных месторождений потерянных руд химическим растворением получают развитие в технологически развитых странах. Чаще всего так добывают легко растворимый уран, медь, цинк и свинец. Для повышения экономической эффективности геотехнологии и традиционные технологии отработки балансовых и забалансовых запасов комбинируют.

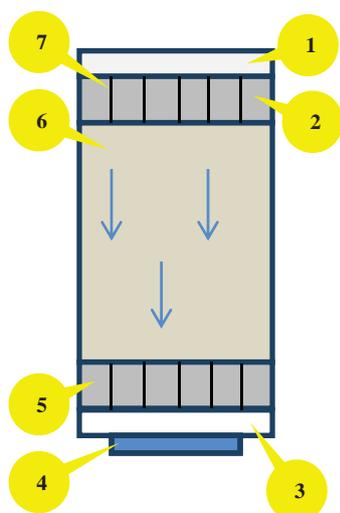


Рис. 4. Подземное выщелачивание металлов: 1 – выработка для подачи раствора; 2 – потолочина; 3 – выработка для приемки раствора; 4 – приемник растворов; 5 – днище; 6 – руда; 7 – скважина для подачи раствора

Fig. 4. Underground leaching of metals: 1 is the stope for solution feeding; 2 is the arch pillar; 3 is the stope for solution acceptance; 4 is the solution box; 5 is the bottom; 6 is the ore; 7 is the hole to feed solution

Так, на Быкогорском руднике подземное и кучное выщелачивание урана из забалансовых руд в течение 30 лет обеспечивало рентабельность добычи урана при содержании в два раза меньшем, чем минимальное содержание в балансовых рудах при традиционной добыче [10].

Важнейшими полезными ископаемыми на территории Северного Кавказа являются цветные, благородные, редкие металлы и рассеянные элементы [11], в истории добычи которых выделяют этапы:

1. Эксплуатация приповерхностных участков в начальной фазе существования с наращиванием производственной мощности при высоком содержании металлов.
2. Выборочная разработка обедненных руд с деконцентрацией работ и увеличением количества поддерживаемых выработок.
3. Отработка низов и флангов месторождений с пониженным содержанием металлов со снижением количества товара при увеличении объема производства.

Урупский ГМК с 1968 г. эксплуатирует Урупское и Власенчихинское месторождения. Технологии с обрушением пород характеризуются потерями руды до 20 % и разубоживанием до 40 %. Гидравлическую закладку нерегулярно применяют в ограниченных случаях при выемке запасов под рекой Уруп.

Тырнаузский вольфрамово-молибденовый комбинат отрабатывал месторождение комбинированно: верхнюю часть карьерами «Высотный» и «Мукуланский», нижнюю часть – рудником «Молибден». До 1968 г. запасы отрабатывали с отбойкой минными зарядами. Затем получили развитие

системы подэтажных штреков, этажно-камерные и подэтажного обрушения с отбойкой на «зажатую» среду. Потери руды достигали 20 %, величина разубоживания – до 40 %. Комбинированная разработка активизировала геомеханические процессы. Наиболее крупный из оползней объемом до 4 млн м³ произошел на площади около 10 га. Объем сдвигающегося массива, в котором расположена часть подземных выработок рудника, оценивается в 15 млн м³.

Причины кризиса разработки Северо-Кавказских месторождений [12]:

- двухстадийная выемка руд с деконцентрацией работ;
- потери и разубоживание при выемке целиков;
- пирометаллургический передел руд с потерей сопутствующих компонентов.

Процессы переработки основного объема руд переносятся в подземные условия. Богатые руды выдают на поверхность и перерабатывают на гидрометаллургическом заводе, остальные выщелачивают в подземных блоках рудников и штабелях. Товарными продуктами комбинированной технологии являются металлы, строительное сырье, обессоленная вода, хлор, водород, кислород, кислоты и щелочи, стоимость которых удешевляет основное производство.

Геотехнологические методы подтверждаются практикой природного выщелачивания. С учетом того, что металлы уже находятся в растворах, экономическая эффективность их извлечения приемлема, а с учетом экологической составляющей не вызывает сомнений.

Природное выщелачивание минералов является продолжением единого процесса физико-химического превращения в результате технологического вмешательства. Крупность потерянных руд от 1 до 250 мм благоприятна для проникновения выщелачивающих реагентов вглубь куска, где при наличии кислорода развивается окисление сульфидных материалов.

Катализатором физико-химических процессов является природная углекислота. Из минералов выделяются газы, преимущественно CO₂ и N₂, в количествах до 30 м³/т, усиливая окислительные процессы, при наличии пирита, играющего роль катода. На эффективность процессов влияет скорость удаления газов, растворов, перемещения твердых остатков в процессе раскрытия дополнительных рабочих плоскостей.

Стоки промышленных объектов Северного Кавказа попадают в гидросеть, которая является источником воды для региона. Особенности горного ландшафта, заключающиеся в наличии многоводных и быстрых потоков, а также сейсмичности земной коры, способствуют формированию мощных очагов загрязнения продуктами добычи минералов.

Запасы месторождений Северного Кавказа отрабатывали выборочно, с переводом части их в категорию неактивных, которая в настоящее время

мя достигает 50 % от исходных запасов. В аналогичных условиях в мировой практике уже со середины прошлого века применяют ресурсосберегающие технологии добычи руд: с твердеющей закладкой и с выщелачиванием металлов, а пирометаллургия при переработке руд уступила место гидрометаллургии.

Жизнедеятельность горнопромышленных регионов, расположенных в гористой местности, в большей, по сравнению с расположенными на равнине регионами, степени зависит от механизма и условий взаимодействия человека и геологической среды.

Один из аспектов проблемы обеспечения жизнедеятельности горнодобывающего района состоит в установлении корреляции между параметрами техногенного загрязнения геологической среды и состоянием здоровья людей.

Природная составляющая процесса сводится к повышенной проницаемости аллювия, слагающего равнины, на которой расположены населенные пункты, и сложности удаления любого загрязнителя путем его перемещения по латерали и его быстрому вертикальному проникновению с загрязнением более глубоких горизонтов геологической среды. В таком положении находятся горнодобывающие регионы Северного Кавказа, располагающие запасами техногенных месторождений [13].

Вероятность катастроф в регионах Кавказа определяется количеством и качеством поражающих факторов, а также временем. Выветривание и выщелачивание минералов и отходов их переработки формирует потоки загрязненных вод, вследствие чего в почвах, подземных и поверхностных водах формируются ореолы загрязнения.

Математическая модель техногенного катастрофического поражения окружающей среды продуктами деятельности промышленных предприятий увязывает процессы деградации окружающей среды [14]:

$$Y_T = f(O_n, \Sigma, a, T) = \sum_{n=1}^n \sum_{p=1}^P \sum_{o=1}^O \sum_{t=1}^T [(Q_a + Q_r + Q_n)(a_1 - a_2)] \times (K_c K_y K_d K_b K_n K_n),$$

где Y – потенциал техногенного катастрофического поражения; O_n – количество промышленных отходов, вес. ед.; Σ – количество загрязнителей, мигрирующих из отходов в окружающую среду; $-$ концентрация загрязнителей, вес. ед./ед. объема; T – время, ед. времени; p – количество предприятий по переработке отходов; P – количество загрязняющих компонентов в отходах; O – количество операций технологической переработки; Q_a, Q_r, Q_n – количество загрязнителей в атмосфере, гидросфере и литосфере; a_1, a_2 – исходная и конечная концентрация загрязнителей в отходах; K_c – коэффициент самоорганизации загрязнителей в местах скопления; K_y – коэффициент утечки загрязнителей

лей в окружающую среду; K_d – коэффициент дальности миграции загрязнителей; K_b – коэффициент влияния загрязнителей на биосферу; K_n – коэффициент вероятности наступления катастрофы со временем; K_n – коэффициент риска наступления катастрофы от неучтенных факторов.

Эффективность охраны окружающей среды определяется соотношением последствий катастроф в денежном выражении и затратами по профилактике и предупреждению их возникновения и развития:

$$\Pi_o = \sum_{n=1}^n \sum_{p=1}^P \sum_{c=1}^C \sum_{t=1}^T [(Q_a + Q_r + Q_n) \times (P_z C_k - P_o C_o)] \times K_y K_n K_n K_n,$$

где Π_o – прибыль от использования технологий защиты окружающей среды; Σ – количество агентов воздействия на окружающую среду; T – время, ед. времени; n – количество факторов поражения среды; p – количество работ по ликвидации последствий катастроф; Q_a, Q_r, Q_n – количество загрязнителей в атмосфере, гидросфере и литосфере; P_k – количество работ по компенсации ущерба окружающей среде; C_k – стоимость работ по компенсации ущерба окружающей среде; P_o – количество работ по охране окружающей среды; K_y – коэффициент усиления воздействия на среду; K_n – коэффициент влияния загрязнителей на биосферу; K_n – коэффициент вероятности наступления катастрофы со временем; K_n – коэффициент точности прогнозирования наступления катастрофы; K_n – коэффициент риска наступления катастрофы от неучтенных факторов.

Комбинированное выщелачивание балансовых руд впервые в мировой практике осуществлено на урановом месторождении Восток (Северный Казахстан). Обрабатывали рудное тело линзовидной формы в интенсивно трещиноватых породах крепостью 4–6 по Протодяконову. Коэффициент извлечения металлов в раствор 72 %.

Проблемные вопросы природосберегающей эксплуатации горнопромышленных регионов рассмотрены в трудах Д.М. Бронникова, Е.И. Шемякина, Г.М. Малахова и др.

Повышению полноты использования недр с максимальным извлечением из них полезных компонентов посвятили труды М.И. Агошков, К.Н. Трубецкой, Д.Р. Каплунов, Е.А. Котенко, В.К. Бубнов, В.А. Шестаков и др. [15].

Система государственного регулирования недропользованием решает задачу управления запасами полезных ископаемых с учетом интересов регионального развития страны. Основная научная задача состоит в том, чтобы оградить недра от бесхозяйственности недропользователей и обеспечить поступательное и продолжительное развитие человеческого общества.

Природоохранные технологии конструируются с максимальным учетом экологических последствий горного производства для экосистем окружающей среды. Их целью является сохранность природных экосистем от влияния горных работ.

Стратегия таких технологий основана на положениях:

- некорректность технологий проявляется в потере природных ресурсов;
 - деградация экосистем является следствием некорректности технологий, поэтому стоимость прибыли должна уменьшаться на величину компенсации ущерба среде.
- Реализация стратегии включает направления:
- геохимическая подготовка месторождений к освоению технологиями нового поколения, начиная с разведки;
 - воспроизводство минеральных ресурсов за счет искусственного рудообразования;
 - контролируемое изменение состояния отходов с учетом особенностей ландшафта.

Особенностью месторождений полезных ископаемых является перераспределение полезных компонентов в запасах. В богатых месторождениях содержится 5 % от общего количества полезных компонентов, в рядовых – 30 %, а в бедных и убогих – 65 %. Наибольшее количество полезных компонентов находится не в самих месторождениях, а во вмещающих породах.

Угроза биосфере со стороны горных технологий связана не столько с загрязнением окружающей среды, а с разрушением естественной биоты земли. Горное производство безопасно, если техногенное возмущение экосистемы не превышает уровня, при котором его биота сохраняет свою способность к самовосстановлению после снятия техногенной нагрузки, в связи с исчерпанием запасов полезных ископаемых [16].

Наиболее опасны технологии с обрушением, когда поверхность земли разрушается вместе с ее экосистемами. Еще более опасны технологии, при которых сохранность литосферы декларируется, но не обеспечивается (с мажанированием, креплением и др.). В этом случае разрушение массива возможно в форме катастрофы.

Направления снижения опасности:

- закладка пустот твердеющими смесями;
- подземное выщелачивание бедных и потерянных руд;
- кучное выщелачивание бедных руд;
- выщелачивание хвостов обогащения и металлургии с активацией процессов, совершенствование подготовки руд к выщелачиванию, в том числе проходка горных выработок [17].

Рудовмещающие массивы разделяют на геомеханически сбалансированные участки путем заполнения технологических пустот разнопрочными твердеющими смесями и породами, или хвостами подземного выщелачивания. Технология решает и основную проблему горного дела – обеспечение сохранности экосистем.

Обеспечение экологического благополучия в регионе горных работ достигается комплексом профилактических мероприятий (рис. 5).

Альтернативой технологий добычи металлов с пирометаллургическим переделом является тех-

нология с выщелачиванием металлов из руд в активаторах [18]. Вскрытие минералов анолитом разложения шахтных стоков и обессоливание растворов в электролизаторах позволяет извлечь до 50-70 % металлов. Конечной целью развития природоохранной концепции является безотходное горное производство с полной утилизацией компонентов добываемого сырья.



Рис. 5. Взаимодействие человека и природы в процессе горного производства

Fig. 5. Interaction of man and nature when mining

Концепция технологической конверсии горного производства включает в себя:

- снижение разубоживания руд породами при закладке пустот твердеющими смесями;
- полное использование запасов при выщелачивании металлов из убогих и бедных руд;
- гидрометаллургическую переработку руд с извлечением всех ценных компонентов.

Состояние природной среды горнодобывающих регионов определяется количеством и качеством хранящихся отходов, поэтому радикальным решением экологической проблемы может быть утилизация запасов хвостов, которая возможна после извлечения из них металлов до уровня санитарных требований [19]. Таким требованиям отвечает технология с комбинированным воздействием на минеральное сырье одновременно механической и химической энергией в активаторах типа дезинтегратор, которая является составной частью получающего развитие направления выщелачивания металлов из руд.

Перспективным направлением извлечения металлов из хвостов обогащения является комбинированная технология, сочетающая возможности одновременно химического обогащения и активации в дезинтеграторе.

Реализация программ радикального оздоровления экосистем окружающей среды путем утилиза-

ции хвостов обогащения на сегодняшний день является единственным направлением выживания технологически насыщенного региона добычи и переработки минерального сырья в условиях неуправляемого развития технического прогресса. Вовлечение в переработку источников химизации экосистем окружающей среды решает одновременно две проблемы глобального значения: упрочнение минерально-сырьевой базы горных предприятий и сохранение от деградации региона [20].

Заключение

Увеличение объемов извлекаемой на поверхность горнорудной массы обусловлено вовлечением в эксплуатацию бедных месторождений со сложными горнотехническими условиями эксплуатации со значительными потерями и разубоживанием.

Горное предприятие является потенциальной угрозой окружающей среде. Безвозвратные потери

полезных компонентов достигают 50 %. Потерянные компоненты становятся мобильными, поступают в зону обитания человека и оказывают на нее отрицательное воздействие. Действенное обеспечение экологической безопасности освоения недр возможно только на базе комплексного решения аспектов рассматриваемой проблемы на всех этапах процесса использования георесурсной базы.

Оценивать перспективы совместного развития минеральной базы горной промышленности и тенденций природосбережения следует из того, что спрос на продукцию горного производства удовлетворять будет еще труднее, несмотря на вовлечение в эксплуатацию новых месторождений. Будут осваиваться глубокие горизонты действующих рудников, месторождения со сложными горно-геологическими условиями, бедные руды, что сопряжено со снижением содержания металла в добываемых рудах, увеличением объема отходов и усилением нагрузки на окружающую среду.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wang Li, Zhang Xiu-Feng. Correlation of ground surface subsidence characteristics and mining disasters under super-thick overlying strata // *Journal of China Coal Society*. – 2009. – V. 34. – № 8. – P. 1048–1051.
2. Шестаков В.А., Разоренов Ю.И., Габараев О.З. Управление качеством продукции на горных предприятиях. – Новочеркасск: Изд-во ЮРГТУ, 2001. – 262 с.
3. Ресурсовоспроизводящие, экологически сбалансированные геотехнологии комплексного освоения месторождений Курской магнитной аномалии / К.Н. Трубецкой, Д.Р. Каплунов, В.К. Томаев, И.И. Помельников // *Горный журнал*. – 2014. – № 8. – С. 56–63.
4. Environmental assessment of heavy metal and natural radioactivity in soil around a coal-fired power plant in China / X. Lu, W. Liu, C. Zhao et al. // *Journal of Radioanalytical & Nuclear Chemistry*. – 2013. – V. 295. – № 3. – P. 1845–1855.
5. Фоменко А.А. Использование техногенных скоплений и забалансовых руд цветных металлов в контексте экономики природопользования // *Горный журнал*. – 2013. – № 2. – С. 102–107.
6. Cooke J.A., Johnson M.S. Ecological restoration of land with particular reference to the mining of metals and industrial minerals // *A Review of Theory and Practice. Environmental Reviews*. – 2002. – № 10 (1). – P. 41–71.
7. Capilla A.V., Delgado A.V. The destiny of the earth's mineral resources. – London: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2015. – 230 p.
8. Sinclair L., Thompson J. In situ leaching of copper: Challenges and future prospects // *Hydrometallurgy*. – 2015. – V. 157. – P. 306–324.
9. Лизункин В.М., Морозов А.А., Бейдин А.В. Комбинированная геотехнология добычных работ с рентгенометрической сортировкой и выщелачиванием урана из бедной рудной массы в подземных условиях // *Горный журнал*. – 2013. – № 8-2. – С. 82–86.
10. Воробьев А.Е., Голик В.И., Лобанов Д.П. Приоритетные пути развития горнодобывающего и перерабатывающего комплекса Северо-Кавказского региона / под ред. акад. К.Н. Трубецкого. – Владикавказ: Изд-во «Рухс», 1998. – 362 с.
11. Гурьев Г.Т., Цирихова Э.М. Полиметаллические месторождения горной Осетии и их перспективы. – Владикавказ: СКГТУ, 2001. – 154 с.
12. Якименко А.Д., Цидаев Т.С., Дзапаров В.Х. Основные факторы геоэкологии РСО-Алания // *Проблемы геологии и освоения недр: семинар*. – Томск: Изд-во ТПУ, 2004. – С. 771–773.
13. Packey D.J. Multiproduct mine output and the case of mining waste utilization // *Resour. Policy*. – 2012. – V. 37. – № 1. – P. 104–108.
14. The effectiveness of combining the stages of ore fields development / V. Golik, V. Komashenko, V. Morkun, Z. Khasheva // *Metallurgical and Mining Industry*. – 2015. – V. 7. – № 5. – P. 401–405.
15. Development of Mineral Processing Engineering Education in China University of Mining and Technology / Haifeng Wang, Yaquin He, Chenlong Duan, Yuemin Zhao, Youjun Tao, Cuiling Ye // *Advances in Computer Science and Engineering. AISC 141*. – Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2012. – P. 77–83.
16. Wu Qiang, Zhang Zhilong, Zhang Shengyuan. A new practical methodology of the coal floor water inrush evaluating II – the vulnerable index method // *Journal of China Coal Society*. – 2007. – № 32 (11). – P. 1121–1126.
17. Лукьянов В.Г., Креп В.Г. Горные машины и проведение горно-разведочных выработок. 2-е изд. – М.: Юрайт, 2016. – 343 с.
18. Техничко-экономическая оценка эффективности блочного подземного выщелачивания урана из бедных руд Стрельцовского рудного поля / А.А. Морозов, А.П. Смагин, Г.Ф. Безносос, А.Н. Юртаев // *Горный журнал*. – 2013. – № 8-2. – С. 129–131.
19. Ракишев Б.Р. Комплексное использование руды на предприятиях цветной металлургии Казахстана // *Горный журнал*. – 2013. – № 7. – С. 102–108.
20. Harris J.M., Roach B. Environmental and Natural Resource Economics. A Contemporary Approach. – New York; Armonk: M.E. Sharpe Inc., 2013. – P. 246–256.

Поступила 13.04.2017 г.

Информация об авторах

Голик В.И., доктор технических наук, профессор, профессор кафедры горного дела Северокавказского государственного технологического университета; главный научный сотрудник Геофизического института Владикавказского научного центра.

Разоренов Ю.И., доктор технических наук, профессор, ректор Северокавказского государственного технологического университета.

Лукьянов В.Г., доктор технических наук, профессор, профессор кафедры транспорта и хранения нефти Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 504.55.054:622(470.6)

ENVIRONMENTAL AND ECONOMIC ASPECTS OF RESOURCE SAVING IN MINING

Vladimir I. Golik^{1,2},
v.i.golik@mail.ru

Yuri I. Razorenov¹,
yiri1963@mail.ru

Victor G. Lukyanov³,
lukyanov@tpu.ru

¹ North-Caucasian State Technological University,
44, Nikolaev street, Vladikavkaz, 362021, Russia.

² Vladikavkaz Scientific Center,
93a, Markov street, Vladikavkaz, 362002, Russia.

³ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

Relevance. Mining production became «the recognized leader» in the impact on the environment, including the destruction of the earth's surface when mining, with catastrophic consequences. Minimizing harmful effects of mining technologies becomes a topical area of research at the global scale, but there is no practical solution on the way out of the situation.

The aim of the study is to prove the ecological-economic efficiency of nature protection and resource-saving technologies of mining ore deposits of solid minerals and to substantiate their prospects.

Methods of the research include analysis and synthesis of results of theoretical and experimental research carried out before, literature and patent data.

Results. The paper introduces the historical information on the dynamics of mining industry evolution. It is shown that natural and anthropogenic factors of destruction of ecosystems increase each other due to synergetic effect. The authors have identified the areas of risk reduction: laying the technological voids with hardening mixtures; in situ leaching of poor and orphaned ores; heap leaching of low-grade ores; leaching of tailings of beneficiation and metallurgy of activated processes in activator-type disintegrator. Disposal of ore primary processing tailings after extracting metals to the level of sanitary requirements by combining chemical enrichment and activation is recommended as the perspective direction of solving environmental problems.

Conclusions. Disposal of tailings is the real direction of survival of the technologically rich region of extraction and processing of mineral raw materials in the context of unpredictable technological advances, solving the problem of hardening mineral-raw material base of mining enterprises and environmental conservation from degradation.

Key words:

Mining production, ecosystem, technology, bookmark, leaching, resources, utilization, stocks, tails enrichment, disintegrator.

REFERENCES

1. Wang Li, Zhang Xiu-feng. Correlation of ground surface subsidence characteristics and mining disasters under super-thick overlying strata. *Journal of China Coal Society*, 2009, vol. 34, no. 8, pp. 1048–1051.
2. Shestakov V.A., Razorenov Yu.I., Gabaraev O.Z. *Upravlenie kachestvom produktsii na gornyykh predpriyatiyakh* [Quality Control of products in mining]. Novocherkassk, SRSTU Publ. house, 2001. 262 p.
3. Trubetskoy K.N., Kaplunov D.R., Tomaev V.K., Pomelnikov I.I. Resource reproducing and ecologically balanced geotechnologies of complex development of deposits of Kursk magnetic anomaly. *Mountain zhurnal*, 2014, no. 8, pp. 56–63. In Rus.
4. Lu X., Liu W., Zhao C. Environmental assessment of heavy metal and natural radioactivity in soil around a coal-fired power plant in China. *Journal of Radioanalytical & Nuclear Chemistry*, 2013, vol. 295, no. 3, pp. 1845–1855.
5. Fomenko A. A. Use of man-made clusters and off-balance ores of non-ferrous metals in the context of environmental Economics. *Mountain zhurnal*, 2013, no. 2, pp. 102–107. In Rus.
6. Cooke J.A., Johnson M.S. Ecological restoration of land with particular reference to the mining of metals and industrial minerals. *A Review of Theory and Practice. Environmental Reviews*, 2002, no. 10 (1), pp. 41–71.
7. Capilla A.V., Delgado A.V. *The destiny of the earth's mineral resources*. London, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2015. 230 p.
8. Sinclair L., Thompson J. In situ leaching of copper: Challenges and future prospects. *Hydrometallurgy*, 2015, vol. 157, pp. 306–324.
9. Lizunkin V.M., Morozov A.A., Beydin A.V. Combined Geotechnology of mining with X-ray radiometric sorting and leaching of uranium from poor rock mass in underground conditions. *Mountain zhurnal*, 2013, no. 8–2, pp. 82–86. In Rus.
10. Vorobyev A.E., Golik V.I., Lobanov D.P. *Prioritetnye puti razvitiya gornodobyvayushchego i pererabatyvayushchego kompleksa Severo-Kavkazskogo regiona* [Priority ways of development of mining and processing complex in the North Caucasian region]. Ed. by K.N. Trubetskoy. Vladikavkaz, Rukhs Publ., 1998. 362 p.
11. Guriev G.T., Tsirikhova E.M. *Polimetallicheskie mestorozhdeniya gornoy Osetii i ikh perspektivy* [Polymetallic deposits of mountainous Ossetia and their prospects]. Vladikavkaz, SKGTU Publ., 2001. 154 p.
12. Yakimenko A.D., Tsidaev T.S., Dzaparov V.Kh. Osnovnye factory geologii RSO-Alaniya [Main factors of geocology of North Ossetia-Alania]. *Problemy geologii i osvoenoya nedr. Seminar* [Geology and mineral exploration. Workshop]. Tomsk, TPU Publ. house, 2004. pp. 771–773.

13. Packey D.J. Multiproduct mine output and the case of mining waste utilization. *Resour. Policy*, 2012, vol. 37, no. 1, pp. 104–108.
14. Golik V., Komashenko V., Morkun V., Khasheva Z. The effectiveness of combining the stages of ore fields development. *Metalurgical and Mining Industry*, 2015, vol. 7, no. 5, pp. 401–405.
15. Haifeng Wang, Yaqun He, Chenlong Duan, Yuemin Zhao, Youjun Tao, Cuiling Ye. Development of Mineral Processing Engineering Education in China University of Mining and Technology. *Advances in Computer Science and Engineering. AISC 141*. Berlin; Heidelberg, Springer-Verlag, 2012. pp. 77–83.
16. Wu Qiang, Zhang Zhilong, Zhang Shengyuan. A new practical methodology of the coal floor water inrush evaluating II – the vulnerable index method. *Journal of China Coal Society*, 2007, no. 32 (11), pp. 1121–1126.
17. Lukyanov V.G., Krets V.G. *Gornye mashiny i provedenie gorno-razvedochnykh vyrabotok* [Mining machines and carrying out mining exploration workings]. Moscow, Yurayt Publ., 2016. 343 p.
18. Morozov A.A., Smagin A.P., Beznosov G.F., Yurtaev A.N. Techno-economic assessment of efficiency of block underground leaching of uranium from poor ores of the streltsovskoye ore field. *Mountain zhurnal*, 2013, no. 8–2, pp. 129–131. In Rus.
19. Rakishhev B.R. Integrated use of ore at the enterprises of nonferrous metallurgy of Kazakhstan. *Mountain zhurnal*, 2013, no. 7, pp. 102–108. In Rus.
20. Harris J.M., Roach B. *Environmental and Natural Resource Economics. A Contemporary Approach*. Armonk, New York, M.E. Sharpe, Inc., 2013. 246 p.

Received: 13 April 2017.

Information about the authors

Vladimir I. Golik, Dr. Sc., professor, North-Caucasian State Technological University; Vladikavkaz Scientific Center.

Yuri I. Razorenov, Dr. Sc., professor, rector, North-Caucasian State Technological University.

Victor G. Lukyanov, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 620.9

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОЛЕТНИХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ РЯДОВ, НАХОДЯЩИХСЯ В ОТКРЫТОМ ДОСТУПЕ

Карамов Дмитрий Николаевич,
dmitriy.karamov@mail.ru

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук,
Россия, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130.

Актуальность работы обусловлена значительным ростом ввода объектов генерации, использующих возобновляемые источники энергии на территории Сибири и Дальнего Востока.

Цель работы: продемонстрировать возможность использования многолетних метеорологических рядов, зафиксированных на ближайшей от рассматриваемой территории метеостанции, и других параметров, взятых из открытых источников для моделирования солнечной радиации; показать эффективность использования математических моделей *Iqbal* и *Kasten-Czeplak* при моделировании суммарной, прямой, рассеянной солнечной радиации для территорий арктической и приарктической зоны Сибири и Дальнего Востока.

Методы исследования. В работе теория выстроена на апробированных математических моделях солнечной радиации *Iqbal* с определением ряда астрономических и динамических процессов, протекающих в средних и нижних слоях атмосферы, с применением математических моделей анализа фактической облачности *Kasten-Czeplak*. Используются массивы многолетних метеонаблюдений, зафиксированные на различных метеостанциях, а также данные из открытых источников. Применяется высокоуровневый язык программирования *Matlab*.

Результаты. Выявлены закономерности при моделировании солнечной радиации в арктической и приарктической зоне Республики Якутия. Проведено математическое моделирование суммарной, прямой, рассеянной солнечной радиации для 12-летнего периода метеонаблюдений с шагом один час для различных населенных пунктов. Получены массивы солнечной радиации размерностью 105120×3 (12 лет). Разработан программно-вычислительный комплекс «Локального анализа параметров окружающей среды и солнечной радиации», реализующий представленную методику. Сделаны соответствующие выводы и заключения о полученных результатах, степени их достоверности и возможном их использовании в дальнейших исследованиях научно-прикладного характера.

Ключевые слова:

Возобновляемые источники энергии, солнечная радиация, метеорологические ряды, облачность, *Iqbal model*, *Kasten-Czeplak model*.

Введение

Современный вектор энергетической политики мира направлен на увеличение доли возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в общемировом энергетическом балансе [1–3]. Ускорившийся переход на безуглеродную энергетику продиктован сложившейся ситуацией на мировом энергетическом рынке сырья [4], а также подписанием исторического «Парижского соглашения» о климате, подразумевающего сокращение выбросов парниковых газов в атмосферу. «Киотский протокол» и спустя двадцать лет «Парижское соглашение» являются основополагающими механизмами перехода на экологически чистую энергетику во всем мире [5].

Стоит отметить, что во многих регионах вводятся как краткосрочные, так и долгосрочные программы по развитию ВИЭ. В Европейском Союзе действует программа «Еurore 2020», согласно которой к 2020 г. доля ВИЭ в общей генерации будет составлять не менее 20 % [6]. В США разработана программа «Federal Energy Management Program», цель которой состоит в сокращении выбросов CO_2 на 40 % (по сравнению с 2008 г.) [7]. В РФ Министерством энергетики разработана «Энергетическая стратегия России на период до 2035 года», где значимую роль отводят развитию ВИЭ [8]. Как утверждает министр энергетики РФ А.В. Но-

вак, в энергетической стратегии до 2035 года предусматривается рост доли ВИЭ в общем энергетическом балансе страны до уровня 3–4 % [9].

Во многих странах разрабатываются собственные программы, стратегии, планы, законодательные акты по содействию развитию ВИЭ: зеленые сертификаты [10], бесплатное подключение к энергетической системе [11], гарантированная цена и покупка произведенной энергии [12], налоговые льготы и разные другие преференции [13]. Можно с уверенностью сказать, что сложившаяся конъюнктура мировой энергетики имеет все необходимые условия для успешного развития ВИЭ как в централизованных, так и автономных системах электроснабжения.

Интересным фактом является то, что в странах Европейского Союза ВИЭ преимущественно используются в централизованных системах [14], в то время как в России – в автономных [15].

Это продиктовано тем, что в северных и северо-восточных регионах России находится около 250 автономных систем электроснабжения, где в качестве основного генерирующего оборудования используются дизель-генераторы с установленной мощностью от 10 до нескольких сотен кВт [16]. Уравновешенная стоимость электроэнергии (*levelized cost of electricity – LCOE*) для таких систем находится в диапазоне от 0,35 до 0,6€ за кВт·ч,

что является крайне высокими значениями. Такие большие показатели связаны с высокой стоимостью арктического дизельного топлива (с учетом доставки), которая составляет от 816,38 до 1041,98€ за тонну [17].

Российский и мировой опыт показывает, что использование возобновляемых источников энергии совместно с традиционными энергетическими установками и накопителями энергии является экономически эффективным способом энергообеспечения потребителей в автономных системах электроснабжения [18–22]. Задачи оптимизации состава оборудования в таких системах являются главными [23–32].

Анализ параметров окружающей среды

Описание параметров окружающей среды является первым шагом при использовании возобновляемых источников энергии. Функция скорости ветра и интенсивность солнечного излучения необходимы для определения потенциально возможной генерации и как следствие экономической эффективности ВИЭ.

Наиболее известными подходами к описанию функции скорости ветра при оптимизации состава оборудования автономных систем электроснабжения являются аналитические зависимости Вейбулла и Релея [33–38]. Согласно [39], замена реальных эмпирических данных на сколь угодно приближенную их аппроксимацию неизбежно ведет к менее точному в математическом и физическом смыслах результату.

При определении среднемесячной солнечной радиации в большинстве случаев используется открытая база данных NASA SSE [18, 23, 31, 40–45]. Однако, согласно первоисточнику [46], измеренные на метеостанции значения прямой, рассеянной солнечной радиации и её составляющих, являются более точными по сравнению с данными, получаемыми со спутников. При этом следует отметить, что для корректной оценки фотоэлектрического потенциала местности необходимо иметь метеонаблюдения как минимум за пятилетний период [47].

Особенно необходимо отметить, что использование среднемесячных метеоданных (скорость ветра, солнечная радиация, давление, температура воздуха и т. д.), взятых с различных открытых источников, не учитывает корреляцию между параметрами окружающей среды. Поэтому в рамках данной работы используется программно-вычислительный комплекс «Локального анализа параметров окружающей среды и солнечной радиации». В рамках данного комплекса используются многолетние массивы параметров окружающей среды (скорость ветра, давление, облачность, температура воздуха и т. д.), зафиксированные на ближайшей от рассматриваемой территории метеостанции. Такие массивы есть в открытом доступе и представляют собой совокупность срочных измерений (каждые 3 часа). Количество лет метеона-

блюдений на текущий момент даже для отдаленных населенных пунктов России составляет от десяти до двенадцати [48].

Обработка многолетних метеорологических рядов

Многолетние метеорологические ряды, полученные на основании срочных измерений (каждые 3 часа), являются достаточно детализированной информацией. Фиксирование параметров окружающей среды выполняется одновременно, что неявно учитывает корреляцию между ними. Фиксируются следующие параметры: скорость и направление ветра, температура воздуха, давление, влажность, облака нижнего яруса (слоисто-кучевые, слоистые, слоисто-дождевые, кучево-дождевые), высота облаков, облака среднего яруса (высококучевые, кучевые, высокослоистые), облака верхнего яруса (перистые, перисто-кучевые и перисто-слоистые облака), общая облачность, а также процент облаков плохой погоды [48]. В целом такие массивы можно представить в виде следующих матриц.

Матрица приборных измерений параметров окружающей среды

$$\begin{bmatrix} t & v_{wind} & T_{air} & P_{air} \\ t_0 & v_0 & T_0 & P_0 \\ t_1 & v_1 & T_1 & P_1 \\ t_2 & v_2 & T_2 & P_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ t_n & v_n & T_n & P_n \end{bmatrix}$$

и матрица наблюдательной оценки параметров окружающей среды

$$\begin{bmatrix} t & C_{lt} & C_{mt} & C_{ht} & \rho_{\%cloud} & b_{\%cloud} \\ t_0 & C_{lt0} & C_{mt0} & C_{ht0} & \rho_0 & b_0 \\ t_1 & C_{lt1} & C_{mt1} & C_{ht1} & \rho_1 & b_1 \\ t_2 & C_{lt2} & C_{mt2} & C_{ht2} & \rho_2 & b_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ t_n & C_{ltn} & C_{mntn} & C_{htn} & \rho_n & b_n \end{bmatrix}$$

Методика расчета солнечной радиации

Поступающая на поверхность Земли солнечная радиация непостоянна и зависит от множества изменяющихся и переменных параметров.

К неизменяющимся из года в год параметрам относятся: географические координаты и часовой пояс местности, количество дней расчетного периода, время восхода, зенита и заката Солнца, продолжительность дня и т. д.

К переменным параметрам в первую очередь необходимо отнести следующие показатели: наличие облачности, состав облаков, альbedo облаков и альbedo поверхности Земли, атмосферная масса с учетом изменяющегося давления и температуры воздуха, изменение толщины вертикального столба озонового слоя, изменение спектрального состава

ва области видимого света, наличие в облаках водяного пара, аэрозолей и т. д.

При расчете солнечной радиации в первую очередь для каждого дня определяется время восхода, зенита и заката Солнца на рассматриваемой территории.

Номер дня

$$\begin{aligned} n &= n_1 - (n_2 n_3) + N_d - 30; \\ n_1 &= (275 N_m / 9); \\ n_2 &= (N_m + 9) / 12; \\ n_3 &= (1 + ((N_y - 4(N_y / 4) + 2) / 3)), \end{aligned}$$

где N_d – номер дня в году; N_m – номер месяца; N_y – номер расчетного года.

Средняя аномалия Солнца

$$M_s = (0,9856 t_i) - 3,289,$$

если восход

$$t_i = n + ((6 - (\text{lon} / 15)) / 24),$$

если закат

$$t_i = n + ((18 - (\text{lon} / 15)) / 24).$$

Истинная долгота Солнца

$$\begin{aligned} L_s &= M_s + (1,916 \sin(M_s)) + \\ &+ (0,020 \sin(2M_s)) + 282,634. \end{aligned}$$

Прямое восхождение Солнца

$$R_s = (\tan^{-1}(0,91764 \tan(L_s)) + 360) / 15.$$

Склонение Солнца

$$\begin{aligned} \sin dec &= 0,39782 \sin(L_s); \\ \cos dec &= \cos(\sin^{-1}(\sin dec)). \end{aligned}$$

Местный часовой угол Солнца

$$\begin{aligned} \cos H_s &= \left(\cos - \left(\frac{\sin dec \sin(lat)}{\cos dec \cos(lat)} \right) \right); \\ H_s &= (360 - \cos^{-1}(\cos(H))) / 15. \end{aligned}$$

Местное время восхода и захода Солнца

$$T_s = H_s + R_s - (0,0657 t_i) - 6,622.$$

Перевод полученных значений на долготу местности

$$U_i = T_s - (\text{lon} / 15).$$

Определение времени восхода и захода Солнца на рассматриваемой территории

$$L_i = U_i + UTC \mp 24.$$

Более детально с описанием алгоритма расчета времени восхода и захода Солнца можно ознакомиться в [49].

После того как определены временные интервалы, в рамках которых $H_s > 0$, производится расчет прямой, рассеянной и суммарной солнечной радиации на рассматриваемой территории. В работе используются основные положения, представленные в математической модели *Iqbal* [50].

$$\dot{I}_n = 0,9751 E_0 \dot{I}_{sc} \tau_r \tau_o \tau_g \tau_w \tau_a,$$

где E_0 – корреляционный коэффициент эксцентриситета орбиты Земли

$$\begin{aligned} E_0 &= 1,00011 + 0,0034221 + 0,00128 \sin \Gamma + \\ &+ 0,000719 \cos 2\Gamma + 0,000077 \sin 2\Gamma; \\ \Gamma &= 2\pi((N_d - 1) / 365), \end{aligned}$$

τ_r , τ_o , τ_g , τ_w , τ_a являются коэффициентами пропускания света, которые представлены Релеевским рассеиванием, рассеиванием в озоновом слое, наличием газа и капель воды в атмосфере, а также аэрозолями.

$$\begin{aligned} \tau_r &= e^{-0,0903 m_a^{0,84} (1+m_a - m_a^{1,01})}; \\ \tau_o &= 1 - \left[\begin{aligned} &0,1611 U_3 (1 + 139,48 U_3)^{-0,3035} - \\ &- 0,002715 U_3 (1 + 0,044 U_3 + 0,0003 U_3^2)^{-1} \end{aligned} \right]; \\ \tau_g &= e^{-0,0127 m_a^{0,26}}; \\ \tau_w &= 1 - 2,4959 U_1 [(1 + 79,034 U_1)^{0,6828} + 6,385 U_1]^{-1}; \\ \tau_a &= e^{-\frac{p_{air}^{0,873} (1 + I_{ao} - I_{ao}^{0,7808}) m_a^{0,9708}}{ao}}, \end{aligned}$$

где m_a – атмосферная масса с учетом поправки на давление окружающей среды

$$m_a = m_r (p_{air} / 1013,25),$$

где p_{air} (мбар) – местное атмосферное давление и атмосферная масса $m_r = 1 / \sin \delta$.

Угол склонения Солнца

$$\delta = \sin^{-1}(\sin(23,45) \sin(360 / 365 (n_d - 81)))$$

Угол возвышения Солнца

$$\alpha = 90 - \varphi + \delta.$$

Оптическая длина пути в озоновом слое атмосферы с учетом поправки на давление окружающей среды (еД)

$$U_3 = l_{oz} m_a,$$

где l_{oz} – (еД) вертикальная величина озонового слоя.

World Ozone and Ultraviolet Radiation Data Centre (WOURDC) имеет открытую базу данных по l_{oz} [51].

$$U_1 = w m_r,$$

где w (см) – осажденная толщина водяного пара и капель воды в атмосфере. w рассчитывается с учетом поправки на температуру и давление окружающей среды wr (см)

$$w = w' (p_{air} / 1013,25)^{3/4} (273 / T_{air})^{1/2}.$$

Оптическая глубина аэрозолей

$$l_{ao} = 0,2758 l_{ao; \lambda|\lambda=0,38 \mu m} + 0,35 l_{ao; \lambda|\lambda=0,5 \mu m}.$$

AErosol RObotic NETwork (AERONET) позволяет получить многолетние данные по w' , $l_{ao; \lambda|\lambda=0,38 \mu m}$, $l_{ao; \lambda|\lambda=0,5 \mu m}$ [52].

$$\dot{I}_b = \sin \alpha \dot{I}_n C_{c-dr},$$

где $\sin \alpha$ (градусы) угол возвышения и C_{c-dr} коэффициент уменьшения прямой солнечной радиации за счет облачности.

$$C_{c-dr} = 1 - 0,75 (N / 8)^{3,4},$$

где N зависит от степени покрытия неба облаками в определенный момент времени (3 часовой интервал) – измеряется в октантах (oktas) [53, 54]

Рассеянная солнечная радиация образуется в результате рассеивания солнечных лучей в нижних слоях атмосферы и отражённая от земной поверхности земли.

$$\dot{I}_d = (\dot{D}_r + \dot{D}_a + \dot{D}_m) C_{c-df},$$

где \dot{D}_r – Релеевское рассеивание солнечной радиации после прохода атмосферы.

$$\dot{D}_r = \frac{0,79 \dot{I}_{sc} \sin \alpha \tau_o \tau_g \tau_w \tau_{aa} 0,5(1 - \tau_r)}{1 - m_a + m_a^{1,02}},$$

где

$$\tau_{aa} = 1 - (1 - \omega_0)(1 - m_a + m_a^{1,06})(1 - \tau_a).$$

Аэрозольное рассеивание солнечной радиации при проходе через атмосферу

$$\dot{D}_a = \frac{0,79 \dot{I}_{sc} \sin \alpha \tau_o \tau_g \tau_w \tau_{aa} 0,84(1 - \tau_r)}{1 - m_a + m_a^{1,02}};$$

$$\tau_{as} = \tau_a / \tau_{aa}.$$

Рассеянная солнечная радиация, многократно отраженная между поверхностью Земли и нижними слоями атмосферы,

$$\dot{D}_m = \frac{(\dot{I}_n \sin \alpha + \dot{D}_r + \dot{D}_a) \rho_g \rho_a}{1 - \rho_g \rho_a};$$

$$\rho_a = 0,0685 + (1 - \rho_a^{ct})(1 - \tau_{as}),$$

где ρ_a^{ct} – альbedo облаков относительно каждого временного интервала, %. Зависит от типа и состава облаков [55].

Суммарная солнечная радиация, Вт·м²

$$\dot{I}_t = \dot{I}_b + \dot{I}_d.$$

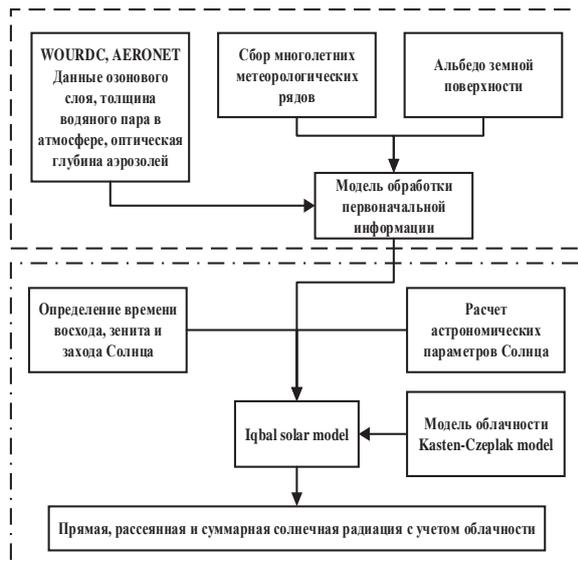


Рис. 1. Блок-схема, укрупненно описывающая представленную методику

Fig. 1. Block diagram describing the methodology as a whole

На рис. 1 укрупненно представлена блок-схема, описывающая представленную в работе методику.

Данная методика реализована в программно-вычислительном комплексе «Локального анализа параметров окружающей среды и солнечной радиации». Программно-вычислительный комплекс реализован на высокоуровневом языке программирования *Matlab R2014a*. При исследовании использовался компьютер со следующими характеристиками: Intel (R) Core (TM) i5-4690, 4×3.50 GHz, 8 Gb RAM

Выбор объектов исследования

В работе рассматривается ряд населенных пунктов республики Якутия, расположенных как в относительной близости к полярному кругу, так и за ним.

Такой выбор продиктован следующими целями:

- 1) показать состоятельность модели с учетом сложных астрономических явлений, таких как полярная ночь и полярный день;
- 2) продемонстрировать возможность использования многолетних метеорологических рядов, взятых из открытых источников для моделирования солнечной радиации;
- 3) выполнить статистический анализ полученных результатов с последующими выводами о возможности их использования.

В табл. 1 представлены населенные пункты, географические координаты, количество лет метеонаблюдений и код передачи метеорологических данных.

Таблица 1. Общие сведения рассматриваемых объектов

Table 1. Overview the objects under consideration

Населенный пункт Settlement	Географические координаты Geographical coordinates	Кол-во лет наблюдений Number of years of observations	Код передачи данных Data transfer code
Алдан Aldan	58,36 с.ш., N 125,23 в.д., E	12	FM 12 SYNOP
Якутск Yakutsk	62,01 с.ш., N 129,43 в.д., E		
Оймякон Oymyakon	63,27 с.ш., N 142,47 в.д., E		
Черский Chersky	68,45 с.ш., N 161,19 в.д., E		
Тикси Tiksi	71,38 с.ш., N 128,52 в.д., E		
Саскылах Saskylakh	71,57 с.ш., N 114,05 в.д., E		
Верхоянск Verkhoyansk	67,33 с.ш., N 133,23 в.д., E		
Усть-Мома Ust-Moma	66,27 с.ш., N 143,13 в.д., E		

Как видно, количество лет метеонаблюдений, находящихся в открытом источнике, составляют 12. FM 12 SYNOP – это код для оперативной передачи данных приземных гидрометеорологических наблюдений с сети станций гидрометслужбы, расположенных на суше (включая береговые станции).

Данные о толщине озонового слоя можно получить только с метеостанций, имеющих соответствующее измерительное оборудование. Например, в республике Якутия такие метеостанции находятся в населенных пунктах Якутск и Витим.

На рис. 2 показано изменение толщины озонового слоя по данным наблюдений метеостанции г. Якутска на протяжении 12 лет [51].

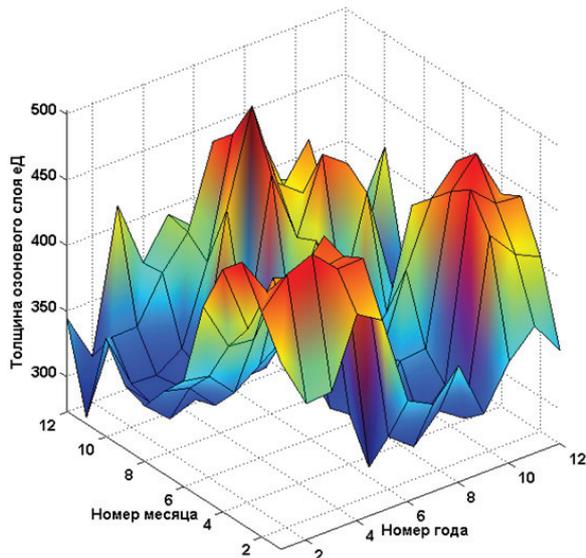


Рис. 2. Изменение толщины озонового слоя по данным наблюдений метеостанции г. Якутска на протяжении 12 лет расчетного периода

Fig. 2. Change in the ozone layer thickness by the observations of the meteorological station of Yakutsk for 12 years of the calculation period

В расчетах принимается, что данные о толщине озонового слоя, зафиксированные на метеостанции Якутска, распространяются для всех населенных пунктов Республики Якутия.

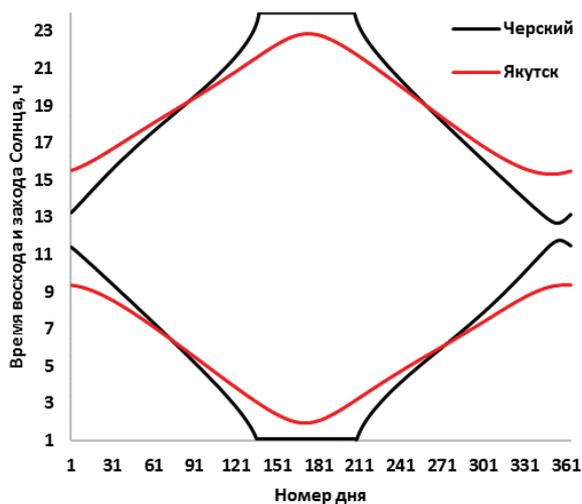


Рис. 3. Восход и заход Солнца в течение года в населенных пунктах Якутск и Черский

Fig. 3. Sunrise and sunset during the year in the settlements of Yakutsk and Chersky

Представим полученные результаты расчета восхода и захода Солнца в населенных пунктах Якутск и Черский на рис. 3.

В рамках полученных временных интервалов (между восходом и заходом Солнца) определяются основные метеорологические и астрономические параметры, по которым производится расчет прямой, рассеянной и суммарной солнечной радиации, поступающей на горизонтальную поверхность на рассматриваемой территории. Расчет выполняется с дискретным шагом один час. На рис. 4 показана суммарная, прямая и рассеянная солнечная радиация, поступающая на горизонтальную поверхность в населенном пункте Черский на протяжении 12 лет.

В табл. 2 показана суммарная солнечная радиация, по годам метеонаблюдений.

Таблица 2. Суммарная солнечная радиация, падающая на горизонтальную поверхность в рассматриваемых населенных пунктах по годам метеонаблюдений

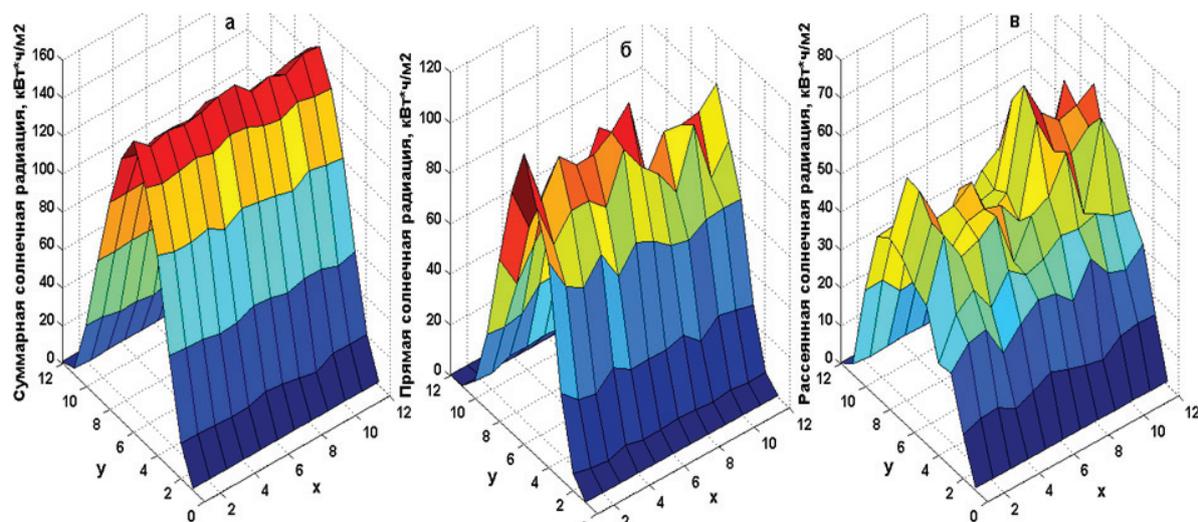
Table 2. Summary solar radiation arriving on horizontal surface in the settlements by years of weather observations

		Суммарная солнечная радиация, кВт·ч/м ² Summary solar radiation, kW·h/m ²							
Номер года Number of the year	Алдан Aldan	Якутск Yakutsk	Оймякон Oymyakon	Черский Chersky	Тикси Tiksi	Саскылах Saskylakh	Верхоянск Verkhoyansk	Усть-Момы Ust-Moma	
1	252,7	1064,6	1040,1	862,79	719,99	720,61	892,60	958,48	
2	203,8	1031,6	1006,4	850,30	725,02	742,02	884,39	933,72	
3	204,0	1031,8	1017,4	853,53	733,48	740,93	890,10	939,70	
4	242,6	1040,9	1022,5	854,79	724,28	725,68	886,47	927,83	
5	195,7	1027,6	996,5	850,40	731,60	733,61	881,80	927,36	
6	225,2	1042,1	1019,6	871,97	737,84	729,64	895,09	943,07	
7	246,8	1061,0	1025,8	879,88	751,26	760,70	909,44	954,67	
8	210,5	1023,2	994,9	873,76	777,66	790,39	905,29	938,33	
9	199,7	1006,2	995,3	870,14	767,12	780,44	886,85	929,54	
10	225,0	1035,7	1021,3	877,65	770,23	777,73	903,94	954,27	
11	216,8	1033,1	1006,7	888,36	790,12	778,57	895,83	934,85	
12	212,3	1024,8	1003,5	885,97	784,74	777,42	899,21	942,33	
Среднее значение Mean value	219,58	1035,21	1012,51	868,30	751,10	754,81	894,25	940,35	

Размах вариации находится в диапазоне от 27,64 до 70,12 кВт·ч/м². Минимальное и максимальное значение среднеквадратичного отклонения составляет от 8,47 до 24,52 % соответственно. Размах вариации к среднему значению (коэффициент осцилляции) составляет от 1 до 9 %. Полученные значения статистических показателей являются приемлемыми и могут быть использованы для дальнейшего анализа.

Обсуждение полученных результатов

Полученные результаты расположены относительно друг друга достаточно близко. Это говорит о том, что климатические процессы, протекающие в средних и нижних слоях атмосферы, имеют ци-



* x – номер расчетного года/Number of the year, y – номер месяца в году/Month number

Рис. 4. а) суммарная; б) прямая; в) рассеянная солнечная радиация, поступающая на горизонтальную поверхность в населенном пункте Черский на протяжении 12 лет расчетного периода

Fig. 4. а) summary; б) direct; в) diffuse solar radiation, arriving on horizontal surface in the settlement of Chersky for 12 years of the calculation period

клический характер. Цикличность продиктована наступающими из года в год барическими депрессиями, отвечающими за долгосрочную (сезонную) климатическую обстановку на рассматриваемой территории [56].

В табл. 3 сопоставлены полученные результаты с общеизвестными открытыми источниками, такими как база данных *NASA SSE* [57].

Однако стоит упомянуть, что среднеквадратичное отклонение для суммарной, прямой, рассеянной солнечной радиации, взятой из *NASA SSE*, для территорий, находящихся от 60° до 90° северной широты, имеет значения 34,37, 54,14 и 33,12 % [57, 58].

Кроме того, при формировании базы данных *NASA SSE* для территории России использовались данные только с 6 метеостанций! Учитывая протяженность территории и высокоширотное расположение значительной её части, верификация данных имеет важное значение [58]. Как уже говорилось ранее, в *NASA SSE* отмечается, что реальные массивы солнечной радиации, а также её составляющие, зафиксированные непосредственно на рассматриваемой территории, являются более точ-

ной информацией, по сравнению с данными, получаемыми со спутников [57].

Выводы

При моделировании суммарной, прямой и рассеянной солнечной радиации необходимо выделить следующие закономерности.

1. Постепенное приближение к 67° (и далее) северной широте, где наблюдаются астрономические явления: полярная ночь и полярный день, увеличивает среднеквадратичное отклонение. Это, в первую очередь, связано с менее точным определением временных интервалов, при которых Солнце находится (или отсутствует) на горизонте с учетом вышеописанных явлений.
2. Тандем математических моделей *Iqbal* и *Kasten-Czeplak*, дополненный многолетними метеорологическими рядами, взятыми непосредственно с ближайшей от рассматриваемой территории метеостанции и другими параметрами из открытых источников, позволяет максимально детализировано воспроизводить актинометрические процессы с минимальными отклонениями, что является вполне приемлемым

Таблица 3. Сопоставление полученных среднегодовых значений суммарной солнечной радиации, поступающей на горизонтальную поверхность, для рассматриваемых населенных пунктов с данными из [57]

Table 3. Comparison of the mean annual values of total solar radiation with the data in [57]

Населенный пункт Settlement	Алдан Aldan	Якутск Yakutsk	Оймякон Oymyakon	Черский Chersky	Тикси Tiksi	Саскылах Saskylakh	Верхоянск Verkhoyansk	Усть-Мома Ust-Moma
Среднее значение, кВт·ч/м ² Mean value, kW·h/m ²	1219,58	1035,21	1012,51	868,30	751,10	754,81	894,25	940,35
[57], кВт·ч/м ² (kW·h/m ²)	1091,32	1084,15	1051,24	905,23	781,12	795,35	949,11	952,65

для данных явлений, имеющих стохастический, осциллирующий характер.

- Использование данной методики позволяет с фиксированным шагом дискретизации определять солнечную радиацию на протяжении всего периода метеонаблюдений. В отличие от базы данных NASA SSE, где находятся только среднемесячные значения (итого 12), в представленной методике итоговые массивы имеют размерность 105120×3 (итого 12 лет расчетного периода).
- Получаемые массивы позволяют достаточно точно определять эффективность использования фотоэлектрических преобразователей в автономных системах электроснабжения с учетом фактических режимов работы электротехнического оборудования (сетевые и батарейные инверторы, аккумуляторные батареи и т. д.) с соблюдением ряда эксплуатационно-технических ограничений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- International Renewable Energy Agency (IRENA). Renewable energy statistics 2016. URL: http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_RE_Statistics_2016.pdf (дата обращения: 25.03.2017).
- The European Wind Energy Association (EWEA). Wind energy today. URL: <https://windeurope.org/about-wind/wind-energy-today> (дата обращения: 25.03.2017).
- Solar power Europe. New global market outlook 2016–2020. URL: http://www.solarpowereurope.org/fileadmin/user_upload/documents/Events/SolarPower_Webinar_Global_Market_Outlook.pdf (дата обращения: 25.03.2017).
- The Guardian. Slump in oil prices drives green energy take up in top exporting nations. URL: <https://www.theguardian.com/environment/2016/jan/20/slump-in-oil-prices-drives-green-energy-take-up-in-top-exporting-nations> (дата обращения: 25.03.2017).
- The Guardian. Paris climate deal: nearly 200 nations sign in end of fossil fuel era. URL: <https://www.theguardian.com/environment/2015/dec/12/paris-climate-deal-200-nations-sign-finish-fossil-fuel-era> (дата обращения: 25.03.2017).
- Communication from the commission to the European Parliament and the council. Energy Efficiency and its contribution to energy security and the 2030 Framework for climate and energy policy. URL: https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/2014_eec_communication_adopted_0.pdf (дата обращения: 25.03.2017).
- Presidential Documents. Planning for Federal Sustainability in the Next Decade. March 25, 2015. Part II. The President. URL: <https://www.gpo.gov/fdsys/pkg/FR-2015-03-25/pdf/2015-07016.pdf> (дата обращения: 25.03.2017).
- Энергетическая стратегия России на период до 2035 года. URL: http://www.energystrategy.ru/ab_ins/source/ES-2035_09_2015.pdf (дата обращения: 25.03.2017).
- Прогноз министра энергетики РФ о ВИЭ URL: <https://rg.ru/2016/06/06/razvitiu-alternativnoj-energetiki-v-rf-nuzhen-stimul.html> (дата обращения: 25.03.2017).
- Pineda S., Bock A. Renewable-based generation expansion under a green certificate market // Renewable Energy. – 2016. – V. 91. – P. 53–63.
- Law of the Republic of Belarus – about renewable energy (December 27, 2010. N 204-3) URL: <http://cis-legislation.com/document.fwx?rgn=32614> (дата обращения: 25.03.2017).
- Zamfir A., Colesca S.E., Corbos R.-A. Public policies to support the development of renewable energy in Romania: a review //

Заключение

В работе представлена методика использования многолетних метеорологических рядов при определении суммарной, прямой и рассеянной солнечной радиации. Представлены расширенные математические модели *Iqbal* и *Kasten-Czeplak*, реализованные в программно-вычислительном комплексе «Локального анализа параметров окружающей среды и солнечной радиации». Произведены актинометрические расчеты для различных населенных пунктов Республики Якутия, а также сопоставлены с результатами NASA SSE. Представлены основные выводы, которые позволяют с уверенностью утверждать о состоятельности использования представленной методики и реализующего её программно-вычислительного комплекса для определения солнечной радиации с фиксированным шагом дискретизации для решения научно-прикладного характера.

- Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2016. – V. 58. – P. 87–106.
- Govinda R. Timilsina., Kalim U. Shah. Filling the gaps: Policy supports and interventions for scaling up renewable energy development in Small Island Developing States // Energy Policy. – 2016. – V. 98. – P. 653–662.
- Salas V., Olias E. Overview of the state of technique for PV inverters used in low voltage grid-connected PV systems: Inverters above 10 kW // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2008. – V. 15. – P. 1250–1257.
- «РАО ЕЭС Востока». URL: <http://www.rao-esv.ru/map> (дата обращения: 25.03.2017).
- «Сахаэнерго». URL: <http://saxaenergo.ru/> (дата обращения: 25.03.2017).
- «Саханефтегазбыт». URL: <http://www.sngs.ykt.ru> (дата обращения: 25.03.2017).
- Lujano-Rojas J.M., Dufo-López R., Bernal-Agustín J.L. Technical and economic effects of charge controller operation and coulombic efficiency on stand-alone hybrid power systems // Energy Conversion and Management. – 2014. – V. 86. – P. 709–716.
- Карамов Д.Н. Математическое моделирование автономной системы электроснабжения, использующей возобновляемые источники энергии // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2015. – Т. 104. – № 9. – С. 133–140.
- Карамов Д.Н. Влияние объектов агропромышленного комплекса, на результат комплексной оптимизации децентрализованных систем электроснабжения, использующих возобновляемые источники энергии // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. – 2015. – № 8. – С. 107–112.
- The Multiple Role of Energy Storage in the Industrial Sector: Evidence from a Greek Industrial Facility / D. Zafirakis, C. Elmasides, D.U. Sauer, M. Leuthold, G. Merei, J.K. Kaldellis, G. Vokas, K.J. Chalvatzis // Energy Procedia. – 2014. – V. 46. – P. 178–185.
- Sizing and simulation of a photovoltaic-wind energy system using batteries, applied for a small rural property located in the south of Brazil / C.E. Camargo Nogueira, M.L. Vidotto, R.K. Niedzialkoski, S.N. Melegari de Souza., L.I. Chaves, Th. Edwiges, D. Bentes dos Santos, I. Werncke // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2014. – V. 29. – P. 151–157.
- Multi-objective optimization minimizing cost and life cycle emissions of stand-alone PV–wind–diesel systems with batteries storage / R. Dufo-López, J.L. Bernal-Agustín, J.M. Yusta-Loyo,

- J.A. Domínguez-Navarro, I.J. Ramírez-Rosado, J. Lujano, I. Aso // *Applied Energy*. – 2011. – V. 88. – P. 4033–4041.
24. Dufo-Lopez R., Cristobal-Monreal I.R., Yusta J.M. Optimisation of PV-wind-diesel-battery stand-alone systems to minimise cost and maximise human development index and job creation // *Renewable Energy*. – 2016. – V. 94. – P. 280–293.
25. Dufo-López R. Optimisation of size and control of grid-connected storage under real time electricity pricing conditions // *Applied Energy*. – 2015. – V. 140. – P. 395–408.
26. Orhan Ekren, Banu Yetkin Ekren. Size optimization of a PV/wind hybrid energy conversion system with battery storage using response surface methodology // *Applied Energy*. – 2008. – V. 85. – P. 1086–1101.
27. Banu Yetkin Ekren, Orhan Ekren. Simulation based size optimization of a PV/wind hybrid energy conversion system with battery storage under various load and auxiliary energy conditions // *Applied Energy*. – 2009. – V. 86. – P. 1387–1394.
28. Orhan Ekren, Banu Yetkin Ekren. Size optimization of a PV/wind hybrid energy conversion system with battery storage using simulated annealing // *Applied Energy*. – 2010. – V. 87. – P. 592–598.
29. Ranjeva M., Kulkarni A.K. Design Optimization of a Hybrid, Small, Decentralized Power Plant for Remote/Rural Areas // *Energy Procedia*. – 2012. – V. 20. – P. 258–270.
30. Merei G., Berger C., Sauer D.U. Optimization of an off-grid hybrid PV-Wind-Diesel system with different battery technologies using genetic algorithm // *Solar Energy*. – 2013. – V. 97. – P. 460–473.
31. Current status of research on optimum sizing of stand-alone hybrid solar-wind power generation systems / Wei Zhou, Chengzhi Lou, Zhongshi Li, Lin Lu, Hongxing Yang // *Applied Energy*. – 2010. – V. 87. – P. 380–389.
32. Getachew Bekele, Gelma Boneya. Design of a Photovoltaic-Wind Hybrid Power Generation System for Ethiopian Remote Area // *Energy Procedia*. – 2012. – V. 14. – P. 1760–1765.
33. Marchenko O.V., Solomin S.V. Efficiency of wind energy utilization for electricity and heat supply in northern regions of Russia // *Renewable Energy*. – 2004. – V. 29. – P. 1793–1809.
34. Notton G., Diaf S., Stoyanov L. Hybrid Photovoltaic/Wind Energy Systems for Remote Locations // *Energy Procedia*. – 2011. – V. 6. – P. 666–677.
35. Methodology to Size an Optimal Stand-Alone PV/wind/diesel/battery System Minimizing the Levelized cost of Energy and the CO₂ Emissions / B.O. Bilal, V. Sambou, C.M.F. Kebe, P.A. Ndiaye, M. Ndongo // *Energy Procedia*. – 2014. – V. 195. – P. 1636–1647.
36. Modeling and optimization of hybrid wind-solar-powered reverse osmosis water desalination system in Saudi Arabia / E.M.A. Mokheimer., A.Z. Sahin., A. Al-Sharafi., A.I. Ali // *Energy Conversion and Management*. – 2013. – V. 75. – P. 86–97.
37. Deshmukh M.K., Deshmukh S.S. Modeling of hybrid renewable energy systems // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2008. – V. 12. – P. 235–249.
38. Wind potential assessment of Quebec Province / A. Pinca, E. McCarthy, J.-L. Chaumel, J.-L. Retiveau // *Renewable Energy*. – 2003. – V. 28. – P. 1881–1897.
39. Николаев В.Г., Ганага С.В., Кудряшов Ю.И. Национальный кадастр ветроэнергетических ресурсов России и методические основы их определения. – М.: Изд-во «Атмограф», 2008. – 584 с.
40. Cristóbal-Monreal I.R., Dufo-López R. Optimisation of photovoltaic-diesel-battery stand-alone systems minimising system weight // *Energy Conversion and Management*. – 2016. – V. 119. – P. 279–288.
41. Modeling and optimization of batteryless hybrid PV (photovoltaic) / Diesel systems for off-grid applications / D. Tsuanyo., Y. Azoumah., D. Aussel., P. Neveu // *Energy*. – 2015. – V. 86. – P. 152–163.
42. Lujano-Rojas J.M., Dufo-López R., Bernal-Agustín J.L. Probabilistic modelling and analysis of stand-alone hybrid power systems // *Energy*. – 2013. – V. 63. – P. 19–27.
43. Esfahani I.J., Yoo Ch.K. An optimization algorithm-based pinch analysis and GA for an off-grid batteryless photovoltaic-powered reverse osmosis desalination system // *Renewable Energy*. – 2016. – V. 91. – P. 233–248.
44. Sinha S., Chandel S.S. Prospects of solar photovoltaic-micro-wind based hybrid power systems in western Himalayan state of Himachal Pradesh in India // *Energy Conversion and Management*. – 2015. – V. 105. – P. 1340–1351.
45. Amit Kumar Yadav., Chandel S.S. Solar energy potential assessment of western Himalayan Indian state of Himachal Pradesh using J48 algorithm of WEKA in ANN based prediction model // *Renewable Energy*. – 2015. – V. 75. – P. 675–693.
46. Surface meteorology and Solar Energy. URL: <https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/sse.cgi?skip@larc.nasa.gov+s06#s06> (дата обращения: 25.03.2017).
47. Mahesh A., Sandhu K.S. Hybrid wind/photovoltaic energy system developments: Critical review and findings // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2015. – V. 52. – P. 1135–1147.
48. RP5.ru – Reliable Prognosis. URL: <http://rp5.ru> (дата обращения: 25.03.2017).
49. Sunrise/Sunset Algorithm. Almanac for Computers, 1990 published by Nautical Almanac Office United States Naval Observatory Washington, DC 20392. URL: http://www.edwilliams.org/sunrise_sunset_algorithm.htm (дата обращения: 25.03.2017).
50. Wong L.T., Chow W.K. Solar radiation model // *Applied Energy*. – 2001. – V. 69. – P. 191–224.
51. Vertical ozone-layer thickness. URL: <http://woudc.org> (дата обращения: 25.03.2017).
52. AERONET. AErosol RObotic NETwork. URL: <http://aeronet.gsfc.nasa.gov/> (дата обращения: 25.03.2017).
53. Parameterization of solar radiation from model and observations / K. Lengfield, A. Macke, U. Feister, J. Güldner // *Meteorologische Zeitschrift*. – 2010. – V. 19. – P. 25–33.
54. Kasten F., Czeplak G. Solar and terrestrial radiation dependent on the amount and type of cloud // *Solar Energy*. – 1980. – V. 24. – P. 177–189.
55. Global patterns in daytime cloud properties derived from GOME backscatter UV-VIS measurements / R. Loyola, W. Thomas, R. Spurr, B. Mayer // *International Journal of Remote Sensing*. – 2010. – V. 31. – P. 4295–4318.
56. Badescu V., Dumitrescu A. New models to compute solar global hourly irradiation from point cloudiness // *Energy Conversion and Management*. – 2013. – V. 67. – P. 75–91.
57. NASA SSE. URL: <https://eosweb.larc.nasa.gov/> (дата обращения: 25.03.2017).
58. Климатические данные для возобновляемой энергетики России (База климатических данных) / О.С. Попель, Е.С. Фрид, С.В. Киселева, Ю.Г. Коломиец, Н.В. Лисицкая. – М.: Изд-во МФТИ, 2010. – 56 с.

Поступила 24.05.2017 г.

Информация об авторах

Карамов Д.Н., кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории исследования энергетических установок № 71 отдела теплосиловых систем № 70 Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук.

UDC 620.9

MATHEMATICAL MODELING OF SOLAR RADIATION BASED ON OPEN ACCESS LONG-TERM METEOROLOGICAL OBSERVATION DATA

Dmitriy N. Karamov,
dmitriy.karamov@mail.ru.

Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Science,
130, Lermontov street, Irkutsk, Russia, 664033.

The relevance of the discussed issue is caused by increasing interest in employing renewable energy sources generators in autonomous energy systems of Siberia and Far East.

The main aim of the study is to demonstrate the appliance of long-term local meteorological observations for implementation in mathematical models of Iqbal and Kasten-Czeplak for modeling solar radiation over the arctic area of Siberia and Far East.

The methods used in the study. The paper uses well-studied mathematical model of solar radiation presented by Iqbal using mathematical models for cloudiness analysis submitted by Kasten-Czeplak. The open access long-term observations data obtained from different meteorological stations are used as input. The author applies the high-level programming language Matlab.

The results. The data obtained revealed the relationship of latitude standard deviation and solar radiation. Mathematical modeling of summary, direct and diffuse solar radiation within 12-years period for various localities was carried out. The author obtained the matrices of solar radiation with dimensions of 105120×3, developed the software complex for local analysis of environment parameters and solar radiation. The obtained results were analyzed and verified. It was shown that the results can be used in further studies.

Key words:

Renewable energy sources, solar radiation, meteorological series, cloud cover, Iqbal model, Kasten-Czeplak model.

REFERENCES

1. International Renewable Energy Agency (IRENA). *Renewable energy statistics 2016*. Available at: http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_RE_Statistics_2016.pdf (accessed 25 March 2017).
2. The European Wind Energy Association (EWEA). *Wind energy today*. Available at: <https://windeurope.org/about-wind/wind-energy-today> (accessed 25 March 2017).
3. *Solar power Europe. New global market outlook 2016–2020*. Available at: http://www.solarpowereurope.org/fileadmin/user_upload/documents/Events/SolarPower_Webinar_Global_Market_Outlook.pdf (accessed 25 March 2017).
4. *The Guardian*. *Slump in oil prices drives green energy take up in top exporting nations*. Available at: <https://www.theguardian.com/environment/2016/jan/20/slump-in-oil-prices-drives-green-energy-take-up-in-top-exporting-nations> (accessed 25 March 2017).
5. *The Guardian*. *Paris climate deal: nearly 200 nations sign in end of fossil fuel era*. Available at: <https://www.theguardian.com/environment/2015/dec/12/paris-climate-deal-200-nations-sign-finish-fossil-fuel-era> (accessed 25 March 2017).
6. *Communication from the commission to the European Parliament and the council. Energy Efficiency and its contribution to energy security and the 2030 Framework for climate and energy policy*. Available at: http://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/2014_energy_efficiency_communication.pdf (accessed 25 March 2017).
7. *Presidential Documents. Planning for Federal Sustainability in the Next Decade*. March 25, 2015. Part II. The President. Available at: <https://www.gpo.gov/fdsys/pkg/FR-2015-03-25/pdf/2015-07016.pdf> (accessed 25 March 2017).
8. *Energeticheskaya strategiya Rossii na period do 2035 goda* [Energy Strategy of Russia for the period up to 2035]. Available at: http://www.energystrategy.ru/ab_ins/source/ES-2035_09_2015.pdf (accessed 25 March 2017).
9. *Prognoz ministra energitiki RF o VIE* [The forecast of the Minister of Energy of the Russian Federation on RES]. Available at: <https://rg.ru/2016/06/06/razvitiu-alternativnoj-energetiki-vrf-nuzhen-stimul.html> (accessed 25 March 2017).
10. Pineda S., Bock A. Renewable-based generation expansion under a green certificate market. *Renewable Energy*, 2016, vol. 91, pp. 53–63.
11. *Law of the Republic of Belarus – about renewable energy* (December 27, 2010. N 204-3) Available at: <http://cis-legislation.com/document.fwx?rgn=32614> (accessed 25 March 2017).
12. Zamfir A., Colesca S.E., Corbos R.-A. Public policies to support the development of renewable energy in Romania: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, vol. 58, pp. 87–106.
13. Govinda R. Timilsina., Shah K.U. Filling the gaps: Policy supports and interventions for scaling up renewable energy development in Small Island Developing States. *Energy Policy*, 2016, vol. 98, pp. 653–662.
14. Salas V., Olias E. Overview of the state of technique for PV inverters used in low voltage grid-connected PV systems: Inverters above 10 kW. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2008, vol. 15, pp. 1250–1257.
15. «RAO EES Vostoka» [«RAO Energy Systems of the East»]. Available at: <http://www.rao-esv.ru/map> (accessed 25 March 2017).
16. «Sakhaenergo» [«Sakhaenergo»]. Available at: <http://sakhaenergo.ru/> (accessed 25 March 2017).
17. «Sahaneftegazsbyt» [«Sahaneftegazsbyt»]. Available at: <http://www.sngs.ykt.ru> (accessed 25 March 2017).
18. Lujano-Rojas J.M., Dufo-López R., Bernal-Agustín J.L. Technical and economic effects of charge controller operation and coulombic efficiency on stand-alone hybrid power systems. *Energy Conversion and Management*, 2014, vol. 86, pp. 709–716.
19. Karamov D.N. Mathematical modelling of an autonomous power supply system using renewable energy sources. *Bulletin of Irkutsk State Technical University*, 2015, vol. 104, no. 9, pp. 133–140. In Rus.
20. Karamov D.N. Agro-industrial complex facilities influence on the result of the complex optimization of the decentralized power supply systems using renewable energy sources. *The Bulletin of Krasnoyarsk Agrarian University*, 2015, no. 8, pp. 107–112. In Rus.
21. Zafirakis D., Elmasides C., Sauer D.U., Leuthold M., Merei G., Kaldellis J.K., Vokas G., Chalvatzis K.J. The Multiple Role of Energy Storage in the Industrial Sector: Evidence from a Greek Industrial Facility. *Energy Procedia*, 2014, vol. 46, pp. 178–185.
22. Camargo Nogueira C.E., Vidotto M.L., Niedzialkoski R.K., Melegari de Souza S.N., Chaves L.I., Edwiges Th., Bentes dos Santos D., Werncke I. Sizing and simulation of a photovoltaic-wind energy system using batteries, applied for a small rural property

- located in the south of Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, vol. 29, pp. 151–157.
23. Dufo-López R., Bernal-Agustín J.L., Yusta-Loyo J.M., Domínguez-Navarro J.A., Ramírez-Rosado I.J., Lujano J., Aso I. Multi-objective optimization minimizing cost and life cycle emissions of stand-alone PV-wind-diesel systems with batteries storage. *Applied Energy*, 2011, vol. 88, pp. 4033–4041.
 24. Dufo-Lopez R., Cristobal-Monreal I.R., Yusta J.M. Optimisation of PV-wind-diesel-battery stand-alone systems to minimise cost and maximise human development index and job creation. *Renewable Energy*, 2016, vol. 94, pp. 280–293.
 25. Dufo-López R. Optimisation of size and control of grid-connected storage under real time electricity pricing conditions. *Applied Energy*, 2015, vol. 140, pp. 395–408.
 26. Ekren O., Ekren B.Y. Size optimization of a PV/wind hybrid energy conversion system with battery storage using response surface methodology. *Applied Energy*, 2008, vol. 85, pp. 1086–1101.
 27. Ekren B.Y., Ekren O. Simulation based size optimization of a PV/wind hybrid energy conversion system with battery storage under various load and auxiliary energy conditions. *Applied Energy*, 2009, vol. 86, pp. 1387–1394.
 28. Ekren O., Ekren B.Y. Size optimization of a PV/wind hybrid energy conversion system with battery storage using simulated annealing. *Applied Energy*, 2010, vol. 87, pp. 592–598.
 29. Ranjeva M., Kulkarni A.K. Design Optimization of a Hybrid, Small, Decentralized Power Plant for Remote/Rural Areas. *Energy Procedia*, 2012, vol. 20, pp. 258–270.
 30. Merei G., Berger C., Sauer D.U. Optimization of an off-grid hybrid PV-Wind-Diesel system with different battery technologies using genetic algorithm. *Solar Energy*, 2013, vol. 97, pp. 460–473.
 31. Wei Zhou, Chengzhi Lou, Zhongshi Li, Lin Lu, Hongxing Yang. Current status of research on optimum sizing of stand-alone hybrid solar-wind power generation systems. *Applied Energy*, 2010, vol. 87, pp. 380–389.
 32. Bekele G., Boneya G. Design of a Photovoltaic-Wind Hybrid Power Generation System for Ethiopian Remote Area. *Energy Procedia*, 2012, vol. 14, pp. 1760–1765.
 33. Marchenko O.V., Solomin S.V. Efficiency of wind energy utilization for electricity and heat supply in northern regions of Russia. *Renewable Energy*, 2004, vol. 29, pp. 1793–1809.
 34. Notton G., Diaf S., Stoyanov L. Hybrid Photovoltaic/Wind Energy Systems for Remote Locations. *Energy Procedia*, 2011, vol. 6, pp. 666–677.
 35. Bilal B.O., Sambou V., Kebe C.M.F., Ndiaye P.A., Ndongo M. Methodology to Size an Optimal Stand-Alone PV/wind/diesel/battery System Minimizing the Levelized cost of Energy and the CO₂ Emissions. *Energy Procedia*, 2014, vol. 195, pp. 1636–1647.
 36. Mokheimer E.M.A., Sahin Ah.Z., Al-Sharafi A., Ali A.I. Modeling and optimization of hybrid wind-solar-powered reverse osmosis water desalination system in Saudi Arabia. *Energy Conversion and Management*, 2013, vol. 75, pp. 86–97.
 37. Deshmukh M.K., Deshmukh S.S. Modeling of hybrid renewable energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2008, vol. 12, pp. 235–249.
 38. Ilinca A., McCarthy E., Chaumel J-L., Retiveau J-L. Wind potential assessment of Quebec Province. *Renewable Energy*, 2003, vol. 28, pp. 1881–1897.
 39. Nikolaev V.G., Ganaga S.V., Kudryashov Yu.I. *Natsionalny kadastro vetronegeticheskikh resursov Rossii i metodicheskie osnovy ikh opredeleniya* [National cadaster of Russia wind energy resources and methodology for their determination]. Moscow, Atmosgraph Publ., 2008. 584 p.
 40. Cristóbal-Monreal I.R., Dufo-López R. Optimisation of photovoltaic-diesel-battery stand-alone systems minimising system weight. *Energy Conversion and Management*, 2016, vol. 119, pp. 279–288.
 41. Tsuanyo D., Azoumah Y., Aussel D., Neveu P. Modeling and optimization of batteryless hybrid PV (photovoltaic)/Diesel systems for off-grid applications. *Energy*, 2015, vol. 86, pp. 152–163.
 42. Lujano-Rojas J.M., Dufo-López R., Bernal-Agustín J.L. Probabilistic modelling and analysis of stand-alone hybrid power systems. *Energy*, 2013, vol. 63, pp. 19–27.
 43. Esfahani I.J., Yoo Ch.K. An optimization algorithm-based pinch analysis and GA for an off-grid batteryless photovoltaic-powered reverse osmosis desalination system. *Renewable Energy*, 2016, vol. 91, pp. 233–248.
 44. Sinha S., Chandel S.S. Prospects of solar photovoltaic-micro-wind based hybrid power systems in western Himalayan state of Himachal Pradesh in India. *Energy Conversion and Management*, 2015, vol. 105, pp. 1340–1351.
 45. Yadav A.K., Chandel S.S. Solar energy potential assessment of western Himalayan Indian state of Himachal Pradesh using J48 algorithm of WEKA in ANN based prediction model. *Renewable Energy*, 2015, vol. 75, pp. 675–693.
 46. *Surface meteorology and Solar Energy*. Available at: <https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/sse.cgi?skip@larc.nasa.gov+s06#s06> (accessed 25 March 2017).
 47. Aeidapu Mahesh, Kanwarjit Singh Sandhu. Hybrid wind/photovoltaic energy system developments: Critical review and findings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, vol. 52, pp. 1135–1147.
 48. *RP5.ru – Reliable Prognosis*. Available at: <http://rp5.ru> (accessed 25 March 2017).
 49. *Sunrise/Sunset Algorithm*. Almanac for Computers, 1990 published by Nautical Almanac Office United States Naval Observatory Washington, DC 20392. Available at: http://williams.best.vwh.net/sunrise_sunset_algorithm.htm (accessed 25 March 2017).
 50. Wong L.T., Chow W.K. Solar radiation model. *Applied Energy*, 2001, vol. 69, pp. 191–224.
 51. *Vertical ozone-layer thickness*. Available at: <http://woudc.org> (accessed 25 March 2017).
 52. *AERONET. Aerosol RObotic NETwork*. Available at: <http://aeronet.gsfc.nasa.gov/> (accessed 25 March 2017).
 53. Lengfield K., Macke A., Feister U., Güldner J. Parameterization of solar radiation from model and observations. *Meteorologische Zeitschrift*, 2010, vol. 19, pp. 25–33.
 54. Kasten F., Czeplak G. Solar and terrestrial radiation dependent on the amount and type of cloud. *Solar Energy*, 1980, vol. 24, pp. 177–189.
 55. Loyola R., Thomas W., Spurr R., Mayer B. Global patterns in daytime cloud properties derived from GOME backscatter UV-VIS measurements. *International Journal of Remote Sensing*, 2010, vol. 31, pp. 4295–4318.
 56. Badescu V., Dumitrescu A. New models to compute solar global hourly irradiation from point cloudiness. *Energy Conversion and Management*, 2013, vol. 67, pp. 75–91.
 57. *NASA SSE*. Available at: <https://eosweb.larc.nasa.gov/> (accessed 25 March 2017).
 58. Popel O.S., Frid E.S., Kiseleva S.V., Kolomiets Yu.G., Lisitskya N.V. *Klimaticheskie dannye dlya vozobnovlyayemoy energetiki Rossii (Baza klimaticheskikh dannykh)* [Climatic data for renewable energy in Russia (Climate Data Base)]. Moscow, MFTI Publ., 2010. 56 p.

Received: 24 May 2017.

Information about the authors

Dmitriy N. Karamov, Cand. Sc., researcher, Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Science.

УДК 621.311.25: 621.311.29

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ РЕЖИМОВ РАБОТЫ АВТОНОМНОЙ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ С УЧЕТОМ РЕАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Обухов Сергей Геннадьевич¹,
serob99@mail.ru

Плотников Игорь Александрович¹,
igorplt@tpu.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность. Огромный потенциал, экологическая чистота и доступность солнечной энергии обеспечивают стремительное развитие фотоэлектрической технологии преобразования энергии, которая находит практическое применение в самых разнообразных областях человеческой жизнедеятельности. Основной технической проблемой автономных энергетических систем с возобновляемыми источниками является необходимость согласования режимов производства и потребления энергии, что требует достоверного определения энергетического баланса с высокой временной дискретизацией. Нелинейность характеристик основных элементов фотоэлектрических станций, а также их ярко-выраженная зависимость от внешних факторов, многие из которых имеют стохастическую природу, определяет высокую сложность и актуальность задачи определения их энергетических характеристик в реальных условиях эксплуатации.

Цель исследования: разработка имитационной модели автономной фотоэлектрической станции, обеспечивающей моделирование ее рабочих режимов с учетом реальных условий эксплуатации.

Методы исследования: математическое и компьютерное моделирование с использованием программной среды MatLab/Simulink.

Результаты. Разработана имитационная модель автономной фотоэлектрической станции, состоящая из шести основных компонентов: модель прихода солнечной радиации, солнечная батарея, преобразователь постоянного напряжения (контроллер заряда), аккумуляторная батарея, инвертор, электрическая нагрузка. Все модели компонентов выполнены в виде отдельных подсистем в программной среде MatLab/Simulink, обладают свойством масштабирования, что позволяет проводить исследования фотоэлектрических систем произвольной конфигурации. Особенностью предложенной модели является учет влияния внешних климатических факторов на энергетические характеристики солнечной батареи, что обеспечивает повышение точности прогнозных расчетов в выработке электроэнергии.

Ключевые слова:

Автономная фотоэлектрическая станция, солнечная батарея, солнечная радиация, имитационная модель, MatLab, Simulink.

Введение

При использовании фотоэлектрических станций (ФЭС) в системах электроснабжения изолированных потребителей, в большинстве практических случаев, они работают в составе гибридных энергетических комплексов с несколькими генерирующими источниками соизмеримой мощности. При этом гибридные системы могут существенно различаться по составу источников энергии, структуре построения, способам управления режимами [1–3]. Важнейшей задачей проектирования гибридных систем с возобновляемыми энергетическими источниками является согласование режимов производства и потребления энергии, для чего требуется высокая дискретизация прогнозной выработки электрической энергии различными источниками: от среднесуточной до почасовой. Тщательный анализ энергетического баланса необходим для решения таких задач проектирования, как оптимизация соотношения установленных мощностей генерирующих источников, выбора параметров регулирующих устройств и настройки систем управления [4, 5].

Основная проблема достоверного определения энергетического баланса ФЭС заключается в том, что непосредственное влияние на него оказывают разнообразные факторы, многие из которых име-

ют стохастическую природу. Например, на энергетические характеристики фотоэлектрических преобразователей существенное влияние оказывает интенсивность солнечного излучения и температура окружающего воздуха. Величина солнечной радиации определяет величину фототока фотоэлектрических модулей (ФМ), а температура окружающей среды оказывает определяющее влияние на температуру поверхности солнечной батареи (СБ), от которой практически линейно зависит величина напряжения холостого хода ФМ [6–8].

Нелинейность характеристик основных элементов ФЭС, а также их зависимость от внешних факторов существенно усложняют решение обозначенной задачи, что вызывает необходимость применения методов математического моделирования.

Объект исследования и постановка задачи

Типичная схема построения автономной ФЭС представлена на рис. 1.

Основными элементами автономной ФЭС являются: СБ, состоящая из набора последовательно-параллельно соединенных ФМ; преобразователь постоянного напряжения, работающий под управлением контроллера поиска точки максимальной мощности; накопитель энергии на базе аккумуляла-



Рис. 1. Схема построения автономной фотоэлектрической станции

Fig. 1. Block diagram of the autonomous photovoltaic plant

торных батарей и выходной инвертор напряжения. Часто для повышения энергетической эффективности ФЭС ее дополнительно комплектуют системой слежения за Солнцем. В этом случае в состав ФЭС также будет входить блок управления солнечным трекером и исполнительный механизм следящей системы, построенный на базе двигателя с редукторами.

Необходимым условием построения комплексной модели электростанции является согласование моделей элементов в составе единой энергетической системы, что определяет выбор единого универсального инструмента моделирования. В настоящей работе модели всех компонентов электростанции реализованы в MatLab/Simulink в виде отдельных подсистем, что позволяет использовать их для исследования режимов ФЭС произвольной конфигурации.

При разработке математической модели ФЭС было учтено, что ее функционирование характеризуется большим разбросом скорости протекания процессов в отдельных элементах (подсистемах). Так, для полупроводниковых преобразователей постоянные времени составляют доли секунды, для аккумуляторной батареи – минуты, для электрической нагрузки – часы. Данное обстоятельство обуславливает, с одной стороны, проблемы построения и реализации адекватных математических моделей компонентов, с другой стороны, свидетельствует о возможности рассмотрения процессов в этих подсистемах отдельно. При этом взаимосвязь между отдельными подсистемами выражается в соотношениях между связующими параметрами и организуется на основе выходных характеристик или показателей, выявленных в результате моделирования подсистем.

В настоящей работе рассматриваются упрощенные модификации моделей компонентов гибридной системы, обеспечивающие отображение их основных энергетических характеристик. Данный класс моделей позволяет использовать численные методы решения с итерационным шагом порядка 1 сек, а следовательно, обеспечивается возможность исследования энергетических характеристик системы на длительных интервалах времени от десятков часов и суток.

Математические модели компонентов ФЭС

Модель солнечной радиации

Величина первичной солнечной энергии, которая доступна для преобразования ФЭС, определяется интенсивностью суммарного солнечного излучения в месте ее установки и зависит от географических координат месторасположения ФЭС, пространственной ориентации СБ, а также от внешних метеорологических факторов: температуры воздуха, уровня облачности, коэффициента отражения земной поверхности.

Большинство метеорологических факторов имеют стохастическую природу, а их колебания во времени содержат составляющие от долей секунды и, по меньшей мере, до нескольких десятилетий, что практически исключает возможность их достоверного определения теоретическими методами. В настоящее время при проектировании ФЭС преимущественное распространение получили вероятностные (статистические) методы расчета радиационных характеристик [9, 10], которые используют в качестве исходных данных специальные климатические справочники или электронные базы, составленные по результатам многолетних метеорологических наблюдений.

Суммарная солнечная радиация на произвольную ориентированную по углу наклона β и азимуту γ приемную поверхность рассчитывается по методике, предложенной В.У.Н. Liu, R.C. Jordan [11]:

$$I_{\text{сум}}^{\beta\gamma} = I_{\text{пр}}^{\beta\gamma} + I_{\text{расс}}^{\beta\gamma} + I_{\text{отр}}^{\beta\gamma} = I_{\text{пр}}^{\text{гор}} \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} + I_{\text{расс}}^{\text{гор}} \frac{1 + \cos \beta}{2} + \rho I_{\text{сум}}^{\text{гор}} \frac{1 - \cos \beta}{2}, \quad (1)$$

где $I_{\text{сум}}^{\beta\gamma}$, $I_{\text{пр}}^{\beta\gamma}$, $I_{\text{расс}}^{\beta\gamma}$, $I_{\text{отр}}^{\beta\gamma}$ – значения суммарной, прямой, рассеянной от облаков и аэрозолей и отраженной от земной поверхности радиации на наклонную поверхность, соответственно; $I_{\text{пр}}^{\text{гор}}$, $I_{\text{расс}}^{\text{гор}}$, $I_{\text{сум}}^{\text{гор}}$ – значения прямой, рассеянной и суммарной солнечной радиации, падающей на горизонтальную поверхность; θ – угол между направлением потока солнечного излучения к поверхности и нормалью к ней; θ_z – зенитный угол Солнца; ρ – альbedo земной поверхности.

Величина угла θ определяется из решения уравнения [12]:

$$\cos \theta = (A - B) \sin \delta + [C \sin \omega + (D + E) \cos \omega] \cos \delta. \quad (2)$$

Коэффициенты A , B , C , D , E вычисляются по формулам:

$$A = \sin \varphi \cos \beta; \quad B = \cos \varphi \sin \beta \cos \gamma;$$

$$C = \sin \beta \sin \gamma; \quad D = \cos \varphi \cos \beta; \quad E = \sin \varphi \sin \beta \cos \gamma,$$

где φ – широта местности в точке установки приемной площадки; δ – угол склонения Солнца; β – угол наклона приемной площадки к горизонтальной плоскости; γ – азимутальный угол установки приемной площадки (при направлении на Юг $\gamma=0^\circ$, при отклонении к Востоку γ считается положительным, при отклонении к Западу – отрицательным); ω – часовой угол Солнца.

Зенитный угол Солнца определяется по выражению:

$$\theta_z = \arccos[\sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega], \quad \text{град} \quad (3)$$

Угол высоты подъема Солнца над горизонтом h вычисляется по формуле:

$$h = 90^\circ - \theta_z. \quad (4)$$

Азимутальный угол положения Солнца Az является решением уравнения:

$$\cos Az = \frac{\sin h \sin \varphi - \sin \delta}{\cos h \cos \varphi}. \quad (5)$$

Часовой угол вычисляется по формуле:

$$\omega = 15(t - 12 - T_{\text{вб}} - \Delta T_{\text{UTC}}) + \psi, \quad \text{град} \quad (6)$$

где t – текущее официальное местное время, час; ΔT_{UTC} – разница между местным официальным временем и средним временем по Гринвичу, час; ψ – географическая долгота точки размещения приемной площадки, град.

Временная поправка на уравнение времени определяется по формуле:

$$T_{\text{вб}} = \frac{1}{60} [9,87 \sin(2B) - 7,53 \cos(B) - 1,5 \sin(B)], \quad \div \quad (7)$$

где $B=B_0(N-81)$, град.; $B_0=360/365$; N – номер календарного дня с начала года (для 01.01 – $N=1$, для 02.01 – $N=2$ и т. д.).

Угол склонения находится по формуле Купера [12]:

$$\delta = 23,45 \sin[B_0(N + 284)], \quad \text{град} \quad (8)$$

Углы восхода ω_{sr} и заката ω_{ss} Солнца по солнечному времени определяются из выражений:

$$\omega_{\text{sr}} = 0 - \arccos[-\text{tg} \varphi \text{tg} \delta];$$

$$\omega_{\text{ss}} = 0 + \arccos[-\text{tg} \varphi \text{tg} \delta]. \quad (9)$$

Для учета реальных характеристик солнечной радиации, приходящей на определенную территорию, при моделировании используются средние для заданного месяца значения индекса прозрачности атмосферы K_T , полученные из базы данных космического агентства США NASA SSE [13] за 22-летний период наблюдений с 1983 по 2004 гг. При этом считается, что индекс прозрачности для текущих суточных значений солнечной радиации равен его среднесуточному значению для данного месяца:

$$K_T = I_{\text{сум}}^{\text{гор}} / I_0, \quad (10)$$

где I_0 – внеатмосферная радиация на горизонтальную поверхность, которая определяется по формуле Спенсера [12]:

$$I_0 = I_{\text{sun}} [1 + 0,033 \cos(B_0 N)] \cos \theta_z, \quad (11)$$

где $I_{\text{sun}}=1367$ Вт/м² – солнечная постоянная.

Величина рассеянной радиации, приходящей на горизонтальную поверхность, определяется через диффузный коэффициент K_D , характеризующий долю рассеянной радиации в суммарном излучении:

$$K_D = I_{\text{расс}}^{\text{гор}} / I_{\text{сум}}^{\text{гор}}. \quad (12)$$

Для нахождения K_D используется методология NASA [13], по которой доля рассеянной радиации определяется из системы полиномиальных уравнений в функции от широты местности, индекса прозрачности, часового угла заката и полуденного угла высоты Солнца над горизонтом.

Модель выполнена в виде подсистемы, состоящей из 9 основных функциональных блоков, обеспечивающих решение системы уравнений (1)–(12): 1 – ввод данных, 2, 3 – расчет углов высоты и азимута (захода) Солнца, 4 – расчет солнечного времени восхода (захода) Солнца, 5 – расчет угла θ , 6 – расчет диффузного коэффициента, 7, 8 – расчет прямого и рассеянного солнечного излучения, 9 – расчет часового угла по местному официальному времени.

Возможность исследования быстродействующих процессов изменения солнечной радиации обеспечивается с помощью дополнительного блока имитации разорванной облачности, который может быть включен в модель опционально. Блок построен на базе стандартного генератора случайных чисел и передаточной функции из библиотеки Mat-Lab/Simulink.

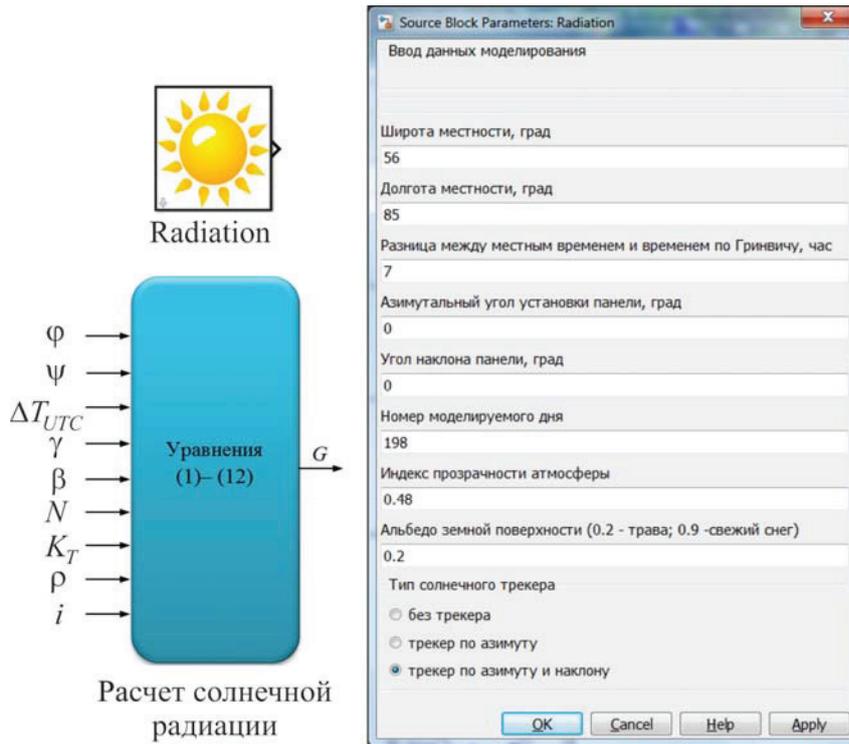


Рис. 2. Модель расчета солнечной радиации в MatLab/Simulink

Fig. 2. Model for calculating the solar radiation intensity in MatLab/Simulink

Блок-схема модели расчета солнечной радиации с окном ввода данных представлена на рис. 2.

Модель позволяет определять текущие значения величины приходящей солнечной радиации G для любого дня года в произвольном географическом месте размещения ФЭС на произвольно ориентированные поверхности, выполнить анализ эффективности применения солнечных трекеров различных типов, провести сравнительную оценку производительности ФЭС по сезонам года.

Для верификации модели использовались многолетние статистические характеристики суммарной солнечной радиации на горизонтальную поверхность для ряда населенных пунктов России, представленные в свободном доступе на сайте Мирового центра радиационных данных [14] по актинометрическим станциям, входящих в сеть Всемирной метеорологической организации (WMO). Проведенная серия расчетов показала, что модель прихода солнечной радиации обеспечивает адекватное отображение результатов по расчету солнечных энергетических ресурсов: средняя относительная погрешность модели не превышает 12 %, что вполне пригодно для выполнения инженерных расчетов.

Модель солнечной батареи

Для построения модели солнечной батареи использовалась методика, предложенная A.D. Jones, C.P. Underwood [15], согласно которой максимальная выходная мощность СБ определяется по выражению:

$$P_{PV} = C_{FF} N_{FM} \eta_{conv} G \ln(10^6 G) / T_{FM},$$

где N_{FM} – число ФМ в СБ; C_{FF} – постоянный коэффициент СБ; η_{conv} – КПД преобразователя с контроллером максимальной мощности; G – текущий уровень солнечной радиации, Вт/м²; T_{FM} – текущая температура ФМ.

В отличие от оригинальной методики [15], в настоящей работе для определения величины коэффициента C_{FF} использовалось более точное выражение:

$$C_{FF} = \frac{FFT_{ref}}{G_{ref}} \times \frac{[I_{SC} + k_I(T_{FM} - T_{ref})][V_{OC} + k_V(T_{FM} - T_{ref})]}{\ln(10^6 G_{ref})},$$

где FF – коэффициент заполнения вольт-амперной характеристики (ВАХ) ФМ; T_{ref} , G_{ref} – значения температуры и освещенности ФМ при стандартных условиях; k_I , k_V – температурные коэффициенты тока короткого замыкания и напряжения холостого хода ФМ, соответственно.

Коэффициент заполнения ВАХ ФМ определялся по данным их технической спецификации:

$$FF = I_{MPP} V_{MPP} / I_{SC} V_{OC},$$

где I_{MPP} , V_{MPP} – паспортные значения тока и напряжения ФМ в точке максимальной мощности при стандартных условиях; I_{SC} , V_{OC} – паспортные значения тока короткого замыкания и напряжения холостого хода ФМ при стандартных условиях.

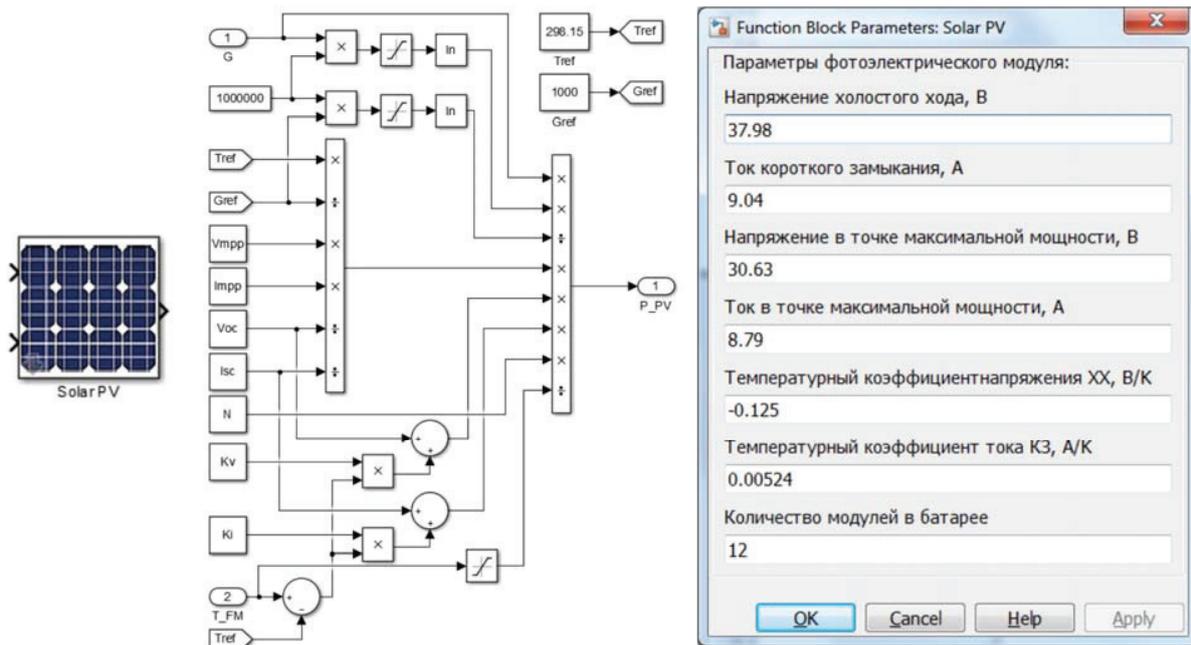


Рис. 3. Модель солнечной батареи в MatLab/Simulink

Fig. 3. Model of the solar battery in MatLab/Simulink

Модель СБ, реализованная в виде подсистемы в MatLab /Simulink, представлена на рис. 3.

Внутренние параметры модели СБ определяются данными технической спецификации ФМ и их количеством, входными переменными модели являются текущие значения величины солнечной радиации G и температуры поверхности ФМ T_{FM} , единственная выходная переменная определяет максимальную активную мощность P_{PV} , которую можно снять с СБ в текущих условиях эксплуатации.

Для верификации предложенной модели СБ использовалась модель фотоэлектрического преобразователя, представленная в работе [16], и данные технической спецификации ряда ФМ моно- и поликристаллического типов.

Модель показала хорошее соответствие результатов расчетов с данными изготовителей, что обеспечивает высокую точность имитации в окрестностях точки максимальной мощности. Это позволяет использовать модель СБ для разработки эффективных алгоритмов контроллеров ФЭС, совершенствования схемотехники преобразовательных устройств, прогнозирования выработки электроэнергии, анализа рабочих режимов фотоэлектрических систем.

Модель суточного хода температуры воздуха

Доминирующее влияние на энергетические характеристики фотоэлектрических преобразователей оказывает величина электрической нагрузки, интенсивность солнечного излучения, температура окружающей среды и скорость ветра.

Для ФЭС, расположенных в высоких северных широтах, к которым относятся большинство территорий России, внешние метеорологические факторы могут оказывать существенное влияние на производительность СБ, и их желательно учитывать. Наиболее просто определяются среднемесячные и среднесуточные значения температуры окружающего воздуха и скорости ветра, которые являются независимыми величинами от параметров проектируемой электроустановки. Исходными данными для их определения являются статистические данные метеорологических наблюдений, которые можно получить из архивов метеорологических сайтов [17, 18].

Необходимо отметить, что в отличие от скорости ветра, изменения температуры в северных широтах имеют явно-выраженный суточный ход, для определения которого можно использовать выражение:

$$T(t) = \bar{T} + 0,5\Delta T \cos[2\pi(t_{\text{мест}} - t_{\text{max}})/t_{\text{пер}}],$$

где \bar{T} – среднесуточная температура воздуха, °С; ΔT – суточная амплитуда температуры воздуха, °С; $t_{\text{пер}}$ – период изменения температуры воздуха, ч; t_{max} – местное время максимума температуры, ч; $t_{\text{мест}}$ – локальное (местное) солнечное время, ч.

Модель суточного хода температуры применима для любого дня года и любого населенного пункта с использованием статистических данных метеонаблюдений близлежащей метеостанции. Модель реализована в виде подсистемы и позволяет всего по 3 входным параметрам получить временную зависимость вариации температуры воздуха для рассматриваемого дня года, рис. 4.

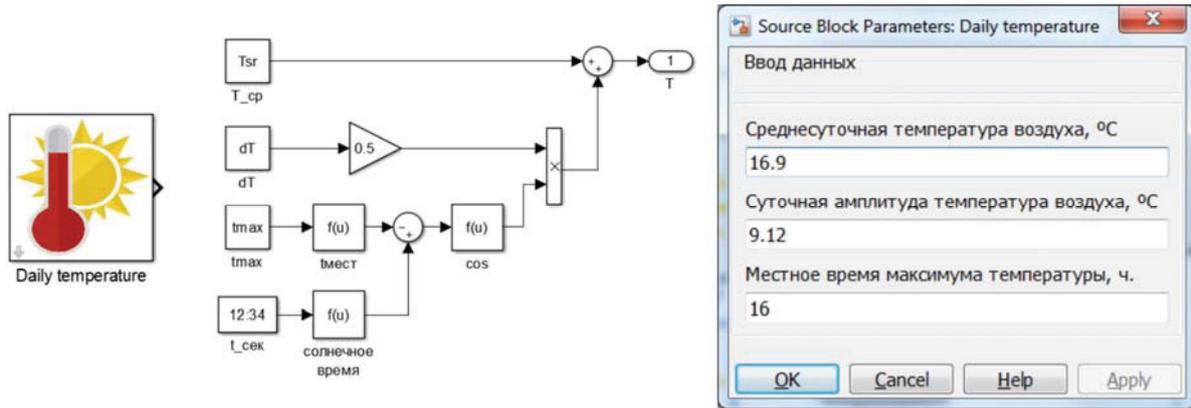


Рис. 4. Модель суточного хода температуры в MatLab/Simulink

Fig. 4. Model of the diurnal temperature variation in MatLab/Simulink

Модель температуры поверхности фотоэлектрического модуля

Кроме окружающего воздуха на температурный режим ФМ оказывают непосредственное влияние: энергия излучения, поступающая на поверхность ФМ вместе с солнечными лучами, и внутренние источники теплоты, образующиеся за счет электрических потерь в солнечных элементах и контактных сопротивлениях. Рабочая температура ФМ при эксплуатации устанавливается в результате теплообмена его поверхности с окружающей средой, имеющего конвективно-лучистый характер. Определение текущей температуры ФМ теоретическими методами практически невозможно из-за влияния на процесс множества самых разнообразных факторов: коэффициентов теплоотдачи и поглощения излучения материалов модуля, силы и направления ветра, соотношения площадей лицевой и тыльной поверхностей модуля и т. п. Результаты эксплуатации ФЭС показывают, что превышение температуры ФМ над температурой внешней среды при высоких значениях солнечной инсоляции может достигать 30 °С, поэтому учет реальной температуры ФМ в эксплуатацион-

ных условиях является обязательным. В связи со сложностью теоретического определения температуры ФМ используются эмпирические зависимости, полученные в реальных условиях эксплуатации ФЭС [19–21], адаптированные к определенным климатическим условиям.

В результате обработки экспериментальных данных, полученных в условиях эксплуатации кремниевых ФМ в Сибири, определена аппроксимирующая зависимость превышения температуры поверхности ФМ от величины солнечного излучения G и средней скорости ветра V , реализованная в MatLab/Simulink (рис. 5):

$$\Delta T_{FM} = 0,0283G - 0,0058GV + 0,0005GV^2, \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Вследствие инерции тепловых процессов температура ФМ не может изменяться мгновенно, поэтому в состав модели включено инерционное звено, реализованное на базе стандартного блока передаточной функции.

Модель аккумуляторной батареи

Для моделирования аккумуляторной батареи (АБ) использован метод, предложенный Olivier

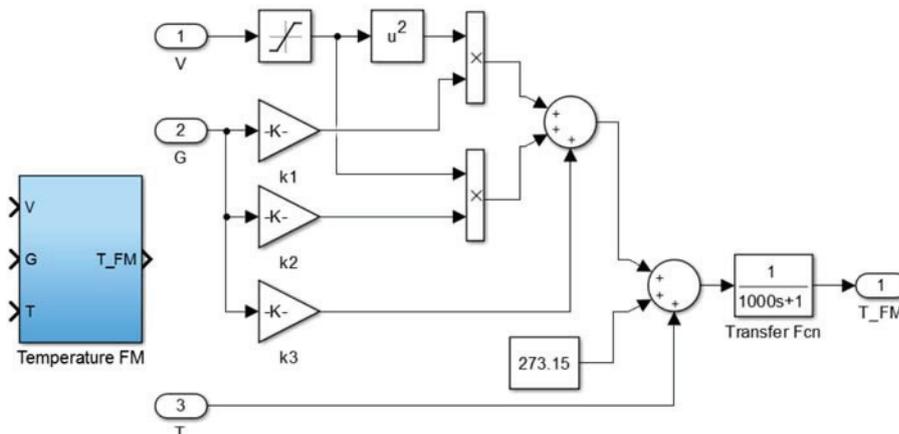


Рис. 5. Модель расчета температуры фотоэлектрических модулей в MatLab/Simulink

Fig. 5. Model for calculating the photovoltaic module temperature in MatLab/Simulink

Tremblay и Louis-A. Dessaint [22, 23]. Модель АБ основана на обобщенном соотношении Шефферда и задается уравнением:

$$V_{\text{batt}} = E_0 - Ri - \frac{KQ}{(Q - \int idt)} + A \exp(-B \int idt), \quad (13)$$

где $\int idt$ – фактический уровень заряда АБ (А·ч); R – внутреннее сопротивление АБ (Ом); V_{batt} – напряжение АБ (В); i – ток батареи (А); A, B – коэффициенты, характеризующие величину падения напряжения во время экспоненциальной зоны разряда (В) и обратную величину емкости АБ в конце экспоненциальной зоны разряда (А·ч)⁻¹; K – поляризационное сопротивление (Ом).

Модель Шефферда [24] содержит нелинейный член, характеризующий величину напряжения (поляризационное напряжение), зависящего от амплитуды тока и фактического состояния заряда АБ. В реальной АБ в режиме холостого хода ее напряжение возрастает практически до ЭДС холостого хода E_0 , а при появлении разрядного тока напряжение резко падает. Наличие нелинейного члена в уравнении позволяет найти реальный ток разряда АБ, однако при численном решении это приводит к алгебраическому циклу и делает модель неустойчивой.

В используемой модели АБ (13) величина напряжения однозначно определяется значениями разрядного тока и фактическим уровнем заряда батареи SOC , чем обеспечиваются достаточно точные результаты моделирования режимов разряда и заряда АБ различных типов, в том числе и используемых в энергетических системах с возобновляемыми источниками энергии: никель-кадмиевых, свинцово-кислотных и литий-ионных.

На рис. 6 используются следующие обозначения: E_{full} – напряжение полностью заряженной АБ (В); E_{exp} – напряжение АБ в конце экспоненциальной зоны разряда (В); E_{nom} – номинальное напряжение АБ (В); Q_{exp} – емкость АБ в конце экспоненциальной зоны разряда (А·ч); Q_{end} – остаточная емкость АБ при номинальном напряжении (А·ч).

Параметры уравнения (13) определяются по разрядной характеристике АБ, заданной производителем, а их физический смысл виден из рис. 6.

Параметры уравнения (13) определяются по разрядной характеристике АБ, заданной производителем, а их физический смысл виден из рис. 6.

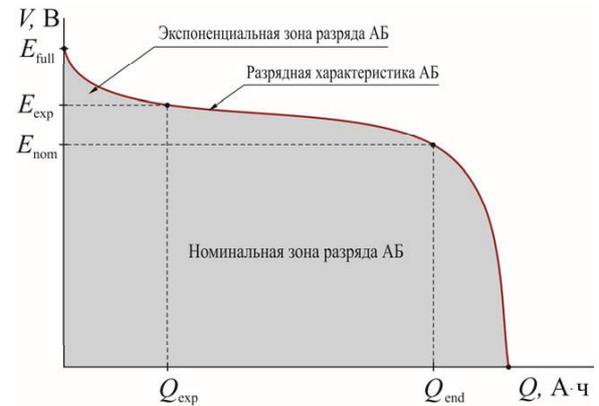


Рис. 6. Типовая разрядная характеристика АБ

Fig. 6. Typical discharge characteristics of AB

В среде Simulink АБ моделируется с помощью управляемого источника напряжения, включенного последовательно с постоянным сопротивлением, рис. 7.

Модель выполнена в виде отдельной подсистемы с возможностью ввода основных параметров через диалоговое окно, что позволяет легко ее модифицировать и использовать для исследования характеристик АБ различных типов, а также для построения моделей банка АБ и фотоэлектрических систем произвольной конфигурации на их основе.

Модели преобразователей

В принятой схеме построения ФЭС (рис. 1) используются два типа силовых полупроводниковых преобразователей: преобразователь постоянного напряжения и выходной инвертор.

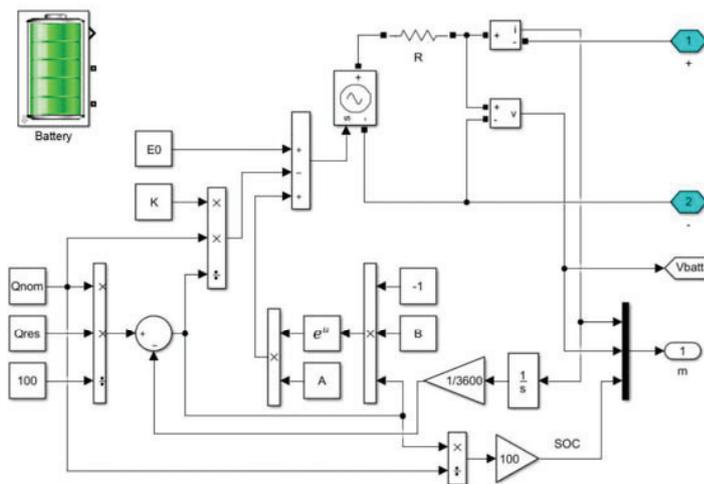
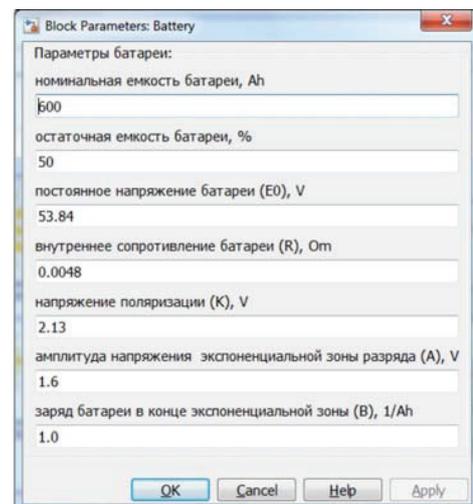


Рис. 7. Компьютерная реализация модели АБ в MatLab/Simulink

Fig. 7. Computer implementation of AB model in MatLab/Simulink



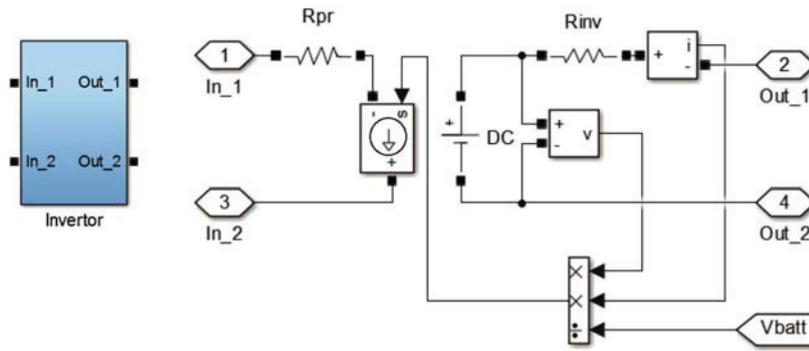


Рис. 8. Упрощенная модель инвертора в MatLab/Simulink

Fig. 8. Simplified model of the inverter in MatLab/Simulink

Для исследования энергетических характеристик ФЭС построены «упрощенные» энергетические модели преобразователей на базе идеальных источников тока и напряжения. На рис. 8 представлена модель выходного инвертора.

Идеальный источник постоянного напряжения DC подключен к силовым выводам (Out1, Out2) через последовательное активное сопротивление R_{inv} , обеспечивающее учет внутренних потерь в инверторе. Измерительные трансформаторы тока и напряжения в выходной цепи инвертора обеспечивают расчет потребляемой нагрузкой активной мощности и вычисления текущих значений тока, который будет сниматься с зажимов АБ. Для учета потерь в соединительном кабеле от АБ во входную цепь инвертора включено активное сопротивление R_{pr} .

Аналогичным образом построена модель преобразователя постоянного напряжения. Вычислительные тесты моделей преобразователей подтвердили их работоспособность в пределах возможного диапазона изменения входных и выходных параметров.

Модель электрической нагрузки

Для моделирования электрической нагрузки использовалась вероятностно-статистическая модель, задаваемая выражением:

$$P_{pi} = \bar{P}_i + \beta\sigma(P_i),$$

где P_{pi} , \bar{P}_i – расчетная активная нагрузка и математическое ожидание нагрузки на i -м часе суточного графика; β – коэффициент надежности расчета, который определяет вероятность, с которой случайные значения нагрузки останутся меньше принятого расчетного значения P_{pi} ; $\sigma(P_i)$ – среднеквадратичное отклонение для i -й ступени суточного графика.

В расчетах принят нормальный закон распределения нагрузок, в соответствии с которым при $\beta=3$ вероятность превышения расчетной нагрузки составляет 99,87 %.

Базовой моделью электрической нагрузки служил типовой график активной нагрузки сельских жилых домов, типичный для автономных потребителей [25, 26].

Компьютерная модель нагрузки построена на базе управляемого источника тока (рис. 9), входным параметром модели служила величина выходного напряжения инвертора, выходными параметрами являлись ток и напряжение на сборных шинах потребителя электроэнергии. Суточный график активной мощности задавался с помощью стандартного блока библиотеки Simulink Signal Builder.

Для контроля выходных электрических параметров ФЭС в схему модели включен измерительный порт m , обеспечивающий измерение текущих действующих значений тока, напряжения и активной мощности.

Модель фотоэлектрической станции

Разработанная имитационная модель ФЭС с накопителем энергии состоит из шести основных компонентов: модель прихода солнечной радиации, СБ, преобразователь постоянного напряжения (контроллер заряда), АБ, инвертор, электрическая нагрузка. Все модели компонентов выполнены в виде отдельных подсистем в программной среде MatLab/Simulink, обладают свойством масштабирования.

Компьютерная реализация модели ФЭС с контрольно-измерительными приборами представлена на рис. 10. Она была тщательно протестирована серией расчетов, которые подтвердили ее работоспособность и адекватность.

Результаты моделирования

Опишем результаты применения предложенной имитационной модели для анализа рабочих режимов ФЭС, территориально расположенной в г. Томске (географические координаты 56° с.ш., 85° в.д.) для характерного летнего (21 июня) дня года.

В качестве объекта анализа принята схема ФЭС в минимальной конфигурации. В ее состав входит СБ, состоящая из 12 фотоэлектрических модулей поликристаллического типа JAP6-60-260 [27], номинальной мощностью 260 Вт, соединенных в массив из 3 параллельных цепочек по 4 модуля в каждой. АБ построена на базе 12 гелевых свинцо-

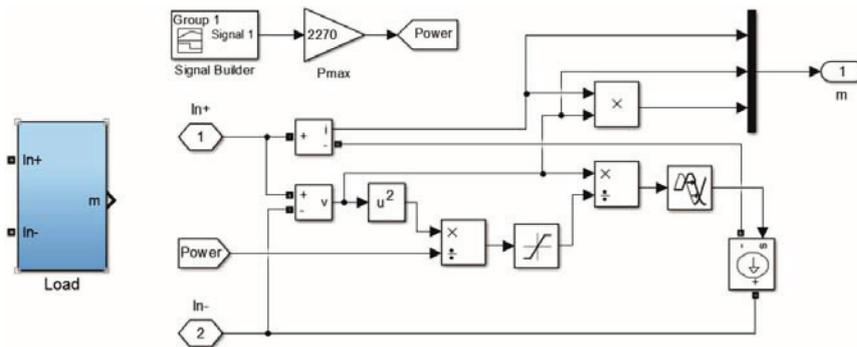


Рис. 9. Компьютерная модель электрической нагрузки

Fig. 9. Computer model of the electrical load

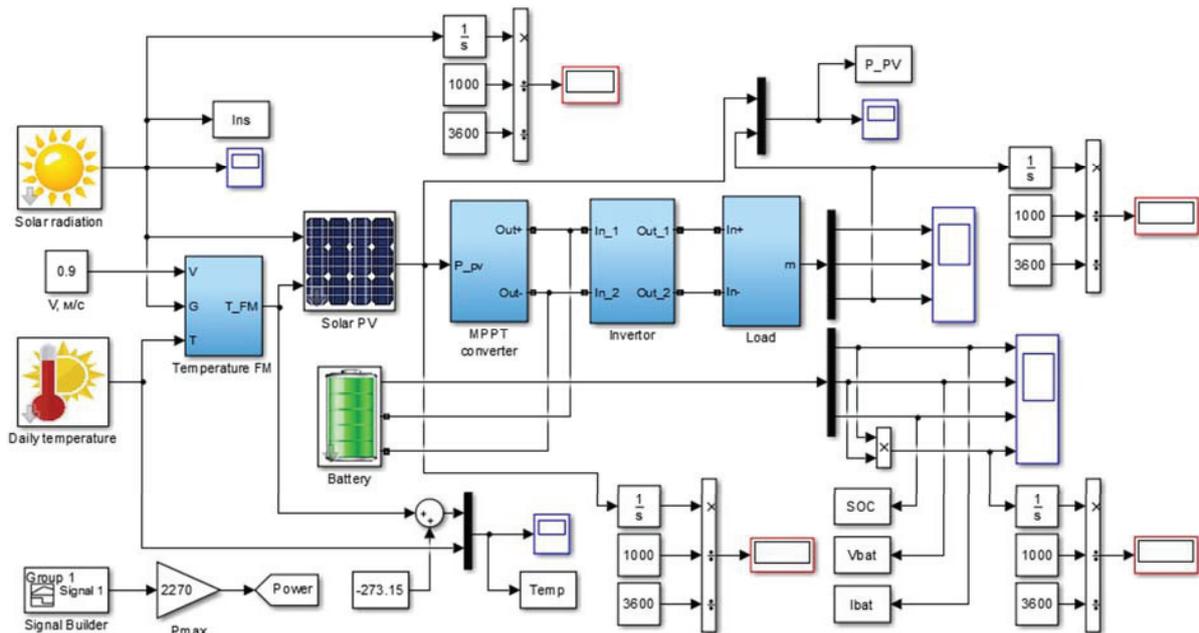


Рис. 10. Модель ФЭС в MatLab/Simulink

Fig. 10. Model of the photovoltaic plant in MatLab/Simulink

во-кислотных аккумуляторов Delta GX 12–200 [28]. Величина номинального напряжения АБ принята равной $U_{ном}=48$ В, что определяет вид ее электрической схемы: 3 параллельные ветви с 4 последовательно соединенными аккумуляторами. В рассматриваемой ФЭС обеспечивается автоматическая ориентация СБ на Солнце по азимуту и углу наклона.

Исходными данными моделирования являлись метеорологические сводки для г. Томска, полученные по результатам многолетних наблюдений. При выполнении расчетов приняты средние значения температуры окружающего воздуха и скорости ветра, полученные в результате обработки статистических данных за 2005–2016 гг. по метеостанции № 29430 г. Томска, представленные в свободном доступе на сайте «Расписание погоды» [17]. Средние значения альbedo земной поверхности определены по данным научно-прикладного справочника по климату СССР [29].

Для рассматриваемого дня года среднесуточная температура воздуха составила $16,9$ °С, амплитуда суточного хода температуры – $9,1$ °С, средняя скорость ветра – $0,9$ м/с, местное время максимума температуры – 16 часов дня, альbedo земной поверхности – $0,22$.

На рис. 11 приведены расчетные временные графики режимных параметров ФЭС для рассматриваемого дня. На графиках слева представлены суточные изменения величины суммарной солнечной радиации G , приходящей на единичную, ориентированную на Солнце, приемную поверхность в условиях облачного неба, температуры воздуха T_{air} и поверхности ФМ T_{FM} , активной мощности, генерируемой СБ P_{PV} , и потребляемой нагрузкой P_{load} . На графиках справа представлены текущие значения параметров АБ: ток I_{batt} , напряжение V_{batt} и уровень заряда SOC.

Анализ результатов моделирования позволил провести детальную оценку энергетического баланса ФЭС.

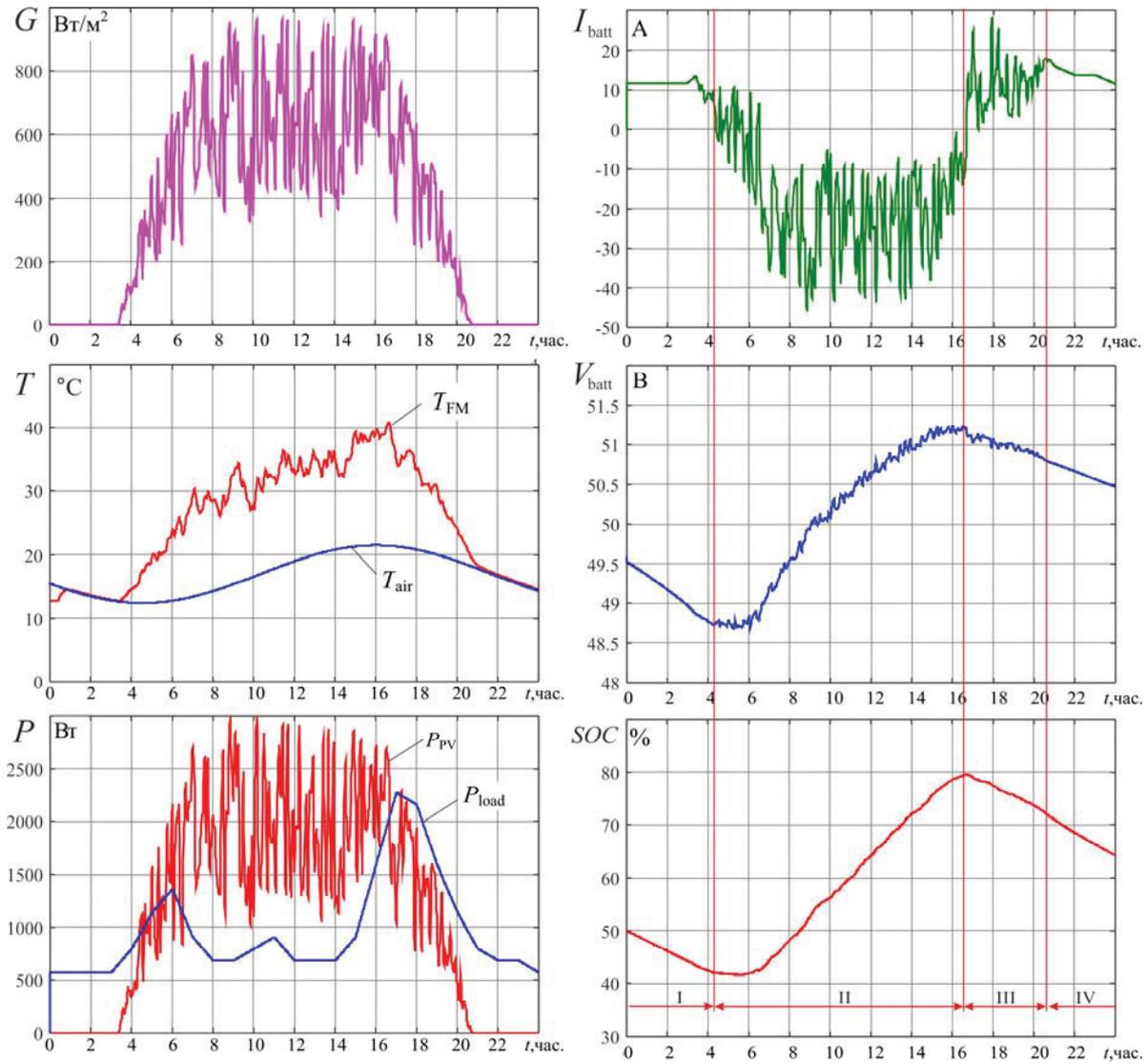


Рис. 11. Расчетные временные графики режимных параметров ФЭС в характерный летний день года

Fig. 11. Estimated temporal diagrams of the FES operating parameters on a typical summer day

Общее количество энергии, которая может быть сгенерирована СБ за сутки (без учета температурного дрейфа вольт-амперных характеристик ФМ), найдено через расчетные значения солнечной радиации $G(t)$ и данные технической спецификации, используемых ФМ JAP6-60-260 [27]:

$$W_{PV} = \eta_{FM} S_{FM} N_{FM} \int_0^{24} G(t) dt = 31,9 \text{ кВт} \cdot \text{ч},$$

где $\eta_{FM}=0,159$ – КПД фотоэлектрического модуля; $S=1,63 \text{ м}^2$ – площадь ФМ; $N_{FM}=12$ – количество ФМ в солнечной батарее.

Для рассматриваемого дня года расчетная суточная выработка электрической энергии СБ составила $31,9 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$, что превысило суточную зимнюю выработку более чем в 4 раза. Максимально возможное количество энергии, которую может получить потребитель от данной ФЭС за сутки в рассматриваемый день:

$$W_{load} = W_{PV} \eta_1 \eta_2 \eta_3 = 31,9 \cdot 0,95 \cdot 0,85 \cdot 0,9 = 23,2 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

В расчетах приняты средние значения КПД преобразовательных устройств – контроллера заряда $\eta_1=0,95$, аккумуляторов – $\eta_2=0,85$, инвертора – $\eta_3=0,9$.

Средняя мощность нагрузки объекта электропитания составила:

$$P_{\text{нб}} = W_{load} / 24 = 23200 / 24 = 970 \text{ Вт.}$$

Для типового графика электрических нагрузок децентрализованного потребителя максимальная суточная нагрузка равна:

$$P_{max} = K_m P_{\text{нб}} = 2,34 \cdot 970 = 2270 \text{ Вт,}$$

где $K_m=2,34$ – коэффициент максимума нагрузки.

В выполненных расчетах принят типовый суточный график нагрузок децентрализованных потребителей с максимальной нагрузкой $P_{max}=2270 \text{ Вт}$.

Результаты моделирования хорошо отображают характер физических температурных процессов при эксплуатации ФЭС. Из рис. 11 видно, что в часы суток, когда отсутствует поступление солнечной радиации на поверхность Земли, T_{FM} равна температуре окружающей среды, при освещении СБ ее температура увеличивается, причем тем больше, чем сильнее интенсивность поступающего солнечного излучения. Максимальное значение T_{FM} достигается около 16 часов дня, при этом превышение T_{FM} над температурой окружающего воздуха доходит до 19°C .

Из представленных на рис. 11 графиков видно, что при принятом соотношении мощностей обеспечивается полное покрытие потребляемой энергии, энергией, генерируемой СБ. Однако для бесперебойного обеспечения потребителя электрической энергией в данных условиях необходимо, чтобы уменьшение емкости АБ в темное время суток успевало восполниться за время светового дня, для чего был проведен тщательный анализ энергетических процессов в АБ. Для удобства анализа на правых графиках (рис. 11) выделены 4 характерные режимные зоны работы ФЭС: зоны I и IV соответствуют режимам питания потребителя от АБ, в зоне II генерируемой мощности СБ достаточно для полного покрытия электрической нагрузки потребителя и заряда АБ, в зоне III нагрузка частично покрывается за счет СБ, и частично за счет АБ. Для реализации данного режима выходной инвертор ФЭС должен уметь «подмешивать» энергию из АБ к энергии, снимаемой с зажимов СБ.

Остаточная емкость АБ на начало суток принята равной $\text{SOC}=50\%$. За время работы I зоны уровень заряда АБ уменьшается до 42% . Во время заряда АБ (II зона) их остаточная емкость увеличивается с 42 до 80% , максимальный ток заряда не превышает 45 А , что меньше допустимого тока в 60 А для трех параллельных цепочек по 4 последовательных аккумулятора в каждой. За время работы в III и IV зонах уровень заряда АБ уменьшается до 65% , что больше первоначально заданного, и свидетельствует о том, что энергия, затраченная АБ на питание нагрузок потребителя, успевает полностью восполниться за сутки.

Результаты моделирования свидетельствуют о том, что для принятых условий эксплуатации данная конфигурация ФЭС обеспечивает бесперебойное электроснабжение потребителя с максимальной расчетной нагрузкой 2270 Вт , и при условии

допустимого 50% -го разряда АБ обеспечивается 12-ти часовое резервирование потребляемой мощности.

Аналогичные расчеты, выполненные для других характерных дней года, позволили выбрать тип и согласовать установленную мощность основного оборудования ФЭС и нагрузки, что обеспечило гарантированное электроснабжение потребителем электрической энергией.

Заключение

Разработана оригинальная имитационная модель ФЭС, обеспечивающая исследование ее рабочих режимов в реальных условиях эксплуатации. В ней учтено влияние внешних климатических факторов на энергетические характеристики солнечной батареи, что повышает точность прогнозных расчетов в выработке электроэнергии для рассматриваемого региона.

Исходными данными моделирования являются широта и долгота местности, среднесуточная скорость ветра в месте установки ФЭС, индекс прозрачности атмосферы, альbedo земной поверхности, номер дня года, азимутальный и вертикальный углы установки СБ, тип солнечного трекера, среднесуточная температура воздуха и ее суточная амплитуда, местное время максимума температуры, технические характеристики ФМ.

В процессе моделирования рассчитываются временные тренды интенсивности солнечной радиации, суточная вариация температуры воздуха, текущая температура поверхности фотоэлектрических модулей и их энергетические характеристики: ток короткого замыкания, напряжение холостого хода, коэффициент заполнения ВАХ и выходная электрическая мощность.

Полученные при моделировании режимов ФЭС результаты обеспечивают возможность аргументированного выбора рационального режима эксплуатации электростанции (круглогодичный или сезонный), требуемой емкости накопительных устройств, установленной мощности и номинального напряжения солнечной батареи, тип солнечного трекера, сечений проводников и мощности преобразователей, а также определения эффективных алгоритмов управления энергетическим комплексом.

Работа выполнена при финансовой поддержке министерства образования и науки Российской Федерации (контракт № 02.G25.31.0190).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chauhan A., Saini R.P. A review on Integrated Renewable Energy System based power generation for stand-alone applications: Configurations, storage options, sizing methodologies and control // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2014. – V. 38. – P. 99–120.
2. Shivarama K.K., Sathish K.K. A review on hybrid renewable energy systems // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2015. – V. 52. – P. 907–916.
3. Badwawi R.A., Abusara M., Mallick T. A Review of Hybrid Solar PV and Wind Energy System // *Smart Science*. – 2015. – V. 3 (3). – P. 127–138.
4. Kusakana K., Vermaak H.J. Hybrid diesel generator/renewable energy system performance Modeling // *Renewable Energy*. – 2014. – V. 67. – P. 97–102.
5. Upadhyay S., Sharma M.P. A review on configurations, control and sizing methodologies of hybrid energy systems // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2014. – V. 38. – P. 47–63.
6. Handbook of photovoltaic science and engineering / ed. by A. Luque, S. Hegedus. – Southern Gate, Chichester England, John Wiley & Sons Ltd, 2003. – 1179 p.
7. Practical handbook of photovoltaics: Fundamentals and applications / ed. by T. Markvart, L. Castafier. – Hoboken: John Wiley & Sons Inc., 2012. – 1244 p.
8. Обухов С.Г., Плотников И.А. Модель солнечной панели в MATLAB SIMULINK // *Альтернативная энергетика и экология: Международный научный журнал*. – 2014. – № 21 (161). – С. 51–59.
9. Солнечная энергетика / В.И., Виссарионов Г.В. Дерюгина, В.А. Кузнецова, Н.К. Калинин / под ред. В.И. Виссарионова. 2-е изд., стер. – М.: ИД МЭИ, 2011. – 276 с.
10. Климатические данные для возобновляемой энергетики России (база климатических данных) / О.С. Попель, С.Е. Фрид, С.В. Киселева, Ю.Г. Коломиец, Н.В. Лисицкая. – М.: Изд-во МФТИ, 2009. – 56 с.
11. Liu B.Y.H., Jordan R.C. Daily insolation on surfaces tilted towards the equator // *ASHRAE Journal*. – 1961. – V. 3. – P. 53–59.
12. Duffie J.A., Beckman W.A. *Solar Engineering of Thermal Processes*. fourth edition. – Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2013. – 910 p.
13. The NASA Surface Meteorology and Solar Energy Data Set. URL: <http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/> (дата обращения: 14.03.2017).
14. World Radiation Data Centre. URL: <http://wrdc.mgo.rssi.ru/> (дата обращения: 14.03.2017).
15. Jones A.D., Underwood C.P. A thermal model for photovoltaic systems // *Solar Energy*. – 2001. – V. 70 (4). – P. 349–359.
16. Obukhov S.G., Plotnikov I.A., Kryuchkova M. Simulation of Electrical Characteristics of a Solar Panel // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2016. – V. 132: *Modern Technologies for Non-Destructive Testing*. – 012017. – 6 p.
17. Расписание погоды. URL: <http://www.rp5.ru/> (дата обращения: 14.03.2017).
18. Погода России. Архив погоды. URL: <http://meteo.infospa.ru/> (дата обращения: 14.03.2017).
19. Al Riza D.F., Haq Gilani S.I., Aris M.S. Hourly Solar Radiation Estimation Using Ambient Temperature and Relative Humidity Data // *International Journal of Environmental Science and Development*. – 2011. – V. 2 (3). – P. 188–193.
20. Meyer E.L., van Dyk E.E. Development of energy model based on total daily irradiation and maximum ambient temperature // *Renewable Energy*. – 2000. – V. 21 (1). – P. 37–47.
21. Muzathik A.M. Photovoltaic Modules Operating Temperature Estimation Using a Simple Correlation // *International Journal of Energy Engineering*. – 2014. – V. 4(4). – P. 151–158.
22. Tremblay O., Dessaint, L.-A., Dekkiche, A.-I. A Generic Battery Model for the Dynamic Simulation of Hybrid Electric Vehicles / *Vehicle Power and Propulsion Conference*. VPPC 2007. – P. 284–289.
23. Tremblay O., Dessaint L.-A. Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications // *World Electric Vehicle Journal*. – 2009. – V. 3. – P. 1–10.
24. Shepherd 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.
25. РД 34.20.178. Руководящие материалы по проектированию электроснабжения сельского хозяйства / Методические указания по расчету электрических нагрузок в сетях 0,38–110 кВ сельскохозяйственного назначения. – М.: Всесоюзный государственный проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт «Сельэнергопроект», 1985.
26. Обухов С.Г., Хошнау З.П. Прогнозирование режимов потребления электрической энергии автономными энергетическими системами // *Электрические станции*. – 2012. – № 11. – С. 43–47.
27. JA SOLAR. URL: <http://www.jasolar.com/> (дата обращения: 14.03.2017).
28. Delta. URL: <http://www.delta-batt.com/> (дата обращения: 14.03.2017).
29. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 3. Многолетние данные. Выпуск 20. – СПб.: Гидрометеоиздат, 1993. – 718 с.

Поступила 28.04.2017 г.

Информация об авторах

Обухов С.Г., доктор технических наук, доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Плотников И.А., кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 621.311.25: 621.311.29

SIMULATION MODEL OF OPERATION OF AUTONOMOUS PHOTOVOLTAIC PLANT UNDER ACTUAL OPERATING CONDITIONS

Sergey G. Obukhov¹,
serob99@mail.ru

Igor A. Plotnikov¹,
igorplt@tpu.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

Relevance. Solar photovoltaic technology is one of the most rapidly growing renewable sources of electricity that has practical application in various fields of human activity due to its high availability, huge potential and environmental compatibility. The most serious technical problem of autonomous energy systems with renewable sources is the necessity to align the modes of energy generation and consumption that requires a reliable determination of energy balance with a high temporal sampling. Determination of energy characteristics under actual operating conditions is relevant due to nonlinearity of the main PVP element characteristics and their strong dependence on the external meteorological factors of stochastic nature.

The study aims to develop a simulation model of an autonomous photovoltaic power plant, which provides simulation of its operation under actual operating conditions.

Methods. Mathematical and computer simulation is implemented in the MatLab/Simulink software environment.

Results. A simulation model of the autonomous photovoltaic plant was developed. The model comprises six main components: model of the solar radiation arrival, solar cell, DC inverter (charge controller), battery, inverter, and electrical load. All the components are implemented in MatLab/Simulink as separate subsystems and are capable of dimensional scaling to study photovoltaic systems of any configuration. The proposed model considers the influence of external climatic factors on the solar cell energy characteristics to increase the accuracy of the energy generation forecast.

Key words:

Autonomous photovoltaic plant, solar battery, solar radiation, simulation model, MatLab, Simulink.

The research was financially supported by the Ministry of education and Science of the Russian Federation (contract no. 02.G25.31.0190).

REFERENCES

1. Chauhan A., Saini R.P. A review on Integrated Renewable Energy System based power generation for stand-alone applications: Configurations, storage options, sizing methodologies and control. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, vol. 38, pp. 99–120.
2. Shivarama K.K., Sathish K.K. A review on hybrid renewable energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, vol. 52, pp. 907–916.
3. Badwawi R.A., Abusara M., Mallick T. A Review of Hybrid Solar PV and Wind Energy System. *Smart Science*, 2015, vol. 3 (3), pp. 127–138.
4. Kusakana K., Vermaak H.J. Hybrid diesel generator/renewable energy system performance Modeling. *Renewable Energy*, 2014, vol. 67, pp. 97–102.
5. Upadhyay S., Sharma M.P. A review on configurations, control and sizing methodologies of hybrid energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, vol. 38, pp. 47–63.
6. *Handbook of photovoltaic science and engineering*. Ed. by A. Luque, S. Hegedus. Southern Gate, Chichester England, John Wiley & Sons Ltd, 2003. 1179 p.
7. *Practical handbook of photovoltaics: Fundamentals and applications*. Ed. by T. Markvart, L. Castafier. Hoboken, John Wiley & Sons Inc., 2012. 1244 p.
8. Obukhov S.G., Plotnikov I.A. Model of Solar Module in MATLAB SIMULINK. *Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*, 2014, no. (21), pp. 51–59. In Rus.
9. Vissarionov V.I., Deryugina G.V., Kuznetsova V.A., Malinin N.K. *Solnechnaya ehnergetika* [Solar energy]. Ed. By V.I. Vissarionov. Moscow, MEHI Publ. house, 2011. 276 p.
10. Popel O.S., S.E. Frid, S.V. Kiseleva, Yu.G. Kolomiets, N.V. Lisitskaya. *Klimaticheskie dannye dlya vozobnovlyemoy ehnergetiki Rossii (baza klimaticheskikh dannyykh)* [Climatic data for renewable energy in Russia (data base of climatic data)]. Moscow, MFTI Press, 2009. 56 p.
11. Liu B.Y.H., Jordan R.C. Daily insolation on surfaces tilted towards the equator. *ASHRAE Journal*, 1961, vol. 3, pp. 53–59.
12. Duffie J.A., Beckman W.A. *Solar Engineering of Thermal Processes*. Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons, Inc., 2013. 910 p.
13. *The NASA Surface Meteorology and Solar Energy Data Set*. Available at: <http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/> (accessed 14 March 2017).
14. *World Radiation Data Centre*. Available at: <http://wrdc.mgo.rssi.ru/> (accessed 14 March 2017).
15. Jones A.D., Underwood C.P. A thermal model for photovoltaic systems. *Solar Energy*, 2001, vol. 70 (4), pp. 349–359.
16. Obukhov S.G., Plotnikov I.A., Kryuchkova M. Simulation of Electrical Characteristics of a Solar Panel. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 132: Modern Technologies for Non-Destructive Testing, 012017, 6 p.
17. *Raspisanie pogody* [Weather forecast]. Available at: <http://www.rp5.ru/> (accessed 14 March 2017).
18. *Pogoda Rossii* [Weather in Russia]. Available at: <http://meteo.infospace.ru/> (accessed 14 March 2017).
19. Al Riza D.F., Haq Gilani S.I., Aris M.S. Hourly Solar Radiation Estimation Using Ambient Temperature and Relative Humidity Data. *International Journal of Environmental Science and Development*, 2011, vol. 2 (3), pp. 188–193.
20. Meyer E.L., van Dyk E. E. Development of energy model based on total daily irradiation and maximum ambient temperature. *Renewable Energy*, 2000, vol. 21 (1), pp. 37–47.

21. Muzathik A.M. Photovoltaic Modules Operating Temperature Estimation Using a Simple Correlation. *International Journal of Energy Engineering*, 2014, vol. 4 (4), pp. 151–158.
22. Tremblay O., Dessaint, L.-A., Dekkiche, A.-I. A Generic Battery Model for the Dynamic Simulation of Hybrid Electric Vehicles. *Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2007. pp. 284–289.
23. Tremblay O., Dessaint, L.-A. Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications. *World Electric Vehicle Journal*, 2009, vol. 3, pp. 1–10.
24. Shepherd C.M. Design of Primary and Secondary Cells – Part 2. An equation describing battery discharge. *Journal of Electrochemical Society*, 1965, vol. 112, pp. 657–664.
25. RD 34.20.178. *Rukovodyashchie materialy po proektirovaniyu elektrosnabzheniya selskogo khozyaystva. Metodicheskie ukazaniya po raschetu elektricheskikh nagruzok v setyakh 0,38–110 kV selskokhozyaystvennogo naznacheniya* [RD 34.20.178. Guiding materials in developing power supply in agriculture. Manual in calculation of electric loads in 0,38–110 kV networks for agriculture]. Moscow, Selenergoproekt Publ., 1985.
26. Obukhov S.G., Khoshnau Z.P. Prognozirovanie rezhimov potrebleniya ehlektricheskoy energii avtonomnymi energeticheskimi sistemami [Forecasting modes of consuming electric energy by autonomous electric power stations]. *Elektricheskie stantsii*, 2012, no. 11, pp. 43–47.
27. *JA SOLAR Company*. Available at: <http://www.jasolar.com/> (accessed 14 March 2017).
28. *Delta Company*. Available at: <http://www.delta-batt.com/> (accessed 14 March 2017).
29. *Nauchno-prikladnoy spravochnik po klimatu SSSR. Seriya 3. Mnogoletnie dannye* [Scientific reference book on climate in the USSR. Series 3. Long-term data]. St-Petersburg, Gidrometeoizdat Publ., 1993. Iss. 20, 718 p.

Received: 28 April 2017.

Information about the authors

Sergey G. Obukhov, Dr. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Igor A. Plotnikov, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 550.424.4

ЭКОЛОГО-ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ ОТРАБОТКИ ВОЛЬФРАМОВЫХ И МОЛИБДЕНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ВОСТОЧНОГО ЗАБАЙКАЛЬЯ

Чечель Лариса Павловна,

lpchechel@mail.ru

Институт природных ресурсов, экологии и криологии Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 672014, г. Чита, ул. Недорезова, 16^а.

Актуальность обсуждаемой темы обусловлена необходимостью обеспечения экологической безопасности горного производства в связи с загрязнением поверхностных и подземных вод.

Цель работы: изучение химического состава вод техногенных водоемов вольфрамовых и молибденовых рудников; выделение групп компонентов, характеризующихся аномальными содержаниями в водах; рассмотрение процессов очищения техногенных вод на геохимических барьерах и возможностей их применения на практике.

Методы исследования. Химико-аналитические исследования проводились общепринятыми методами: турбидиметрией (SO_4^{2-}), потенциометрией (HCO_3^- , Cl^- , F^-), колориметрией (Si , P , NO_3^- , NH_4^+); катионы и металлы определялись атомно-адсорбционным методом на спектрофотометре SOLAAR M6 и масс-спектрометрией с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS) на приборе ELEMENT 2.

Результаты. Изучены особенности состава вод, формирующихся в районах трех молибденовых и четырех вольфрамовых месторождений, расположенных в Восточном Забайкалье, показаны существенные различия их физико-химических характеристик. Наиболее минерализованные кислоты, сульфатные с максимальными содержаниями тяжелых металлов воды зафиксированы в дренаже хвостов обогатительных фабрик, породных отвалов и в прудах шламохранилищ месторождений с повышенным количеством сульфидов в рудах. Выделены группы элементов, представляющих наибольшую опасность для водных экосистем: Cd , Cu , Zn , Th , Mn , Al – в кислых и слабокислых, W , U , As , Mn – в слабощелочных и щелочных водах. В районах месторождений исследованы геохимические барьеры кислородного, щелочного и сорбционного типов. Рассмотрены возможности использования для очистки исследованных загрязненных вод комплексного (щелочного и сорбционного) геохимического барьера, а также водно-болотных экосистем.

Ключевые слова:

Отработка месторождений, загрязнение вод, тяжелые металлы, геохимические барьеры, очистка вод.

Введение

Активное количественное изучение водной миграции токсичных компонентов в районах деятельности горнорудной промышленности началось на рубеже 70–80 гг. прошлого столетия, когда исследователи разных стран обратились к проблеме загрязнения вод в районах складирования отходов добычи и переработки сульфидных руд, как представляющих наибольшую опасность для окружающей среды.

Попадая на дневную поверхность сульфидные минералы активно окисляются, формируя кислый дренажный сток горных выработок и техногенных отвалов с аномальными концентрациями поллютантов. В зарубежных источниках это явление известно как «acid mine drainage» и «acid rock drainage» и в последние десятилетия является важнейшим направлением исследований, что отражено в работах С.О. Moses, Д.К. Nordstrom, Д.В. Blowes, В.Г. Lottermoser, М.В.Л. Lindsay и других. В России тема изучения рудничных дренажей широко представлена в научных публикациях В.Н. Удачина, Г.Р. Колонина, С.А. Бортниковой, О.Л. Гасковой, А.М. Плюснина и многих других исследователей, в том числе автора настоящей работы [1–4].

Изучение процессов очищения техногенно-трансформированных (далее техногенных) вод, связанных с переходом загрязняющих веществ из растворенной фазы в состав взвешенного материала и далее в осадок, основано на теории «геохими-

ческих барьеров» [5], для обозначения которых в зарубежных источниках используется термин «permeable reactive barriers» [6, 7]. В настоящее время активно разрабатываются методы создания искусственных геохимических барьеров и использования их для очистки загрязненных вод, а также с целью концентрирования полезных компонентов и образования техногенных месторождений.

Забайкальский край – старейший горнорудный регион, на долю которого приходится около трети запасов молибдена и вольфрама России. Их активная добыча велась в прошлом столетии и на некоторых объектах продолжается до настоящего времени. Отходы горного производства, складированные на прилегающих территориях в виде отвалов, являются источниками токсичных элементов, поступающих в окружающую среду и загрязняющих все ее компоненты, в том числе природные воды. Рудные минералы значительной части месторождений представлены сульфидами, что способствует образованию кислых дренажей, характеризующихся высокими концентрациями рудных компонентов, зачастую существенно превышающими уровень природных аномалий и допустимые экологические нормативы.

Материалы и методы исследований

В 2013–2015 гг. проведено гидрогеохимическое опробование техногенно-нарушенных участков в пределах четырех вольфрамовых (Букука,

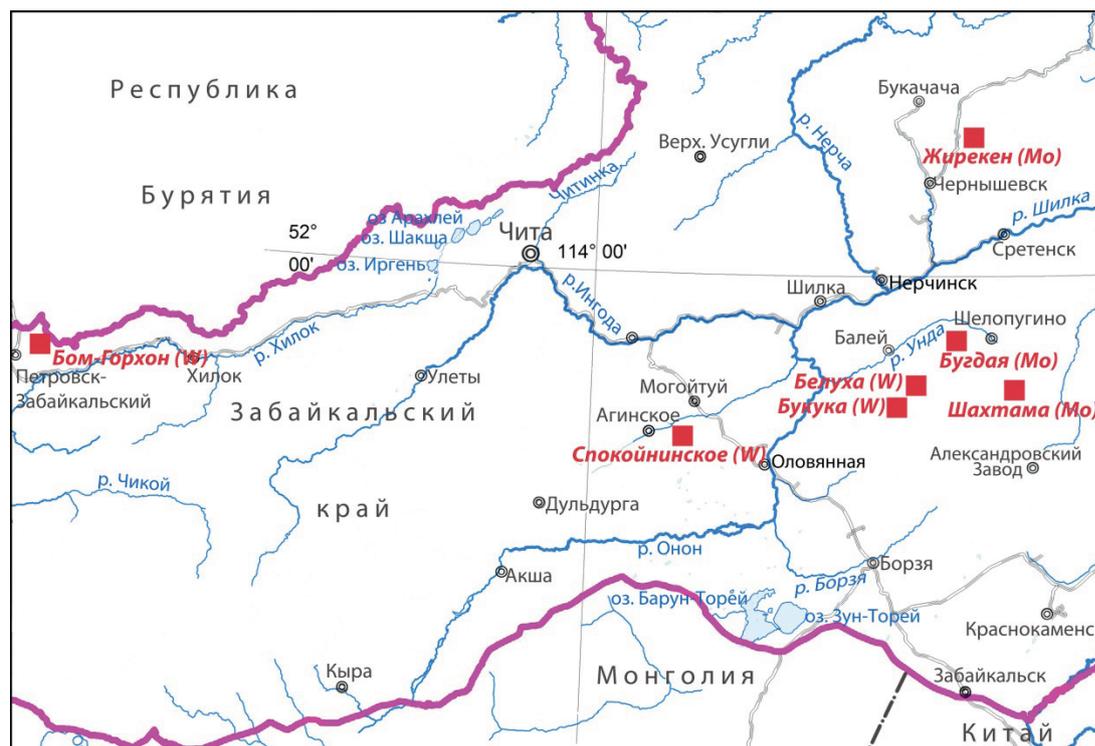


Рис. 1. Карта-схема местонахождения объектов исследования

Fig. 1. Schematic map of research objects

Белуха, Спокойнинское, Бом-Горхон) и трёх молибденовых (Шахтама, Жирекен, Бугдая) месторождений, расположенных в Восточном Забайкалье (рис. 1).

Вольфрамовые месторождения Букука и Белуха разрабатывались до начала 60-х гг. прошлого столетия как подземным, так и открытым способом, после чего были законсервированы. На молибденовых месторождениях Шахтама и Жирекен промышленная отработка также была остановлена соответственно в 1993 и 2014 гг. Запасы как тех, так и других полностью не были выбраны. Вольфрамитовые месторождения Спокойнинское и Бом-Горхон обрабатываются до настоящего времени. На Бугдае проводилась только опытная добыча. Переработка руды, как на закрытых, так и на действующих рудниках, осуществлялась на местных обогатительных фабриках, отходы их складировались на местах, рекультивация нарушенных территорий не проводилась.

В числе основных особенностей геологического строения месторождений выделяются их пространственная ассоциация с гранитными и гранитоидными породами, а также наличие либо отсутствие сульфидной минерализации и карбонатов. Вольфрамовые месторождения тяготеют к участкам развития песчано-сланцевых отложений протерозойского, палеозойского и мезозойского возрастов, прорванных мезозойскими гранитоидными интрузиями [8, 9]. Для руд жильных кварц-вольфрамит-сульфидных Букукинского и Белухинско-

го, а также кварц-гюбнерит-сульфидного Бом-Горхонского месторождений характерно повышенное содержание сульфидов. На Спокойнинском грейзеново-вольфрамитовом месторождении сульфидная минерализация имеет значительно меньшее распространение и носит рассеянный характер. Главными рудными минералами на Букуке являются вольфрамит, гюбнерит, сфалерит, пирит, на Белухе – вольфрамит, пирит, сфалерит, на Бом-Горхоне – пирит, гюбнерит, молибденит, сфалерит, на Спокойнинском месторождении – вольфрамит, берилл, бисмутит, танталониобаты, касситерит.

Молибденовые месторождения локализованы в гранитоидах мезозойского и каменноугольного возраста [9]. Вмещающие породы штокверкового медно-молибденового Жирекенского месторождения характеризуются повышенной щелочностью, главными рудными минералами являются молибденит и халькопирит, второстепенными – галенит, сфалерит, шеелит, блеклая руда, пирротин, арсениопирит. Жильное Шахтаминское и штокверковое Бугдаинское месторождения относятся к молибденит-галенит-сфалеритовой рудной формации. Наиболее распространенные минералы на Шахтаме – кварц, карбонаты, полевые шпаты, слюда и флюорит; рудные – молибденит, пирит, сфалерит, галенит, халькопирит, антимонит, арсениопирит. Главные рудные минералы на Бугдаинском месторождении представлены молибденитом, галенитом, сфалеритом, пиритом, халькопиритом, шеелитом.

Гидрогеохимическое опробование площадей месторождений проводилось в летнюю межень. Были опробованы воды техногенных водоемов (карьеры, пруды шламоохранилищ), дренажи штолен, отвалов хвостов обогащения и пустых пород. В пределах месторождений было отобрано 48 водных проб, химико-аналитические исследования которых проводились общепринятыми методами в Институте природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН (г. Чита): турбидиметрией (SO_4^{2-}), потенциометрией (HCO_3^- , Cl^- , F^-), колориметрией (Si , $\text{P}_{\text{общ.}}$, NO_3^- , NH_4^+). Основные катионы и металлы определялись атомно-адсорбционным методом на спектрофотометре SOLAAR M6. Дополнительно выполнялся отбор водных проб для их анализа методом ICP-MS: на месте отбора пробы воды, предварительно отфильтрованные через мембранный фильтр (размер пор 0,45 мкм), отбирались в пластиковые пробирки (15 мл), затем консервировались добавлением особо чистой концентрированной азотной кислоты. Анализ методом ICP-MS выполнялся в Институте геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН (г. Иркутск) на приборе высокого разрешения ELEMENT 2 фирмы Finnigan MAT по методике HSCAM № 480X.

Физико-химические характеристики исследованных вод

В районах вольфрамовых месторождений Букукинского, Белухинского и Бом-Горхонского, а также молибденового Бугдаинского формируются преимущественно кислые и слабокислые сульфатные, фторидно-сульфатные и гидрокарбонатно-сульфатные дренажные воды с кальциевым и магниевым-кальциевым катионным составом. Формулы среднего ионно-солевого состава вод этих четырех месторождений имеют вид:

- Букука – $\text{M}1,24 \frac{\text{SO}_4 81 \text{ F}16 \text{ HCO}_3 2 \text{ Cl} 1}{\text{Ca}65 \text{ Mg}28 \text{ Na}6 \text{ K}1} \text{ pH}4,42$;
- Белуха – $\text{M}0,17 \frac{\text{SO}_4 72 \text{ HCO}_3 16 \text{ F}10 \text{ Cl} 2}{\text{Ca}65 \text{ Na}21 \text{ Mg}12 \text{ K}2} \text{ pH}6,14$;
- Бом-Горхон – $\text{M}0,93 \frac{\text{SO}_4 86 \text{ F}11 \text{ HCO}_3 2 \text{ Cl} 1}{\text{Ca}77 \text{ Mg}17 \text{ Na}4 \text{ K}2} \text{ pH}4,69$;
- Бугдая – $\text{M}1,05 \frac{\text{SO}_4 87 \text{ HCO}_3 9 \text{ F}3 \text{ Cl} 1}{\text{Ca}56 \text{ Mg}35 \text{ Na}7 \text{ K}2} \text{ pH}4,32$.

К особенностям техногенных вод этих месторождений следует отнести также значительный рост минерализации (до 3 г/л и более) и концентраций металлов, максимальные значения которых достигали миллиграммовых значений (Al, Fe, Zn, Mn, Cu, Ni, Sr, Cd) (табл. 1, 2). Этим же водам свойственны аномальные концентрации редкоземельных элементов, максимальные суммарные содержания которых в кислых водах Букукинского и Бом-Горхонского месторождений составили соответственно 1,07 и 3,59 мг/л.

Техногенные воды, формирующиеся в пределах вольфрамового Спокойнинского, а также молибденовых Жирекенского и Шахтаминского месторождений, характеризуются повышенными значения-

ми pH (табл. 1). В районе Спокойнинского месторождения развиты преимущественно околонейтральные и слабощелочные, пресные (0,3–1 г/л) воды, их химический состав сульфатный и сульфатно-гидрокарбонатный магниевый-кальциевый и гидрокарбонатный кальциевый.

Аномальные концентрации свойственны Fe, Mn, W и U (табл. 2). Формула среднего ионно-солевого состава имеет вид:

$$\text{M}0,55 \frac{\text{HCO}_3 52 \text{ SO}_4 40 \text{ Cl} 6 \text{ F}2}{\text{Ca}49 \text{ Mg}30 \text{ Na}17 \text{ K}4} \text{ pH}7,42.$$

Значительный рост содержаний аммонийной и особенно нитратной форм азота (табл. 1) в водах на дне действующего карьера Спокойнинского месторождения связан с производством буровзрывных работ. Аналогично, попаданием остатков взрывчатых веществ, объясняют увеличение концентраций NH_3 , NO_2^- , NO_3^- в дренажных водах на алмазном руднике Диавик в Канаде [10].

Воды пруда хвостохранилища и подотвального дренажа Жирекенского ГОКа характеризуются слабощелочной реакцией, повышенной минерализацией (до 1,28 г/л), сульфатным, сульфатно-гидрокарбонатным и гидрокарбонатно-сульфатным кальциевым-натриевым и натриево-кальциевым составом:

$$\text{M}0,80 \frac{\text{SO}_4 62 \text{ HCO}_3 34 \text{ Cl} 3}{\text{Ca}48 \text{ Na}39 \text{ Mg}11 \text{ K}2} \text{ pH}7,72. \text{ От слабокис-$$

лых до слабощелочных значений изменяется величина pH техногенных вод на Шахтаминском месторождении, по величине минерализации это преимущественно ультрапресные (<0,2 г/л) воды сульфатного и гидрокарбонатно-сульфатного магниевый-кальциевого типа. Формула их среднего ионно-солевого

$$\text{состава } \text{M}0,17 \frac{\text{SO}_4 66 \text{ HCO}_3 31 \text{ Cl} 3 \text{ F}1}{\text{Ca}68 \text{ Mg}22 \text{ Na}9 \text{ K}1} \text{ pH}7,21.$$

Миллиграммовых значений в техногенных водах Шахтаминского и Жирекенского месторождений достигают концентрации марганца, цинка, молибдена и стронция (табл. 2).

Для выявления групп компонентов, характеризующих геохимическую специфику техногенных объектов, данные химического анализа вод были нормированы относительно среднего состава вод выщелачивания [11]. Наибольшее превышение концентраций компонентов над средним составом вод выщелачивания зафиксировано в кислых водах вольфрамовых месторождений Букука и Бом-Горхон (рис. 2, а) и молибденового месторождения Бугдая (рис. 2, б). При этом максимальные превышения достигали от тысяч до сотен тысяч раз. Распределение в рядах компонентов в порядке убывания имеет следующий вид:

- Букука –
Cd>Cu>Zn>Co>Al>Be>Th>Mn>Ni>La>Pb>U>
Cs>Sc>Li>Fe>Sr>W>Mo;
- Бом-Горхон –
Cd>Th>Zn>Mn>Al>Co>La>Be>U>Sc>Cu>Fe>
W>Li>Ni;

Таблица 1. Диапазон колебаний физико-химических параметров состава вод

Table 1. Fluctuation range of physico-chemical parameters of water composition

Параметр Parameter	Месторождение /Deposit						
	Букука Bukuka	Белуха Belukha	Спокойнинское Spokoyninskoe	Бом-Горхон Bom-Gorkhon	Шахтама Shakhtama	Жирекен Zhireken	Бугдая Bugdaya
pH	2,59–6,74	5,85–6,38	6,65–7,96	3,04–6,18	5,70–8,37	7,64–7,75	3,45–6,94
Eh, mV	235–574	257–317	–87–221	–	102–277	–29,0–226	398–497
ПО, мг O ₂ /л PO, mg O ₂ /l	0,47–3,45	1,40–2,47	7,49–21,8	0,86–5,01	2,10–8,24	6,24–9,57	0,92–10,8
HCO ₃ ⁻ , мг/л (mg/l)	0–65,3	10,3–20,1	54,9–253,1	0–12,2	1,22–102,5	70,9–243,0	0–34,8
SO ₄ ²⁻	151–1562	2,9–243,5	40,6–617,0	44,6–2100	32,6–116,0	86,4–734,4	16,7–1639
Cl ⁻	1,30–4,60	0,87–1,45	4,80–26,3	1,30–2,80	0,62–3,37	2,01–42,0	1,25–1,98
F ⁻	5,74–173,0	1,99–8,10	0,41–3,97	0,20–262,0	0,10–0,85	0,36–0,84	0,14–64,4
NO ₃ ⁻	0,31–2,08	0,31–1,56	0,31–382,3	0,89–18,6	0,31–6,06	0,68–13,3	0,71–9,60
Ca ²⁺	64,8–339,0	15,6–73,7	31,3–237,0	17,8–821,0	17,1–46,2	75,7–125,7	11,8–345,0
Mg ²⁺	4,40–251,0	1,30–12,1	11,3–125,0	2,46–19,9	2,73–8,95	11,3–16,0	0,73–189,0
Na ⁺	3,91–55,2	6,74–15,9	13,7–28,8	1,60–13,1	3,99–5,41	44,7–271,1	3,78–17,6
K ⁺	0,89–10,0	0,89–1,89	0,94–19,6	0,97–3,59	0,55–1,75	1,58–18,0	1,51–7,19
NH ₄ ⁺	0,08–1,44	0,17–0,18	0,14–24,3	0,07–0,52	0,14–0,42	1,58–18,9	0,28–0,96
Σионов Σions	279–2348	79,7–370,3	321–1069	74,1–3214	89,4–221,0	470–1280	74,4–2188
Si	5,46–34,2	4,82–5,79	2,51–11,5	3,00–12,7	0,50–6,20	2,80–5,20	5,18–33,6
P _{об} /P _{total}	0,052–0,075	0,065–0,07	0,055–0,63	0,045–0,067	0,03–0,04	0,03–0,05	0,04–0,09

Примечание: ПО – перманганатная окисляемость.

Note: PO – permanganate oxidation.

Таблица 2. Диапазон колебаний концентраций металлов

Table 2. Range of fluctuations in metals concentrations

Параметр Parameter	Месторождение /Deposit						
	Букука Bukuka	Белуха Belukha	Спокойнинское Spokoyninskoe	Бом-Горхон Bom-Gorkhon	Шахтама Shakhtama	Жирекен Zhireken	Бугдая Bugdaya
Li, мкг/л/mcg/l	46,0–589	6,50–12,5	21,0–125	18,0–1062	0,21–8,50	14,3–46,0	2,40–718
Be	12,2–50,0	0,65–4,53	0,023–2,70	3,73–80,0	0,0014–0,35	0,02–0,04	0,053–47,0
Al	1957–131122	326–5422	20,0–468	2365–239627	17,0–337	8,90–48,4	217–402990
Mn	22,0–13949	7,80–134	27,0–5701	273–52541	24,0–10294	6,10–1767	40,0–859615
Fe	44,0–99064	42,0–323	20,0–4629	17,0–100312	67,0–214	26,0–994	120–8969
Co	0,31–237	0,13–2,16	0,11–14,9	0,72–384	0,10–4,52	0,03–11,1	0,18–1086
Ni	69,0–1151	1,29–15,0	0,76–53,0	5,10–310	2,86–20,0	0,96–12,9	1,40–340
Cu	6,90–23224	48,0–703	2,60–8,20	15,0–1802	6,60–117	3,56–278	7,20–54927
Zn	3397–117226	118–3133	4,66–255	754–151028	10,3–6538	13,1–346	33,0–292966
Sr	426–2961	93,0–376	327–1559	135–2315	95,0–679	425–1832	63,0–762
Y	0,38–174	0,26–1,89	0,037–0,29	0,079–324	0,06–0,55	0,05–1,56	0,72–1967
Mo	0,93–65,0	1,15–4,40	1,36–76,0	0,15–3,66	5,90–242	81,0–1361	3,74–323
Ag	0,0038–5,50	0,021–0,05	0,01–0,23	0,0008–3,36	0,40–8,30	0,045–1,19	0,004–36,0
Cd	39,0–1323	1,02–25,0	0,31–10,5	22,0–2030	0,13–37,0	1,69–15,0	0,61–2758
As	1,31–33,0	0,52–2,29	0,68–606,0	0,11–0,44	0,49–2,88	5,20–8,50	0,58–3,54
W	0,23–4,66	0,20–3,03	3,00–1544	0,16–11,4	0,038–0,39	0,27–2,58	0,10–2,45
Pb	0,89–672	0,38–1,00	0,18–2,10	0,28–26,0	0,43–19,0	0,27–0,75	1,89–65,0
Th	0,023–50,0	0,02–0,12	0,0063–0,11	0,025–943	0,01–0,50	0,01–0,09	0,04–190
U	1,59–117	0,17–0,44	1,50–1863	0,28–321	0,30–29,0	11,4–31,4	0,34–968
ΣREE	2,20–1072	1,51–9,06	0,153–0,706	0,84–3587	0,40–3,27	0,25–4,85	0,10–2,45

• Бугдая –
 Mn>Al>Zn>Cu>Fe>Cd>La>Sr>Co>Li>U>Ni>
 Mo>Rb>Th>Ba>Pb>Sc>Be>Cr.

Наибольшие превышения свойственны компонентам, активно мигрирующим в кислых водах в виде простых катионных, сульфатных и фторидных комплексов [2, 3, 12]. Слабокислые техногенные воды месторождения Белуха характеризуются заметно меньшим

превышением концентраций компонентов относительно вод выщелачивания (рис. 2, а), порядок их распределения соответствует распределению в кислых водах – Cu>Cd>Zn>Be>Cs>Al. Наиболее минерализованные, кислые с максимальными содержаниями микрокомпонентов сульфатного анионного состава воды зафиксированы в дренаже хвостов обогастительных фабрик (Букука, Бом-Горхон, Белуха) и в карьере (Букука).

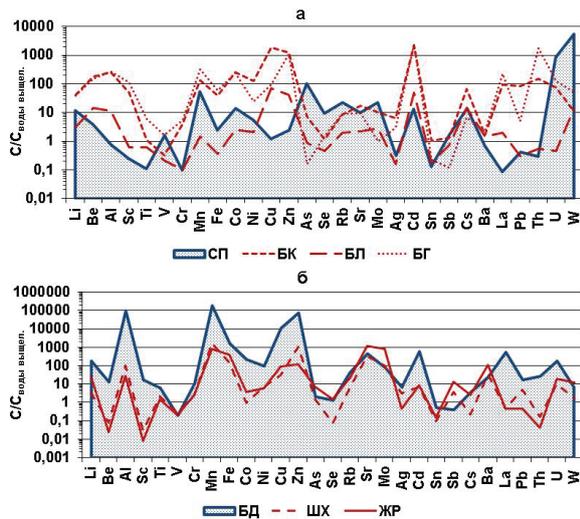


Рис. 2. Средние значения концентраций микрокомпонентов в водах, нормированные относительно среднего химического состава вод выщелачивания [11]: а) вольфрамовые месторождения – СП – Спокойнинское, БК – Букука, БЛ – Белуха, БГ – Бом-Горхон; б) молибденовые месторождения – БД – Бугдая, ШХ – Шахтама, ЖР – Жирекен

Fig. 2. Average concentrations of microcomponents in water, normalized relative to the average chemical composition of the leaching water [11]: a) tungsten deposits – СП – Spokoyninskoe, БК – Bukuka, БЛ – Belukha, БГ – Bom-Gorkhon; b) molybdenum deposits – БД – Bugdaya, ШХ – Shakhtama, ЖР – Zhireken

Иное распределение компонентов, нормализованных относительно среднего состава вод выщелачивания, отмечается в водах техногенных объектов на Спокойнинском месторождении (рис. 2, а). Расположение их в ряд по мере убывания имеет вид: $W > U > As > Mn > Rb > Mo > Cs > Co > Li$. В околонеутральных – слабощелочных средах, развитых здесь, в наибольшей степени накапливаются мигрирующие в виде анионов вольфрам и мышьяк [1, 12], а также уран, основной формой нахождения которого в этих условиях являются карбонатные комплексы уранила [12, 13]. Максимальные концентрации металлов зафиксированы в водах на дне действующего карьера и пруда хвостохранилища.

Несмотря на сопутствующее сульфидное оруденение, техногенным водам Жирекенского и Шахтаминского рудников свойственны преимущественно околонеутральная и слабощелочная реакции (табл. 1). В этих условиях миграция многих металлов затруднена вследствие наступления насыщения относительно их гидроксидов. Превышение концентраций компонентов над средним составом вод выщелачивания (рис. 2, б) заметно уступает кислым водам Бугдаи. Распределение их в рядах в порядке убывания имеет вид: Шахтама – $Mn > Zn > Sr > Fe > Al > Mo > Ba > Cu > U$; Жирекен – $Sr > Mn > Mo > Fe > Zn > Ba > Cu > Al > Li > Rb > U > Sb > W$. Миграция металлов осуществляется преимущественно в виде карбонатных и гидроксильных комплексов, реже – в простой катионной форме, молибден и вольфрам существуют в виде анионов –

WO_4^{2-} MoO_4^{2-} [3]. Максимальные концентрации металлов встречены в прудах шламохранилищ на Жирекене и Шахтаме и дренаже породных отвалов на Жирекене.

Особенности формирования химического состава вод и их геохимическая типизация

Источниками в водах месторождений ионов SO_4^{2-} и металлов служат сульфидные минералы руд, активно окисляющиеся в присутствии кислорода с образованием хорошо растворимых сульфатов. Продукты реакций окисления сульфидов, и прежде всего H_2SO_4 , оказывают сильное растворяющее действие на руды и вмещающие горные породы, ведущими процессами разложения которых, в этих условиях, являются окисление и сернокислотное разложение. Существенным фактором, ускоряющим действие вышеназванных процессов, является дробление рудных минералов в процессе горно-добычных работ, что ведет к значительному увеличению поверхности их соприкосновения с кислородом воздуха и водой.

При окислении сульфидов в водах зоны гипергенеза месторождений возрастает концентрация ионов H^+ , следствием чего является понижение величины рН до минимальных значений. Присутствие карбонатных минералов оказывает нейтрализующее воздействие на возрастающую кислотность вод, фактическая величина рН которых определяется соотношением между количеством сульфидных и карбонатных минералов [14, 15]. Это объясняет повышенную кислотность рудничных дренажей на Букуке, Бом-Горхоне и Бугдае, а также нейтральную и щелочную реакцию вод, формирующихся на Шахтаме и Жирекене.

В числе процессов, переводящих компоненты в раствор, в пределах малосульфидного Спокойнинского месторождения на первое место выходят растворение и углекислотное выщелачивание.

Главными источниками химических элементов вод служат горные породы, от типа которых зависит также степень их водопроницаемости и формирование рельефа, определяющих, в свою очередь, интенсивность подземного и поверхностного стока. Большое влияние на формирование состава вод оказывает промышленная отработка месторождений, в процессе которой резко изменяются условия миграции и происходит загрязнение всех элементов ландшафта. Сочетание названных факторов формирует водообмен, контролирующий время взаимодействия воды с горными породами [11, 16] и, по сути, определяющий особенности состава исследованных вод.

Наиболее важными характеристиками вод, контролирующими основные миграционные свойства компонентов, являются их окислительно-восстановительный (Еh) и щелочно-кислотный (рН) показатели, по соотношению которых можно выделить три типа техногенных вод [12], сформировавшихся в пределах исследованных месторождений (рис. 3):

- I – кислые (pH < 5,0) с высокими значениями Eh (> 350 мВ);
- II – околонейтральные и слабокислые (pH 5,0–7,0) с повышенными значениями Eh (200–350 мВ);
- III – околонейтральные, слабощелочные и щелочные (pH > 7,0) с низкими положительными и отрицательными значениями Eh (< 250 мВ).

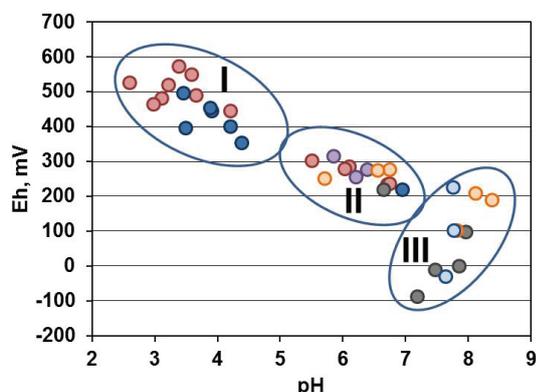


Рис. 3. Eh-pH диаграмма и три типа (I, II и III) техногенно-трансформированных вод, формирующихся в районах месторождений: 1 – Букука, 2 – Белуха, 3 – Спокойнинское, 4 – Шахтама, 5 – Жирекен, 6 – Бугдая

Fig. 3. Eh-pH diagram and three types (I, II and III) of technogenic-transformed waters formed in the areas of deposits: 1 – Bukuka, 2 – Belukha, 3 – Spokoyninskoe, 4 – Shakhtama, 5 – Zhireken, 6 – Bugdaya

Воды первого типа, характеризующиеся максимальной минерализацией и концентрациями большинства металлов и фтора, развиты в пределах Букукинского, Бом-Горхонского (нет на диаграмме ввиду отсутствия данных о значениях Eh по техническим причинам) и Бугдаинского месторождений. Основная форма существования металлов в этих условиях простая ионная (Cu^{2+} , Zn^{2+} , Pb^{2+} , Cd^{2+} , Co^{2+} , Ni^{2+} , Sr^{2+} , Mn^{2+} , Fe^{2+} , Fe^{3+} , Al^{3+} и т. д.), вторые по значимости – сульфатные и гидросульфатные комплексы, реже – фторидные. Ведущими катионами являются H^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{3+} , Al^{3+} , главный анион – SO_4^{2-} [1–3]. Еще одна особенность этих вод – обогащенность их фтором (табл. 1). В кислых водах он связан в алюмофторидные комплексы [17], что способствует усилению его миграции и накоплению содержания до значимых при определении ионно-солевого состава воды.

Воды второго типа (рис. 3) образуются при разбавлении кислых рудничных дренажей нейтральными фоновыми водами на Букуке и Белухе, а также в результате нейтрализации кислотности карбонатами рудных жил на Шахтаминском и окисления сульфидов на Спокойнинском месторождениях. Они характеризуются сульфатно-гидрокарбонатным и гидрокарбонатным анионным составом, главные катионы Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ . Миллиграммовых количеств достигают концентрации цинка, железа, марганца, стронция и алюминия. В слабокислых околонейтральных водах зафиксированы

максимальные для Букукинского и Белухинского месторождений концентрации молибдена и вольфрама, а также урана, цинка, молибдена, кадмия – в водах Спокойнинского карьера. Понижение кислотности растворов способствует большему разнообразию форм миграции компонентов. В слабокислых и особенно околонейтральных средах начинается смена ведущих форм – снижается роль простых ионных и сульфатных, появляются гидрокарбонатные, карбонатные и гидроксильные формы [1–3].

Воды третьего типа развиты в районе вольфрамового Спокойнинского, а также молибденовых Жирекенского и Шахтаминского месторождений (рис. 3). Этим водам свойственны наиболее низкие значения Eh (табл. 1). Ведущий анион в водах Спокойнинского месторождения HCO_3^- , на Жирекене и Шахтема – SO_4^{2-} , главные катионы Ca^{2+} , Mg^{2+} и Na^+ . Максимальных значений достигают концентрации аниогенных компонентов – W, Mo, U и As, а также компонентов, активно мигрирующих в околонейтральных и щелочных средах в виде карбонатных и гидроксильных комплексов.

Для оценки экологического состояния исследованных техногенных вод проведено сравнение средних значений компонентов, характеризующихся максимально-аномальными содержаниями, с предельно-допустимыми концентрациями (ПДК) химических веществ в воде хозяйственно-питьевого назначения [18]. Полученные результаты (рис. 4) свидетельствуют об их значительном превышении над ПДК: в десятки, сотни и тысячи раз для Cd, Al, F, Fe, Mn, Zn, Pb и Cu – в кислых сульфатных водах первого типа, до десяти раз для Cd, Al, F и Zn – в слабокислых гидрокарбонатно-сульфатных водах второго типа, до десяти и более раз для Cd, F, Fe, Mn, As, U, Mo и W, – в слабощелочных и щелочных гидрокарбонатных водах третьего типа. Это свидетельствует о чрезвычайно высокой степени загрязнения исследованных вод.

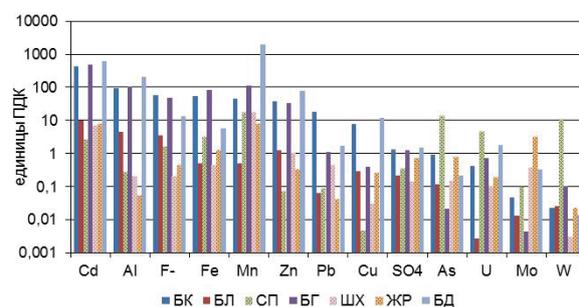


Рис. 4. Средние значения концентраций компонентов, максимально превышающих ПДК, в техногенных водах месторождений: БК – Букука, БЛ – Белуха, СП – Спокойнинское, БГ – Бом-Горхон, ШХ – Шахтама, ЖР – Жирекен, БД – Бугдая

Fig. 4. Average concentrations of the components, maximum exceeding MPC (the maximum permissible concentration) in the water of deposits: БК – Bukuka, БЛ – Belukha, СП – Spokoyninskoe, БГ – Bom-Gorkhon, ШХ – Shakhtama, ЖР – Zhireken, БД – Bugdaya

Геохимические барьеры и возможности их использования для очищения дренажных стоков

Одним из перспективных методов предотвращения распространения токсичных элементов дренажными стоками и загрязнения природных ландшафтов в районах складирования отходов горной добычи и переработки руды является применение геохимических барьеров, под которыми понимают переходные зоны, где происходит смена одной геохимической обстановки на другую, в результате чего на относительно коротких расстояниях резко изменяется интенсивность миграции химических элементов, осаждающихся при этом в твёрдую фазу [5]. По преобладающему типу миграции выделены три класса геохимических барьеров: физико-химические, биогеохимические и механические.

Физико-химические барьеры возникают в местах изменения температуры, давления, окислительно-восстановительных, щелочно-кислотных и других условий. Основные их виды, в наибольшей

степени способствующие очищению загрязнённых вод, – окислительный (кислородный), восстановительный (сероводородный и глеевый), щелочной (гидролитический и карбонатный) и сорбционный (гидроксидный и глинистый) [12]. В процессе гидрогеохимического опробования территорий месторождений нами неоднократно фиксировались участки действия геохимических барьеров окислительного, щелочного, сорбционного и испарительного типов (рис. 5).

Окислительный (кислородный) барьер возникает при резком повышении значений E_h , связанном с увеличением концентраций кислорода, и сопровождается процессами окисления компонентов вод, которые из хорошо растворимых восстановленных форм преобразуются в малорастворимые окисленные формы, что, в конечном итоге, приводит к концентрированию их в виде осадка гидроксидов, также являющихся эффективными сорбентами. Наибольшее значение имеют гидроксиды

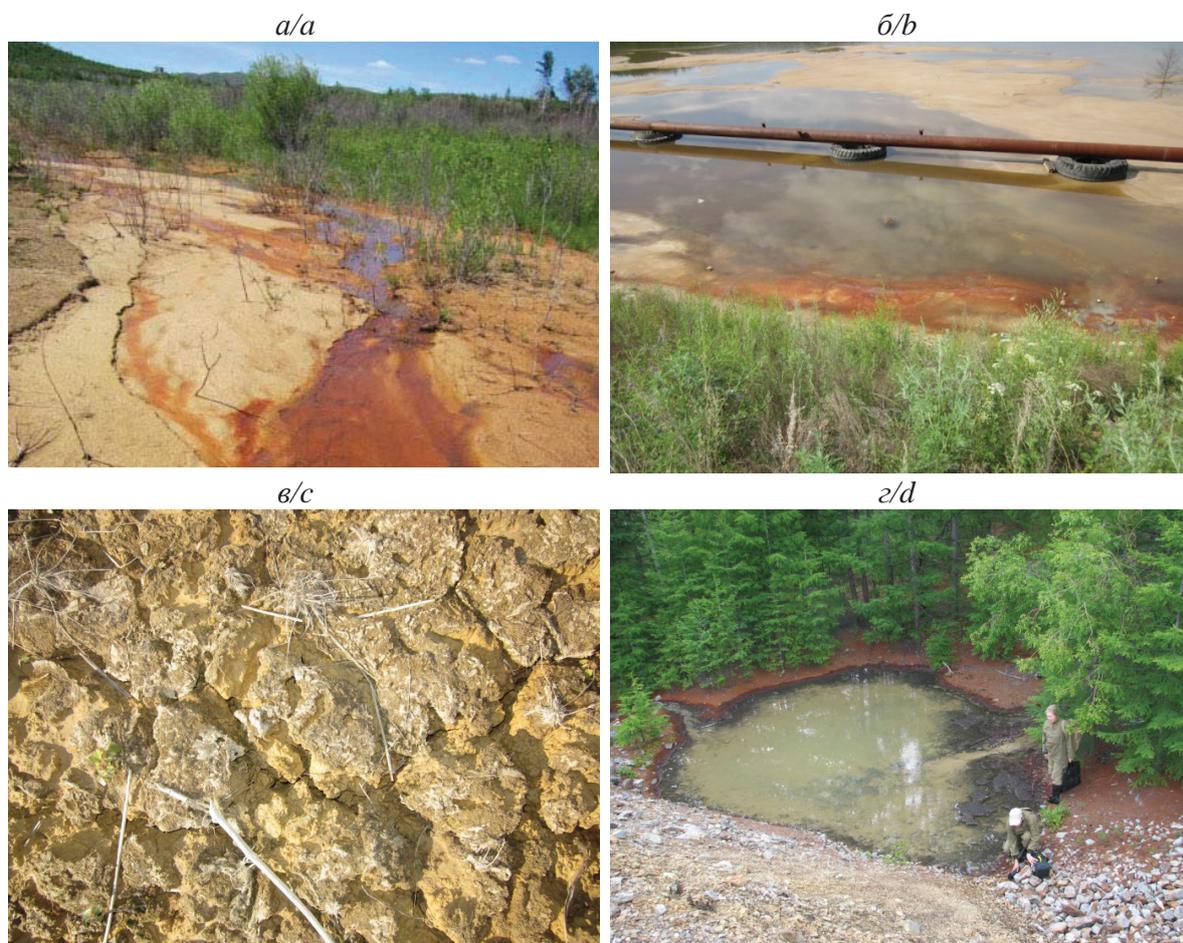


Рис. 5. Участки действия геохимических барьеров: окислительного – выход в песках хвостохранилища Спокойнинского месторождения (а) и пруд хвостохранилища Жирекенского ГОКа (б); испарительного – отложения в песках хвостохранилища Шахтаминского месторождения (в); гидродинамического и сорбционного глинистого – штольневый сток под отвалами Букукинского рудника (г)

Fig. 5. Areas of geochemical barriers action: oxidative barrier – drain in the sands of the tailing of the Spokoyninskoe deposit (a) and the tailing pond of Zhireken GOK (b); evaporative barrier – sediments in the sands of the tailing dump of the Shakhtama deposit (c); hydrodynamic and sorption barriers – drain under the dumps of Bukuka mine (d)

железа, марганца и алюминия, сорбирующие в щелочных средах катионы, в кислых – отрицательно заряженные ионы. Пространственное наложение кислородного и сорбционного гидроксидного барьеров позволяет классифицировать их как единый комплексный геохимический барьер. Участки действия таких барьеров в условиях нейтральных и щелочных сред зафиксированы нами в дренаже вод хвостохранилища Спокойнинского месторождения (в точке выхода – pH 7,6; Eh – 87), а также в месте разгрузки вод под дамбой хвостохранилища Жирекенского ГОКа (pH – 8,03; Eh – 29) (рис. 5, а, б). Соосаждаемые в данных условиях компоненты представлены в основном простыми катионными формами и гидроксокомплексами [12]: Cu^{2+} , CuOH^+ , Zn^{2+} , ZnOH^+ , Pb^{2+} , PbOH^+ , Ni^{2+} , Co^{2+} , Cd^{2+} , CdOH^+ и др.

Комплексные геохимические барьеры подобного типа получили широкое распространение в техногенной зоне сульфидных месторождений Букука, Белуха и Бугдая. Участки их действия фиксируются по красно-бурым отложениям в долинах ручьев, дренирующих пески хвостов обогатительных фабрик и породные отвалы. Но в этом случае действие сорбционного гидроксидного барьера осуществляется преимущественно в кислых и слабокислых средах, что способствует соосаждению аниогенных элементов – W, Mo, As, Sb, V, Se, Nb, Cr и других [4, 12].

На участках резкого повышения или понижения pH вод формируются соответственно барьеры щелочного и кислого типов, осаждающие в первом случае катиогенные, во втором – аниогенные элементы. Участками формирования щелочного геохимического барьера являются, как правило, зоны смешения кислых дренажных стоков с нейтральными фоновыми водами, визуально определяемые наличием донных отложений, зачастую имеющих бурую железистую окраску. Такая окраска может свидетельствовать о разгрузке в этом месте бескислородных (либо с низкими концентрациями кислорода) подземных вод и совместном действии кислородного и щелочного барьеров, формирование которых сопровождается наложением сорбционного гидроксидного барьера.

В районе Букукинского месторождения зона формирования щелочного гидролитического барьера определена в месте слияния падей Калениха и Сосновый Лог [4]. По руслу ручья на этом участке в результате смешения кислых вод с нейтральными фоновыми образуются обильные железистые отложения, отмечается существенный рост pH – с 4,0 до 7,2. Одновременно с этим происходит смена анионного состава вод с сульфатного на сульфатно-гидрокарбонатный, заметно понижается минерализация – с 0,6 до 0,4 г/л, на порядок ниже становятся концентрации тяжелых металлов.

Преимущественно отрицательный заряд глинистых минералов в зоне гипергенеза определяет осаждение на сорбционном глинистом барьере,

прежде всего, катиогенных элементов (Li, Sr, Ba), а также катиогенных комплексообразователей (Be, Zn, Cu, Pb, Cd и др.). Изучение равновесий в системе вода–порода техногенных вод вольфрамовых месторождений [4] показало почти повсеместное насыщение их относительно глинистых минералов (каолинит, монтмориллонит, бейделлит, иллит), наиболее благоприятные условия для образования и накопления которых создаются на участках с пониженными скоростями течения водных потоков (гидродинамический барьер). В таких местах сорбционный глинистый барьер характеризуется максимальной емкостью (рис. 5, з).

Особенностью испарительного геохимического барьера (рис. 5, в) является его зависимость от интенсивности выпадения осадков – периоды засух характеризуются накоплением компонентов на барьере, в случае выпадения дождей они, растворяясь, вновь поступают в раствор. Набор концентрируемых на испарительном барьере компонентов зависит от состава поступающих к нему вод.

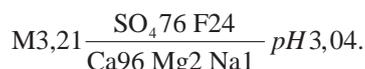
Геохимические барьеры редко встречаются в чистом виде, поскольку их формирование сопровождается проявлением различных геохимических процессов. Неудивительно в связи с этим распространение в пределах исследованных вольфрамовых и молибденовых месторождений комплексных геохимических барьеров, характеризующихся одновременным воздействием на осаждение определенных групп компонентов в зависимости от его вида. Изученные комплексные геохимические барьеры сформированы в результате наложения кислородного и сорбционного, кислородного, щелочного и сорбционного, а также гидродинамического и сорбционного барьеров.

Для полного очищения вод, как правило, воздействия таких стихийно образовавшихся барьеров бывает недостаточно, и поэтому прибегают к возведению искусственных геохимических барьеров, в качестве материалов для создания которых используют природные образования – горные породы, почвы, глинистые грунты и т. п., а также разнообразные техногенные отходы и смеси. Одним из таких примеров может служить успешное испытание в качестве наполнителя для «permeable reactive barrier» смеси торфа и нуль-валентного железа с известняком, проведенное корейскими и канадскими учеными [19].

Основой физико-химических методов, применяемых для очистки кислых рудничных вод, является повышение их щелочно-кислотного показателя pH на щелочном барьере, в качестве которого используют карбонатные породы [6, 7, 12]. Взаимодействие кислых сульфатных вод с карбонатами ведет к образованию труднорастворимых гидроксидов и при дальнейшем увеличении pH – карбонатов катиогенных элементов и элементов-комплексообразователей. Увеличение в водах концентраций OH^- и CO_3^{2-} с ростом pH способствует совместному действию щелочного гидролитического и щелочно-

го карбонатного барьеров. Новообразованный кальцит, гидроокислы железа и марганца активно сорбируют из воды тяжелые металлы, обуславливая тем самым значительное понижение их концентраций. Использование геохимических барьеров такого типа можно рекомендовать для очистки техногенных вод в случае возобновления эксплуатации Букукинского и Белухинского, а также начала эксплуатации Бугдаинского месторождений.

Нуждаются в такой доочистке и водные стоки на обрабатываемом в настоящее время Бом-Горхонском месторождении. Свидетельством тому служат физико-химические параметры вод, фильтрующихся из-под нижней дамбы хвостохранилища Бом-Горхонского рудника в реку Зун-Тигня. Формула их ионно-солевого состава имеет вид:



Концентрации тяжелых металлов составляют (г/л): Al – 0,24; Mn – 0,053; Fe – 0,10; Cu – 0,002; Zn – 0,15; Sr – 0,002; Cd – 0,002; Ce – 0,002; Th – 0,10.

Хорошие результаты по очистке всех видов сточных вод достигаются использованием водно-болотных экосистем, известных также как «ризосферные» и «фито-очистные» системы [20, 21] и являющихся, по сути, разновидностью биогеохимических барьеров. Такие системы широко развиты в биосфере и представляют собой накопление химических элементов растительными и животными организмами.

Примером эффективного естественного биогеохимического барьера может служить заболоченное и заросшее густой растительностью русло реки Сан-Джорджо в районе Иглесиенте (Италия), воды которой загрязняются дренажными стоками из-под отвалов сульфидного Pb-Zn месторождения [22].

В последние годы в мире это направление является очень перспективным, поскольку основано на использовании естественных процессов, происходящих внутри водоемов, при условии низкой стоимости и минимальных требований к обслуживанию. В английском языке технология очистки стоков с использованием водно-болотных экосистем известна как «constructed wetlands», «treatment wetlands», «wetland biofilter systems» или «reed bed systems». В прошлом по всему миру данная система применялась только для очистки муниципальных и бытовых сточных вод. В настоящее время многие страны стали внедрять ее для борьбы с шахтными дренажами, представляющими собой одну из самых серьезных проблем окружающей среды. Только в США на сегодняшний день насчитывается несколько сотен систем «constructed wetlands» с потоком более 380 м³/сутки каждая, используемых для очистки кислых шахтных вод [20].

Различают аэробные и анаэробные водно-болотные экосистемы [23]. В первом случае это неглубокие с поверхностным стоком болотные угодья, используемые для очистки слабокислых и нейтраль-

ных бескислородных шахтных вод с высокими содержаниями железа или марганца, окисляющихся и осаждающихся в виде гидроксидов на кислородном барьере аэробных болот. Недостатками этого метода являются ограниченное число извлекаемых компонентов и понижение pH вод.

Очищающее действие анаэробных водно-болотных экосистем, в случае поступления кислых сульфатных стоков, связано с бактериальным восстановлением сульфатов, конечный продукт которого – сероводород – реагирует с ионами металлов, осаждая их в виде нерастворимых сульфидов (восстановительный сероводородный барьер). При сооружении искусственных анаэробных водно-болотных экосистем для более эффективного очищения кислых вод и повышения их pH под биоразлагаемый органический субстрат помещают слой известняка, добываясь тем самым совместного действия сероводородного и щелочного барьеров. Эффективность очистки вод существенно возрастает в случае комбинирования аэробных и анаэробных водно-болотных экосистем. Все типы искусственных водно-болотных экосистем очень эффективны при удалении органических веществ и минеральных взвесей.

Аэробные и анаэробные водно-болотные экосистемы можно порекомендовать для очистки как кислых, так и слабощелочных и щелочных рудничных вод, формирующихся в пределах исследованных молибденовых и вольфрамовых месторождений.

Заключение

Результаты проведенных исследований показали существенные различия физико-химических характеристик техногенных вод, формирующихся в пределах нарушенных площадей молибденовых и вольфрамовых месторождений, связанные с особенностями состава их руд и вмещающих пород.

В районах Букукинского, Белухинского, Бом-Горхонского и Бугдаинского месторождений распространены кислые сульфатные воды с повышенной минерализацией и аномально высокими концентрациями тяжелых металлов, особенно Cd, Zn, Th, Mn и Al.

В пределах Спокойнинского, Шахтаминского и Жирекенского месторождений преимущественным развитием пользуются слабощелочные и щелочные воды гидрокарбонатного анионного состава с высокими содержаниями W, Mo, U и As.

Сравнение средних значений компонентов, характеризующихся максимально-аномальными содержаниями, с их ПДК в воде хозяйственно-питьевого назначения показало чрезвычайно высокий уровень загрязнения вод, что указывает на необходимость, в случае возобновления эксплуатации месторождений, проведения специальных мероприятий по их очистке.

Рассмотрены геохимические барьеры кислородного, щелочного и сорбционного типов, пользующиеся широким распространением в районах

исследований, даны рекомендации по использованию для очистки загрязненных вод комплексных физико-химических барьеров, а также аэробных и анаэробных водно-болотных экосистем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чечель Л.П. Основные формы водной миграции металлов в зоне гипергенеза вольфрамовых месторождений Агинского рудного узла (Восточное Забайкалье) // Вестник Камчатской региональной организации Учебно-научный центр. Серия: Науки о Земле. – 2009. – № 2. – Вып. 14. – С. 231–236.
2. Чечель Л.П. Неорганические формы миграции Fe, Mn, Ni, Co, Cd и Al в водах зоны гипергенеза вольфрамовых месторождений (Юго-Восточное Забайкалье) // Вода: химия и экология. – 2013. – № 1. – С. 108–114.
3. Замана Л.В., Чечель Л.П. Гидрогеохимия зоны техногенеза молибденовых месторождений Восточного Забайкалья // Современные проблемы гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии Евразии: Материалы Всероссийской конференции. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2015. – С. 409–413.
4. Чечель Л.П. Геохимические барьеры как фактор самоочищения дренажных вод отработанных вольфрамовых месторождений Восточного Забайкалья // Минералогия и геохимия ландшафта горнорудных территорий. Современное минералообразование: Труды IV Всероссийский симпозиум и X Всероссийские чтения памяти академика А.Е. Ферсмана. – Чита: Поиск, 2012. – С. 111–115.
5. Перельман А.И. Геохимия. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1989. – 528 с.
6. Naidu R., Birke V. Permeable reactive barrier – sustainable groundwater remediation. – London: CRC Press, 2014. – 115 p.
7. Pathirage U., Indraratna B. Assessment of optimum width and longevity of a permeable reactive barrier installed in an acid sulfate soil terrain // Canadian Geotechnical Journal. – 2015. – № 52 (7). – P. 999–1004.
8. Иванова Г.Ф. Геохимические условия образования вольфрамитовых месторождений. – М.: Наука, 1972. – 149 с.
9. Месторождения Забайкалья / под ред. акад. Н.П. Лаврова (в 2 кн.). – М.: Геоинформмарк, 1995. – Т. 1. – Кн. 1. – 192 с.
10. The Diavik Waste Rock Project: Persistence of contaminants from blasting agents in waste rock effluent / B.L. Bailey, L.J.D. Smith, D.W. Blowes, C.J. Ptacek L. Smith, D.C. Segó // Applied Geochemistry. – 2013. – V. 36. – P. 256–270.
11. Шварцев С.Л. Гидрогеохимия зоны гипергенеза. 2-е изд., исправл. и доп. – М.: Недра, 1998. – 366 с.
12. Крайнов С.Р., Рыженко Б.Н., Швеи В.М. Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты / под ред. академика Н.П. Лаврова. – М.: Наука, 2004. – 677 с.
13. A Site-Wide Perspective on Uranium Geochemistry at the Hanford Site / J. Zachara, S. Kelly, C. Brown, C. Liu, J. Christensen,

Работа выполнена в рамках проекта IX.137.1. 2. «Геохимия редких и редкоземельных элементов в природных и геотехногенных ландшафтах и гидрогеохимических системах».

- J. McKinley, J.A. Davis, J. Serne, E. Dresel, W.A. Um. – Richland (WA): US Department of Energy Publications, 2007. – 224 p. DOI: <http://dx.doi.org/10.2172/920206>.
14. Paktunc A.D. Mineralogical constraints on the determination of neutralization potential and prediction of acid mine drainage // Environmental Geology. – 1999. – № 2. – P. 103–112.
15. Assessment of the acid mine drainage potential of waste rocks at the Ak-Sug porphyry Cu-Mo deposit / N. Abrosimova, A. Edelev, S. Bortnikova, O. Gaskova, A. Loshkareva // Journal of Geochemical Exploration. – 2015. – V. 157. – P. 1–14.
16. Shvartsev S.L. Geochemistry of fresh groundwater in the main landscape zones of the Earth // Geochemistry International. – 2008. – № 46 (13) – P. 1285–1398.
17. Замана Л.В., Букаты М.Б. Формы миграции фтора в кислых дренажных водах вольфрамовых месторождений Восточного Забайкалья // Доклады Академии наук. – 2004. – Т. 396. – № 2. – С. 235–238.
18. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования: Гигиенические нормативы. ГН 2.1.5.1315-03. – М.: Минздрав РФ, 2003. – 154 с.
19. Jeen S.W., Bain J.G., Blowes D.W. Evaluation of mixtures of peat, zero-valent iron and alkalinity amendments for treatment of acid rock drainage // Applied Geochemistry. – 2014. – № 43. – P. 66–79.
20. Использование ризосферы для очистки сточных вод / В.Н. Диас, Е.А. Криксунов, Я.В. Панков, Е.Н. Перельгина, С.А. Бизин // Лесотехнический журнал. – 2015. – Т. 5. – № 3 (19). – С. 10–21.
21. Фито-системы для очистки сточных вод: современное решение экологических проблем / Н.М. Щеголькова, В.Н. Диас, Е.А. Криксунов, К.Ю. Рыбка // Наилучшие доступные технологии водоснабжения и водоотведения. – 2015. – № 2. – С. 50–59.
22. The role of natural biogeochemical barriers in limiting metal loading to a stream affected by mine drainage / G. Giudici, C. Pusceddu, D. Medas, C. Meneghini, A. Gianoncelli, V. Rimondi, F. Podda, R. Cidu, P. Lattanzi, R.B. Wanty, B.A. Kimball // Applied Geochemistry. – 2017. – V. 76. – P. 124–135.
23. Review of Passive Systems for Acid Mine Drainage Treatment / J. Skousen, C.E. Zipper, A. Rose, P.F. Ziemkiewicz, R. Nairn, L.M. McDonald, R.L. Kleinmann // Mine Water Environ. – 2017. – № 36. – P. 133–153. DOI: 10.1007/s10230-016-0417-1.

Поступила 25.04.2017 г.

Информация об авторах

Чечель Л.П., научный сотрудник лаборатории геоэкологии и гидрогеохимии Института природных ресурсов, экологии и криологии Сибирского отделения Российской академии наук.

UDC 550.424.4

ECOLOGICAL AND HYDROCHEMICAL CONSEQUENCES OF MINING TUNGSTEN AND MOLYBDENUM DEPOSITS OF THE EASTERN TRANSBAIKALIA

Larisa P. Chechel,
lpchechel@mail.ru

Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology of the Siberian branch of the Russian Academy of Sciences,
16^a, Nedorezov street, Chita, 672014, Russia.

The relevance of the topic is conditioned by the need to ensure environmental safety of mining production in connection with the pollution of surface and groundwater.

The main aim of the research is to study chemical composition of waters in technogenic reservoirs in the area of tungsten and molybdenum deposits; to detect the components groups characterized by abnormal content in waters; to consider the processes of technogenic waters purification on geochemical barriers and possibilities of their application in practice.

The methods used in the study. Chemical-analytical studies were carried out by conventional methods: turbidimetry (SO_4^{2-}), potentiometry (HCO_3^- , Cl^- , F^-), colorimetry (Si , P , NO_3^- , NH_4^+); cations and metals were determined by atomic absorption on the SOLAAR M6 spectrophotometer and mass spectrometry with inductively coupled plasma (ICP-MS) on the ELEMENT 2 device.

The results. The author has studied the peculiarities of chemical composition of water formed within the areas of molybdenum and tungsten deposits in Eastern Transbaikalia. Significant differences in their physico-chemical characteristics are shown. The most mineralized acidic, sulphate water with maximum content of heavy metals were recorded in the waters of tailings from processing plants, in drainage water of waste rock dumps and in ponds-sumps. The author allocated the groups of elements of greatest danger for aquatic ecosystems: Cd, Cu, Zn, Th, Mn, Al – in acidic waters, W, U, As, Mn – in alkaline waters. Oxygen, alkaline and sorption types of permeable reactive barriers were investigated in the areas of deposits. The possibility of using the complex geochemical barriers, as well as aerobic and anaerobic wetlands for treating contaminated water was discussed.

Key words:

Field mining, water pollution, heavy metals, permeable reactive barriers, water treatment.

The research was carried out within the project IX.137.1. 2. «Geochemistry of rare and rare earth elements in natural and geotechnogenic landscapes and hydrogeochemical systems».

REFERENCES

- Chechel L.P. The main forms of water migration of metals in the hypergenesis zone of tungsten deposits of Agin ore cluster (East Transbaikalia). *Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle*, 2009, no. 2, vol. 4, pp. 231–236. In Rus.
- Chechel L.P. Inorganic forms of migration of Fe, Mn, Ni, Co, Cd and Al in waters of hypergenesis zone of tungsten deposits (South-Eastern Transbaikalia). *Voda: khimiya i ekologiya*, 2013, no. 1, pp.108–114. In Rus.
- Zamana L.V., Chechel L.P. Hidrogeokhimiya zony tekhnogeneza molibdenovykh mestorozhdeniy Vostochnogo Zabaykalya [Hydrogeochemistry of the zone of technogenesis molybdenum deposits, Eastern Transbaikalia]. *Sovremennyye problemy gidrogeologii, inzhenernoy geologii i gidrogeologii Evrazii. Materialy Vserossiyskoy konferentsii* [Modern problems of hydrogeology, engineering geology and hydrogeology in Eurasia. Materials of all-Russian conference]. Tomsk, 2015. pp. 409–413.
- Chechel L.P. Geokhimicheskie baryery kak faktor samoочishcheniya drenaznykh vod otrabotannykh volframovykh mestorozhdeniy Vostochnogo Zabaykalia [Geochemical barriers as a factor of self-purification of drainage waters waste of tungsten deposits of East Transbaikalia]. *Mineralogiya i geokhimiya landshafta gornorudnykh territoriy. Sovremennoe mineraloobrazovanie. Trudy IV Vserossiyskiy simpozium i X Vserossiyskie chteniya pamyati akademika A.E. Fersmana* [Mineralogy and Geochemistry of landscape of the mining areas. Modern mineral formation. Proceedings of the IV all-Russian Symposium and the X all-Russian readings in memory of academician A.E. Fersman]. Chita, Poisk Publ., 2012. pp. 111–115.
- Perelman A.I. *Geokhimiya* [Geochemistry]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1989. 528 p.
- Naidu R., Birke V. *Permeable reactive barrier – sustainable groundwater remediation*. London, CRC Press, 2014. 115 p.
- Pathirage U., Indraratna B. Assessment of optimum width and longevity of a permeable reactive barrier installed in an acidsulfate soil terrain. *Canadian Geotechnical Journal*, 2015, no. 52 (7), pp. 999–1004.
- Ivanova G.F. *Geokhimicheskiye usloviya obrazovaniya volframitovykh mestorozhdeniy* [Geochemical conditions of formation of wolframite deposits]. Moscow, Nauka Publ., 1972. 149 p.
- Mestorozhdeniya Zabaykalya* [Deposits of Transbaikalia]. Ed. by N.P. Laverov. Moscow, Geoinformmark Publ., 1995. Vol. 1, B. 1, 192 p.
- Bailey B.L., Smith L.J.D., Blowes D.W., Ptacek C.J., Smith L., Sego D.C. The Diavik Waste Rock Project: Persistence of contaminants from blasting agents in waste rock effluent. *Applied Geochemistry*, 2013, no. 36, pp. 256–270.
- Shvartsev S.L. *Gidrogeokhimiya zony gipergeneza* [Hydrogeochemistry of the hypergenesis zone]. Moscow, Nedra Publ., 1998. 366 p.
- Kraynov S.R., Ryzhenko B.N., Shvets V.M. *Geokhimiya podzemnykh vod. Teoreticheskie, prikladnye i ekologicheskie aspekty* [Geochemistry of underground waters. Theoretical, applied and ecological aspects]. Ed. by N.P. Laverov. Moscow, Nauka Publ., 2004. 677 p.
- Zachara J., Kelly S., Brown C., Liu C., Christensen J., McKinley J., Davis J.A., Serne J., Dresel E., Um W.A. *A Site-Wide Perspective on Uranium Geochemistry at the Hanford Site*. Richland (WA), US Department of Energy Publications, 2007. 224 p. DOI: <http://dx.doi.org/10.2172/920206>.
- Paktunc A.D. Mineralogical constraints on the determination of neutralization potential and prediction of acid mine drainage. *Environmental Geology*, 1999, no. 2, pp. 103–112.

15. Abrosimova N., Edelev A., Bortnikova S., Gaskova O., Loshkareva A. Assessment of the acid mine drainage potential of waste rocks at the Ak-Sug porphyry Cu-Mo deposit. *Journal of Geochemical Exploration*, 2015, vol. 157, pp. 1–14.
16. Shvartsev S.L. Geochemistry of fresh groundwater in the main landscape zones of the Earth. *Geochemistry International*, 2008, no. 46 (13), pp. 1285–1398.
17. Zamana L.V., Bukaty M.B. Formy migratsii ftora v kislykh drenazhnykh vodakh volframovykh mestorozhdeniy Vostochnogo Zabaykalia [Forms of fluorine migration in acidic drainage waters of tungsten deposits of the Eastern Transbaikalia]. *Doklady Earth Sciences*, 2004, vol. 396, no. 2, pp. 235–238.
18. *Predelno dopustimye kontsentratsii (PDK) khimicheskikh veshchestv v vode vodnykh ob'ektov khozyaystvenno-pityevogo i kulturno-bytovogo vodopolzovaniya: Gigiyenicheskiye normativy. GN 2.1.5.1315-03* [The maximum permissible concentrations (MPC) of chemical substances in water of water objects of drinking and cultural-domestic water use: Hygienic standards]. Moscow, Minzdrav RF, 2003. 154 p.
19. Jeen S.W., Bain J.G., Blowes D.W. Evaluation of mixtures of peat, zero-valent iron and alkalinity amendments for treatment of acid rock drainage. *Applied Geochemistry*, 2014, no. 43, pp. 66–79.
20. Dias V.N., Kriksunov E.A., Pankov Ya.V., Perelygina E.N., Bizin S.A. Use of rhizosphere for wastewater treatment. *Le-sotekhnicheskii zhurnal*, 2015, vol. 5, no. 3 (19), pp. 10–21. In Rus.
21. Shchegolkova N.M., Dias V.N., Kriksunov E.A., Rybka K.Yu. Fito-sistemy dlya ochistki stochnykh vod: sovremennoye resheniye ekologicheskikh problem [Phyto-treatment systems for wastewater treatment: modern solution of environmental problems]. *Nai-luchshiy dostupnyye tekhnologii vodosnabzheniya i vodootvedeni-ya*, 2015, no. 2, pp. 50–59.
22. Giudici G., Pusceddu C., Medas D., Meneghini C., Gianoncelli A., Rimondi V., Podda F., Cidu R., Lattanzi P., Wanty R.B., Kimball B.A. The role of natural biogeochemical barriers in limiting metal loading to a stream affected by mine drainage. *Applied Geochemistry*, 2017, vol. 76, pp. 124–135.
23. Skousen J., Zipper C.E., Rose A., Ziemkiewicz P.F., Nairn R., McDonald L.M., Kleinmann R.L. Review of Passive Systems for Acid Mine Drainage Treatment. *Mine Water Environ*, 2017, no. 36, pp. 133–153. DOI: 10.1007/s10230-016-0417-1.

Received: 25 April 2017.

Information about the authors

Larisa P. Chechel, researcher, Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology of the Siberian branch of the Russian Academy of Sciences.

УДК 553.982

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТРУДНОИЗВЛЕКАЕМЫХ НЕФТЕЙ РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ

Яценко Ирина Германовна¹,
sric@ipc.tsc.ru

Полищук Юрий Михайлович¹,
yupolishchuk@gmail.com

¹ Институт химии нефти Сибирского отделения Российской академии наук,
Россия, 634055, Томск, пр. Академический, 4.

Актуальность работы определяется недостаточной изученностью особенностей физико-химических показателей и условий залегания трудноизвлекаемых нефтей, рассматриваемых в качестве основной базы прироста нефтедобычи в среднесрочной перспективе ввиду истощения запасов легкодоступных нефтей, что затрудняет оценку перспектив и определение направлений развития отечественного нефтегазодобывающего комплекса.

Цель работы: изучение особенностей физико-химических свойств и условий залегания трудноизвлекаемых нефтей Арктической зоны России, относящихся к различным классам качества (низкого, среднего и высокого).

Методы исследования: методы статистического анализа и классификации данных для исследования особенностей различных классов качества трудноизвлекаемых нефтей; методы геоинформационных систем для пространственного анализа данных о физико-химических характеристиках и условиях их залегания.

Результаты работы. Ввиду отсутствия в научной литературе данных о свойствах трудноизвлекаемых нефтей Арктики приведенные в статье новые результаты о свойствах таких нефтей определяют научную новизну работы. На основе предложенного авторами индекса качества и обобщенной классификации нефтей проведен анализ выборочной совокупности объемом почти 1500 образцов трудноизвлекаемых нефтей из месторождений Российской Арктики. Разработана карта-схема размещения трудноизвлекаемых нефтей различных классов качества в Арктической зоне России. Изучены особенности физико-химических свойств трудноизвлекаемых нефтей низкого, среднего и высокого качества. Показано, что при переходе от класса 1 к классу 3 плотность, содержание серы, смол и асфальтенов в среднем увеличиваются, а содержание попутного нефтяного газа в нефти в среднем уменьшается. Содержание парафинов в нефти среднего качества проявляет максимум по сравнению с нефтями 1 и 3 классов, для которых среднее содержание парафинов практически одинаково. Результаты исследования могут быть использованы при разработке новых и усовершенствовании существующих методов и технологий нефтедобычи, транспортировки и переработки нефтей с аномальными физико-химическими свойствами либо нефтей с осложненными условиями залегания, относящихся к различным классам качества.

Ключевые слова:

Трудноизвлекаемые нефти, классификация нефтей, нефтегазоносный бассейн, геоинформационные системы, физико-химические свойства нефтей, индекс качества нефти, классы качества нефти.

Введение

Интерес, проявляемый сегодня как арктическими (Россия, США, Канада, Норвегия и Дания от имени Гренландии), так и неарктическими государствами к освоению природных ресурсов Арктики, огромен [1–12]. В минерально-сырьевой базе Арктики углеводороды являются главной в ресурсно-экономическом отношении группой полезных ископаемых. Ввиду сложных горно-геологических и геокриологических условий большая часть запасов нефти на обширных северных территориях и в акваториях северных морей относятся к трудноизвлекаемым [13–19]. Недостаточная изученность особенностей физико-химических показателей и условий залегания трудноизвлекаемых нефтей (ТИН), рассматриваемых в качестве основной базы прироста нефтедобычи в среднесрочной перспективе ввиду истощения запасов легкодоступных нефтей, затрудняет оценку перспектив и определение направлений развития отечественного нефтегазодобывающего комплекса. В связи с этим целью работы явилось изучение особенностей физико-химических свойств и условий залегания трудноизвлекаемых нефтей Арктической зоны России.

Общая характеристика нефтегазовых ресурсов Российской Арктики

Территория Арктической зоны России с границами секторов и с наложением карты нефтегазоносного районирования представлена на рис. 1. В Арктическую зону России (АЗР) принято включать часть Республики Саха (Якутия), регионы Мурманской и Архангельской областей, архипелаг Новая Земля Архангельской области, территории Таймырского, Ненецкого, Ямало-Ненецкого и Чукотского АО, части Республики Карелии и Республики Коми, а также земли, острова, внутренние моря и континентальный шельф (рис. 1). Общая площадь этой зоны превышает 30 % территории России [6, 9].

Российская Арктика, являясь регионом особых геополитических, экономических, оборонных, научных и социально-экономических интересов Российской Федерации, представляет важный нефтегазовый резерв государства, требующий серьезного внимания и крупных инвестиций в ближайшие 10–15 лет. Согласно работе [5], в которой дана оценка перспектив нефтегазоносности Российской Арктики, на ее территории размещены 70,6 млрд т

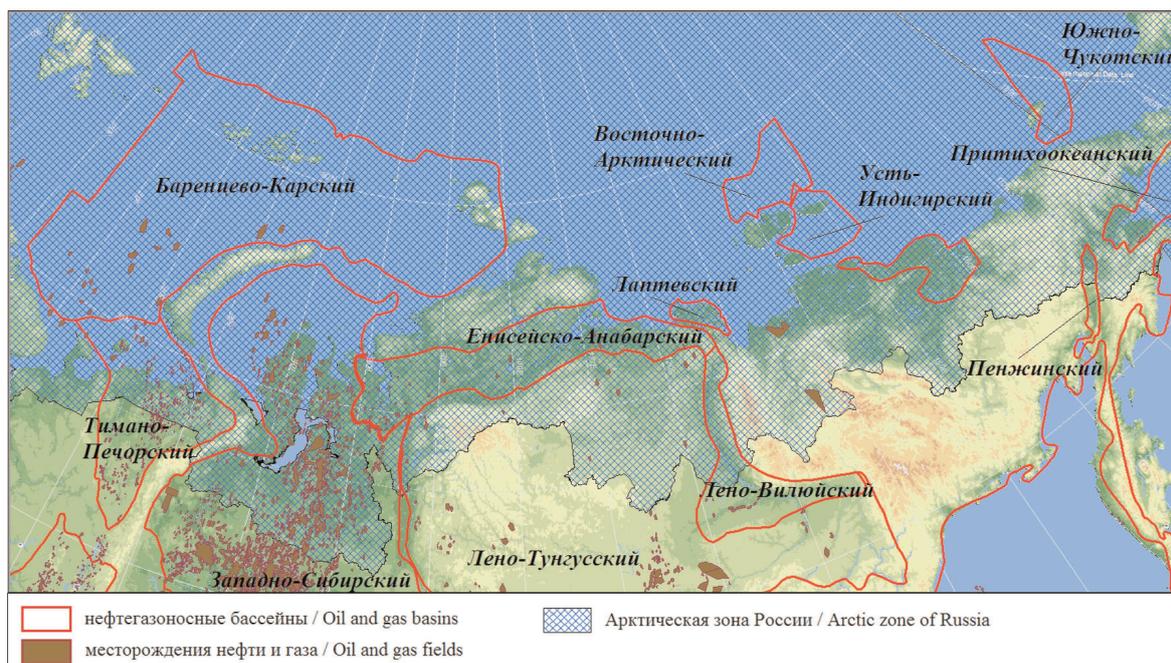


Рис. 1. Карта нефтегазоносности в Арктической зоне России

Fig. 1. Map of oil and gas potential in the Arctic zone of Russia

запасов нефти, 202, 2 трлн м³ запасов газа и 7,7 млрд т запасов конденсата, что в значительной степени обеспечивает будущее экономическое развитие страны.

Россия занимает одно из ведущих мест в мире среди арктических стран по своим запасам углеводородного сырья, доля которых составляет почти 3/4 от мировых арктических запасов. Согласно информации из базы данных (БД) по физико-химическим свойствам Института химии нефти СО РАН [20], в российской Арктике располагаются более 700 месторождений в границах Баренцево-Карского, Восточно-Арктического, Енисейско-Анабарского, Западно-Сибирского, Лено-Вилуйского, Лено-Тунгусского, Пенжинского, Притихоокеанского, Тимано-Печорского, Усть-Индигирского и Южно-Чукотского нефтегазоносных бассейнов. Созданная с применением геоинформационных технологий БД функционирует более двух десятилетий и содержит свыше 30000 описаний образцов нефтей мира, из которых почти 2900 образцов относятся к нефтям Арктической зоны России (из них около 1500 образцов трудноизвлекаемых нефтей).

Среди месторождений нефти на территории указанных нефтегазоносных бассейнов (НГБ) особо следует отметить уникальные и крупные по своим запасам месторождения: Пахтусовское в Баренцево-Карском бассейне, Уренгойское, Русское, Северо-Комсомольское, Суторминское, Ванкорское, Самбургское, Новопортовское и др. в Западно-Сибирском бассейне, Наульское, Возейское, Лаявожское, Харьягинское, Ярегское, Медыньское-Море и др. в Тимано-Печорском бассейне, Байкаловское в Енисейско-Анабарском бассейне,

Оленекское в Лено-Тунгусском бассейне и т. д. [20, 21].

Анализ размещения арктических трудноизвлекаемых нефтей различного качества

Согласно [15, 20], трудноизвлекаемые нефти разделяются на две большие группы: с аномальными физико-химическими свойствами нефтяного сырья и с осложненными геологическими условиями залегания. Вторую группу трудноизвлекаемых нефтей, согласно [15], составляют нефти, заключенные в геологически сложнопостроенных пластах и залежах, в водонефтяных и газонефтяных зонах, в слабопроницаемых и низкопористых коллекторах, с аномально высокой либо аномально низкой пластовой температурой, а также нефти, размещенные на территории многолетней мерзлоты и на шельфах арктических морей [16–18].

Рассмотрим кратко методические вопросы проведения исследований. В нашей работе [22] было предложено использовать комплексный показатель для оценки качественных характеристик нефтей в нефтяных залежах месторождений и нефтеносных бассейнов. Этот подход был успешно применен в [22–26] для оценки и анализа закономерностей пространственных изменений качественных показателей нефтей на нефтеносных территориях разных регионов, стран и континентов. Для проведения исследований качественных особенностей разных видов трудноизвлекаемых нефтей на основе комплексного показателя качества в [27] был предложен индекс качества нефтей, который оказался достаточно удобным для ранжирования разных типов трудноизвлекаемых нефтей по уровню качества. С использованием индекса каче-

ства на основе информации из БД в [20] разработана классификация трудноизвлекаемых нефтей, в соответствии с которой разные виды ТИН разделены на три класса качества:

- Класс 1 – нефть высокого качества;
- Класс 2 – нефть среднего качества;
- Класс 3 – нефть низкого качества.

Представленная классификация ТИН по качеству позволяет провести анализ особенностей физико-химических свойств ТИН, относящихся к разным классам качества, изучить географию залегания разных типов ТИН на нефтеносных территориях и разработать карто-схемы пространственного размещения ТИН разных классов качества. Для иллюстрации на рис. 2 представлено распределение арктических месторождений с трудноизвлекаемыми нефтями, относящихся к 1-му классу качества. Как видно из рис. 2, трудноизвлекаемые нефти указанного класса встречаются в 111 месторождениях – больше всего месторождений находится в Западно-Сибирском бассейне, 27 месторождений – в Енисейско-Анабарском бассейне, 16 – в Тимано-Печорском и по 4 месторождения – в Баренцево-Карском и Притихоокеанском бассейнах.

Анализ размещения месторождений АРЗ с трудноизвлекаемыми нефтями, относящимися ко 2 классу качества, показал, что месторождений с такой нефтью в Российской Арктике выявлено 140, в Баренцево-Карском и Лено-Тунгусском месторождений с нефтью 2 класса нет. Большинство таких месторождений находится в Западной Сибири – 82 месторождения, а в Тимано-Печорском бассейне – 49, Енисейско-Анабарском – 6 и Притихоокеанском – 3 месторождения.

Установлено, что всего на территории Арктической зоны России размещается 89 месторождений с ТИН 3 класса качества, которые отличаются аномальностью своих физико-химических свойств. Большинство месторождений выявлено в Тимано-Печорском бассейне (47), в Западно-Сибирском бассейне – 31, в Енисейско-Анабарском – 6, в Притихоокеанском – 3, в Лено-Тунгусском – 2 месторождения. В Баренцево-Карском бассейне месторождений с нефтью 3 класса не установлено.

Пространственный анализ размещения месторождений с нефтью различного качества показал, что в 4 бассейнах (Енисейско-Анабарском, Западно-Сибирском, Притихоокеанском и Тимано-Печорском) встречаются нефти всех 3 классов качества. В указанных бассейнах месторождения с такими нефтями следующие: в Енисейско-Анабарском – Мессояхское, в Западно-Сибирском – Барсуковское, Бованенковское, Вынгапуровское, Новопортовское, Русское, Северо-Варьганское, Северо-Губкинское, Северо-Комсомольское, Тазовское и Тарасовское, в Притихоокеанском бассейне таких месторождений два – Верхне-Телекайское и Верхне-Эчинское, в Тимано-Печорском – Медыньское-Море, Северо-Сарембойское, Седьягинское, Тобойское, Харьягинское и Южно-Торавейское.

Анализ особенностей физико-химических свойств трудноизвлекаемых нефтей различных классов качества

В табл. 1 представлены физико-химические свойства нефти 1-го класса качества. В среднем эти нефти легкие, с отрицательной температурой замерзания, но высоковязкие. В то же время они являются малосернистыми, малосмолистыми, малоасфальтовыми, среднепарафинистыми, с высоким содержанием нефтяного газа, обеднены содержанием тяжелых металлов и агрессивных компонентов (углекислота и сероводород).

Таблица 1. Физико-химические свойства арктических нефтей 1 класса качества

Table 1. Physical and chemical properties of Arctic oil of quality class 1

Физико-химические показатели Physical and chemical indicators	Среднее значение Average value	Объем выборки Sample size
Плотность, г/см ³ Density, g/cm ³	0,8326	58
Вязкость при 20 °С, мм ² /с Viscosity at 20 °C, mm ² /s	1694,34	34
Температура застывания, °С Gelation temperature, °C	-27,31	30
Содержание серы, мас. % Sulfur content, wt. %	0,24	41
Содержание парафинов, мас. % Paraffin content, wt. %	4,43	34
Содержание смол, мас. % Resin content, wt. %	5,70	29
Содержание асфальтенов, мас. % Asphaltene content, wt. %	0,61	17
Газосодержание, м ³ /т Gas content in oil, m ³ /t	861,61	15
Коксуемость, мас. % Conversion to coke, wt. %	1,19	3
Содержание ванадия, мас. % Vanadium content, wt. %	0,0022	26
Содержание никеля, мас. % Nickel content, wt. %	0,0009	23
Содержание углекислоты, мас. % Carbon dioxide content, wt. %	0,72	8
Содержание сероворода, мас. % Hydrogen sulfide content, wt. %	–	–

Приведем результаты анализа особенностей свойств трудноизвлекаемых нефтей, относящихся к классу среднего качества. Вычисленные средние значения физико-химических характеристик трудноизвлекаемых нефтей 2 класса представлены в табл. 2, в которой видно, что рассматриваемые нефти «среднего качества» значительно отличаются от свойств нефти 1 класса. Нефти 2 класса имеют большую плотность и относятся к нефтям со средней плотностью (от 0,84 до 0,88 г/см³) и с положительной температурой застывания (увеличение температуры в среднем на 34 °С). Вязкость нефти уменьшилась в 12 раз по сравнению с 1-м классом, но все равно остается достаточно высокой, что позволяет относить эти нефти к высоковязким.

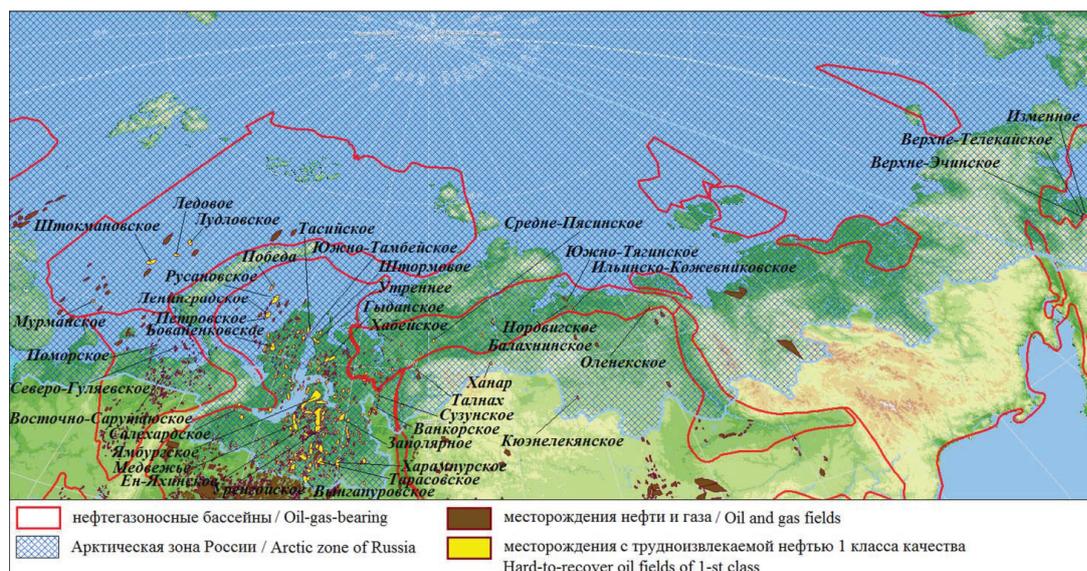


Рис. 2. Схема размещения месторождений с нефтью высокого качества в арктической зоне

Fig. 2. Layout of oil fields with high-quality oils in the Arctic

По содержанию серы, парафинов и асфальтенов наблюдается увеличение в 2 раза, никеля в 17 раз. Уменьшилось содержание смол (на 21 %), попутного нефтяного газа (в 9 раз) и ванадия.

Таблица 2. Физико-химические свойства арктических нефтей 2 класса качества

Table 2. Physical and chemical properties of Arctic oil of quality class 2

Физико-химические показатели Physical and chemical indicators	Среднее значение Average value	Объем выборки Sample size
Плотность, г/см ³ Density, g/cm ³	0,8477	463
Вязкость при 20 °С, мм ² /с Viscosity at 20 °C, mm ² /s	134,20	217
Температура застывания, °С Gelation temperature, °C	7,74	95
Содержание серы, мас. % Sulfur content, wt. %	0,49	389
Содержание парафинов, мас. % Paraffin content, wt. %	9,05	441
Содержание смол, мас. % Resin content, wt. %	4,52	330
Содержание асфальтенов, мас. % Asphaltene content, wt. %	1,35	292
Газосодержание, м ³ /т Gas content in oil, m ³ /t	91,94	374
Коксуемость, мас. % Conversion to coke, wt. %	1,80	22
Содержание ванадия, мас. % Vanadium content, wt. %	0,0014	34
Содержание никеля, мас. % Nickel content, wt. %	0,0161	32
Содержание углекислоты, мас. % Carbon dioxide content, wt. %	0,53	121
Содержание сероворода, мас. % Hydrogen sulfide content, wt. %	1,47	12

Таблица 3. Физико-химические свойства арктических нефтей 3 класса качества

Table 3. Physical and chemical properties of Arctic oil of quality class 3

Физико-химические показатели Physical and chemical indicators	Среднее значение Average value	Объем выборки Sample size
Плотность, г/см ³ Density, g/cm ³	0,9206	552
Вязкость при 20 °С, мм ² /с Viscosity at 20 °C, mm ² /s	1223,96	290
Температура застывания, °С Gelation temperature, °C	-4,87	98
Содержание серы, мас. % Sulfur content, wt. %	1,74	433
Содержание парафинов, мас. % Paraffin content, wt. %	3,87	287
Содержание смол, мас. % Resin content, wt. %	11,87	266
Содержание асфальтенов, мас. % Asphaltene content, wt. %	5,15	261
Газосодержание, м ³ /т Gas content in oil, m ³ /t	49,16	25
Коксуемость, мас. % Conversion to coke, wt. %	2,87	22
Содержание ванадия, мас. % Vanadium content, wt. %	0,0081	173
Содержание никеля, мас. % Nickel content, wt. %	0,0219	147
Содержание углекислоты, мас. % Carbon dioxide content, wt. %	0,67	9
Содержание сероворода, мас. % Hydrogen sulfide content, wt. %	0,76	5

Приведем результаты анализа свойств ТИН 3-го класса качества. Нефти этого класса по своим физико-химическим свойствам имеют значитель-

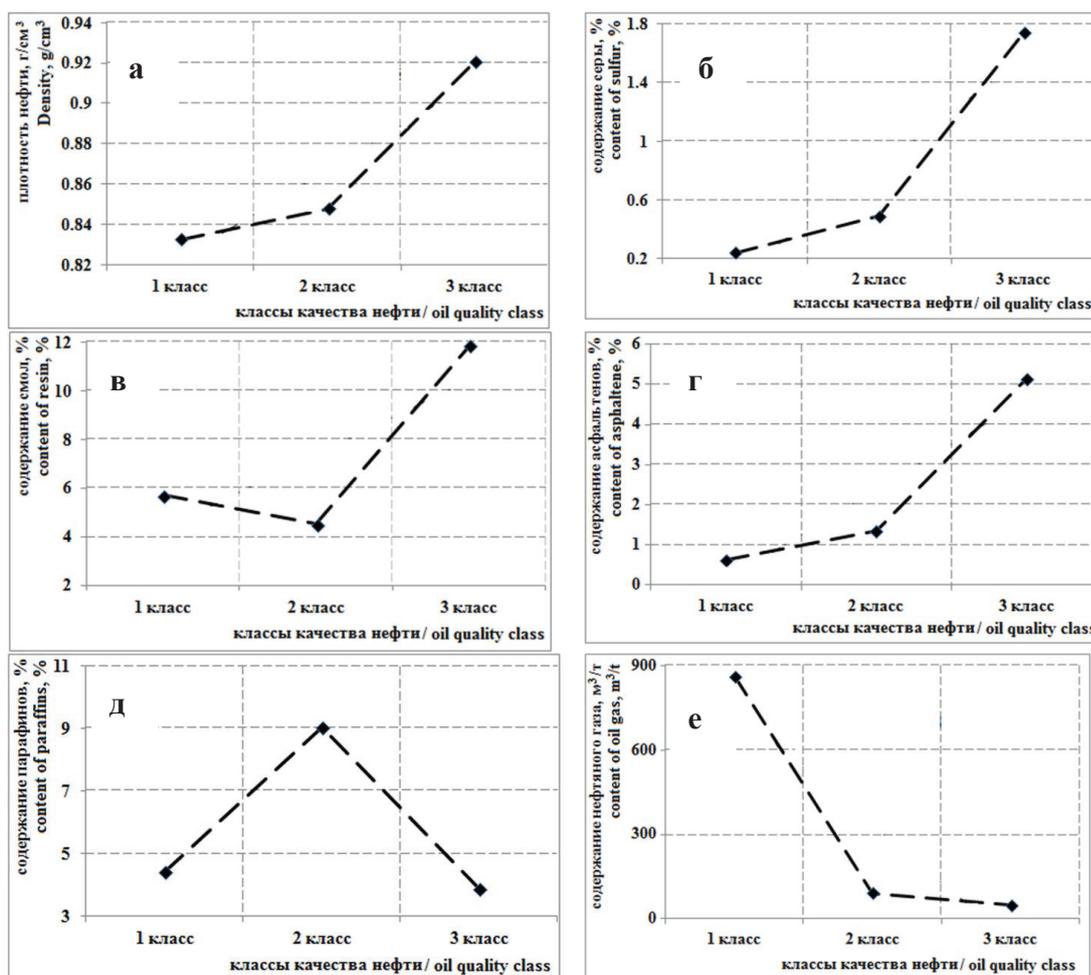


Рис. 3. Изменение плотности (а), содержания серы (б), смол (в), асфальтенов (г), парафинов (д) и нефтяного газа (е) в арктических нефтях в зависимости от класса качества

Fig. 3. Density (a), sulfur (б), resin (в), asphaltene (г), paraffins (д) and oil gas (e) in Arctic oils depending on quality class

ные отличия от свойств нефтей 1 и 2 классов. В среднем данные нефти тяжелые (с плотностью 0,92...0,96 г/см³), высоковязкие, сернистые (содержание серы 1,00...3,00 %), среднепарафинистые, среднесмолистые и среднеасфальтеновые, обеднены нефтяным газом, с высоким содержанием тяжелых металлов (табл. 3).

Проведем сравнительный анализ свойств нефтей разных классов. Результаты анализа представлены графически на рис. 3, где ромбики показывают средние значения анализируемых показателей. Как видно из рис. 3, тенденция увеличения плотности, содержания серы, смол, асфальтенов наблюдается при изменении класса качества нефти от «высокого» к «низкому» (рис. 3, а–г). Противоположная тенденция, а именно уменьшение среднего значения при изменении качества ТИН при переходе от 1-го класса к 3-му классу, отмечена на графике содержания попутного нефтяного газа (рис. 3, е). Содержание парафинов в нефти среднего качества проявляет максимум по сравнению с нефтями 1 и 3 классов, для которых среднее содержание парафинов практически одинаково (рис. 3, д).

Заключение

Представлены новые результаты исследования особенностей физико-химических свойств трудноизвлекаемых нефтей различных классов качества в Арктической зоне России. Анализ проведен с использованием обширного массива данных о свойствах нефти, полученных из базы данных Института химии нефти СО РАН. Объем выборки составил 2872 образца нефтей, более половины которых (около 1500) относилась к трудноизвлекаемым нефтям. С использованием предложенного авторами индекса качества массив данных о ТИН был разделен на 3 подмассива, включающих образцы ТИН высокого, среднего и низкого качества. Полученные данные использованы для разработки картосхемы размещения трудноизвлекаемых нефтей различных классов качества в Арктической зоне России. Для каждого из подмассивов данных были определены средние значения физико-химических характеристик, сопоставление которых позволило выявить особенности свойств ТИН разного качества. Показано, что плотность, содержание серы, смол и асфальтенов в среднем увеличиваются при

переходе от класса 1 к классу 3, а содержание попутного нефтяного газа в нефти в среднем уменьшается. Максимальное содержание парафинов обнаруживается у нефтей среднего качества по сравнению с нефтями 1 и 3 классов, для которых среднее содержание парафинов оказалось практически одина-

ковым. Результаты исследования могут быть использованы при разработке новых и усовершенствовании существующих методов и технологий нефтедобычи, транспортировки, а также для оценки перспектив и определения направлений развития отечественного нефтегазодобывающего комплекса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sidortsov R. A perfect moment during imperfect times: Arctic energy research in a low-carbon era // *Energy Research & Social Science*. – 2016. – V. 16. – P. 1–7.
2. Harsem O., Eide A., Heen K. Factors influencing future oil and gas prospects in the Arctic // *Energy Policy*. – 2011. – V. 39. – № 12. – P. 8037–8045.
3. Piskarev A.L., Shkatov M.Yu. Potential Oil-and-Gas Presence in the Sedimentary Basins of the Arctic Seas of Russia as Compared with the Largest Developed Basins of the World Ocean // *Developments in Petroleum Science*. – 2012. – V. 58. – P. 197–276.
4. Арктический вектор геологических исследований: нефтегазовые и минерально-сырьевые ресурсы / А.М. Асхабов, И.Н. Бурцев, С.К. Кузнецов, Н.Н. Тимонина // *Вестник Института геологии Коми НЦ Уро РАН*. – 2014. – № 9. – С. 3–10.
5. Конторович А.Э. Энергоресурсы Российского сектора Арктики, главные направления и методы их освоения // *Научно-технические проблемы освоения Арктики. Научная сессия Общего собрания членов РАН 16 декабря 2014 г.* – М.: Наука, 2014. – С. 31–39.
6. Бортников Н.С. Стратегические минеральные ресурсы российской Арктики и проблемы их освоения // *Научно-технические проблемы освоения Арктики. Научная сессия Общего собрания членов РАН 16 декабря 2014 г.* – М.: Наука, 2014. – С. 40–47.
7. Kaminsky V.D., Suprunenko O.I., Smirnov A.N. Mineral Resources of the Russian Arctic Continental Margin and Prospects for their Development // *The Arctic: ecology and economy*. – 2014. – № 3 (15). – С. 52–61.
8. Laverov N.P., Bogoyavlensky V.I., Bogoyavlensky I.V. Fundamental aspects of the rational development of oil and gas resources of the Arctic and Russian shelf: strategy, prospects and challenges // *The Arctic: ecology and economy*. – 2016. – № 2 (22). – P. 4–13.
9. Рудский В.В. Экология и природопользование российской Арктики: состояние, проблемы, перспективы // *Северный регион: наука, образование, культура*. – 2015. – № 2. – С. 187–198.
10. Ткачев Б.П. Риски природопользования нефтегазодобывающих регионов Севера (Арктика) // *Северный регион: наука, образование, культура*. – 2015. – № 2. – С. 210–215.
11. Kaminskii V.D., Suprunenko O.I., Suslova V.V. The continental shelf of the Russian Arctic region: the state of the art in the study and exploration of oil and gas resources // *Russian Geology and Geophysics*. – 2003. – V. 52. – № 8. – P. 760–767.
12. Geology and hydrocarbon resources of the continental shelf in Russian Arctic seas and the prospects of their development / A.E. Kontorovich, M.I. Erov, L.M. Burshtein, V.D. Kaminskii, A.R. Kurchikov, N.A. Malyshev, O.M. Prischeva, A.F. Safronov, A.V. Stupakova, O.I. Suprunenko // *Russian Geology and Geophysics*. – 2010. – V. 51. – № 1. – P. 3–11.
13. Пуртова И.П., Вариченко А.И., Шпуров И.В. Трудноизвлекаемые запасы нефти. Терминология. Проблемы и состояние освоения в России // *Наука и ТЭК*. – 2011. – № 6. – С. 21–26.
14. Ибраев В.И. Прогнозирование напряженного состояния коллекторов и флюидоупоров нефтегазовых залежей в Западной Сибири. – Тюмень: ОАО «Тюменский дом печати», 2006. – 208 с.
15. Лисовский Н.Н., Халимов Э.М. О классификации трудноизвлекаемых запасов // *Вестник ЦКР Роснедра*. – 2009. – № 6. – С. 33–35.
16. Халимов Э.М. Геотехнологии разведки и разработки нефтяных месторождений. *Избранные труды (1958–2000 гг.)*. – М.: ИГиРГИ, 2001. – 656 с.
17. Халимов Э.М. Концепция дифференцированной ставки налога на добычу полезных ископаемых // *Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений*. – 2004. – № 11. – С. 44–50.
18. Lukyanov E.E., Trenin Yu.A., Derevyagin A.A. Reliability of Geological and Geophysical Information for Oil Reserves Evaluation // *Electronic scientific journal «Oil and Gas Business»*. – 2008. – № 1. URL: http://www.ogbus.ru/authors/Lukyanov/Lukyanov_1.pdf (дата обращения: 26.02.2017).
19. Якуцени С.П. Распространенность углеводородного сырья, обогащенного тяжелыми элементами-примесями. Оценка экологических рисков. – СПб.: Изд-во «Недра», 2005. – 372 с.
20. Яценко И.Г., Полищук Ю.М. Трудноизвлекаемые нефти: физико-химические свойства и закономерности размещения / под ред. А.А. Новикова. – Томск: В-Спектр, 2014. – 154 с.
21. Polishchuk Yu.M., Yashchenko I.G. Heavy oils: Regularities of spatial distribution // *Neftyanoe Khozyaistvo – Oil Industry*. – 2006. – № 2. – P. 110–113.
22. Polichtchouk Y.M., Yashchenko I.G. Analysis of Eurasian oils quality // *Neftyanoe Khozyaistvo – Oil Industry*. – 2002. – № 1. – P. 66–68.
23. Полищук Ю.М., Яценко И.Г. Сравнительный анализ качества российской нефти // *Технологии ТЭК*. – 2003. – № 3. – С. 51–56.
24. Ибрагим Асаад М. Али, Бойченко С.В., Кочирко Б.Ф. Сравнительный анализ свойств нефтей месторождений Ирака, России и Украины // *Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-технические достижения и передовой опыт*. – 2013. – № 9. – С. 7–12.
25. Крицкая Е.Б., Чиж Д.В. Изучение изменений физико-химических параметров нефтей Предкавказья // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Химия. Биология. Фармация*. – 2013. – № 1. – С. 21–23.
26. Yashchenko I.G., Polishchuk Yu.M. Statistical Analysis of Quality of Hard-to-recover Oils // *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*. – 2015. – V. 326. – № 4. – P. 56–66.
27. Яценко И.Г., Полищук Ю.М. Сравнительный анализ качества трудноизвлекаемых нефтей // *Газовая промышленность*. – 2015. – № 5 (722). – С. 18–23.

Поступила 18.04.2017 г.

Информация об авторах

Яценко И.Г., кандидат геолого-минералогических наук, заведующая лабораторией «Научно-исследовательский информационный центр с музеем нефти» Института химии нефти Сибирского отделения Российской академии наук.

Полищук Ю.М., доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Института химии нефти Сибирского отделения Российской академии наук.

UDC 553.982

PHYSICO-CHEMICAL PROPERTIES OF HARD-TO-RECOVER OILS OF RUSSIAN ARCTIC

Irina G. Yashchenko¹,
sric@ipc.tsc.ru

Yuri M. Polishchuk¹,
yupolishchuk@gmail.com

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

The relevance of the work is determined by insufficient knowledge of the features of physical and chemical parameters and the conditions of occurrence of hard-to-recover oils, considered as the main base of oil production growth in the medium term due to the depletion of easily accessible oils, making it difficult to assess the prospects and identify the areas of development of domestic oil and gas complex.

The main aim of the research is to study the features of physical and chemical properties and the conditions of occurrence of hard oils of Arctic zone in Russia, belonging to different quality classes (low, medium and high).

The methods used in the study: methods of statistical analysis and classification of data for studying the characteristics of hard-to-recover oils of different classes of quality; methods of geographic information systems for spatial analysis of data on physical and chemical characteristics and the conditions of their occurrence.

The results. Due to the absence of the data on the properties of hard-to-recover oil in the Arctic in scientific literature, the new results on the properties of such oils in the article determine the scientific novelty of the work. Based on the proposed quality index and generalized classification of data the analysis was carried out in volume of almost 1,500 samples of hard-to-recover oils in the oilfields of Russian Arctic. The authors have developed the schematic map of placing hard-to-recover oils of different quality classes in the Arctic zone of Russia and studied the features of physicochemical properties of hard-to-recover oils of low, medium and high quality. It is shown that the growth of oil quality is accompanied by increasing in average density, the content of sulfur, asphaltene and resin and decreasing in average the content of oil gas. Wax content in oils of the 2nd class exhibits the maximum value compared with those of the first and third classes for which the average content of paraffins is almost equal. The research results can be used in development of new and improvement of existing methods and technologies of oil extraction, refining and transportation of oil with abnormal physical and chemical properties or the oils with complicated conditions of occurrence, belonging to different quality classes.

Key words:

Hard-to-recover oils, oil classification, oil-bearing basin, geoinformation systems, physical and chemical oil properties, index of oil quality, oil quality class.

REFERENCES

- Sidortsov R. A perfect moment during imperfect times: Arctic energy research in a low-carbon era. *Energy Research & Social Science*, 2016, vol. 16, pp. 1–7.
- Harsem O., Eide A., Heen K. Factors influencing future oil and gas prospects in the Arctic. *Energy Policy*, 2011, vol. 39, no. 12, pp. 8037–8045.
- Piskarev A.L., Shkatov M.Yu. Potential Oil-and-Gas Presence in the Sedimentary Basins of the Arctic Seas of Russia as Compared with the Largest Developed Basins of the World Ocean. *Developments in Petroleum Science*, 2012, vol. 58, pp. 197–276.
- Ashabov A.M., Burtsev I.N., Kuznetsov S.K., Timonina N.N. Arktichesky vektor geologicheskikh issledovaniy: neftegazovye i mineralno-syrevye resursy [Arctic vector of geological surveys: oil, gas and mineral resources]. *Vestnik Instituta geologii Komi NC Uro RAN*, 2014, no. 9, pp. 3–10.
- Kontorovich A.E. Energoresursy Rossiyskogo sektora Arktiki, glavnye napravleniya i metody ikh osvoeniya [Energy resources of the Russian sector of the Arctic, the main directions and methods of their development]. *Nauchno-tehnicheskie problemy osvoeniya Arktiki. Nauchnaya sessiya Obshchego sobraniya chlenov RAN 16 dekabrya 2014 g.* [Problems in the Arctic exploration. Scientific session of the meeting for the members of the RAS. 16 December 2014]. Moscow, Nauka Publ., 2014, pp. 31–39.
- Bortnikov N.S. Strategicheskie mineralnye resursy rossiyskoy Arktiki i problemy ikh osvoeniya [Strategic mineral resources of the Russian Arctic and problems of their development]. *Nauchno-tehnicheskie problemy osvoeniya Arktiki. Nauchnaya sessiya Obshchego sobraniya chlenov RAN 16 dekabrya 2014 g.* [Problems in the Arctic exploration. Scientific session of the meeting for the members of the RAS. 16 December 2014]. Moscow, Nauka Publ., 2014, pp. 40–47.
- Kaminskiy V.D., Suprunenko O.I., Smirnov A.N. Mineral Resources of the Russian Arctic Continental Margin and Prospects for their Development. *The Arctic: ecology and economy*, 2014, no. 3 (15), pp. 52–61.
- Laverov N.P., Bogoyavlenskiy V.I., Bogoyavlenskiy I.V. Fundamental aspects of the rational development of oil and gas resources of the Arctic and Russian shelf: strategy, prospects and challenges. *The Arctic: ecology and economy*, 2016, no. 2 (22), pp. 4–13.
- Rudskiy V.V. Ekologiya i prirodopolzovanie rossiyskoy Arktiki: sostoyanie. Problemy, perspektivy [Ecology and nature management of the Russian Arctic: status, problems, prospects]. *Severnyy region: nauka, obrazovanie, kultura*, 2015, no. 2, pp. 187–198.
- Tkachev B.P. Riski prirodopolzovaniya neftegazodobyvayushchikh regionov Severa (Arktika) [Risks of environmental management of oil and gas producing regions of the North (the Arctic)]. *Severnyy region: nauka, obrazovanie, kultura*, 2015, no. 2, pp. 210–215.
- Kaminskiy V.D., Suprunenko O.I., Suslova V.V. The continental shelf of the Russian Arctic region: the state of the art in the study and exploration of oil and gas resources. *Russian Geology and Geophysics*, 2003, vol. 52, no. 8, pp. 760–767.
- Kontorovich A.E., Epov M.I., Burshtein L.M., Kaminskiy V.D., Kurchikov A.R., Malyshev N.A., Prischepa O.M., Safronov A.F., Stupakova A.V., Suprunenko O.I. Geology and hydrocarbon resources of the continental shelf in Russian Arctic seas and the

- prospects of their development. *Russian Geology and Geophysics*, 2010, vol. 51, no. 1, pp. 3–11.
13. Purtov I.P., Varichenko A.I., Shpurov I.V. Trudnoizvlekaemye zapasy nefi. Terminologiya. Problemy i sostoyanie osvoeniya v Rossii [The reserves of hard-to-recover oil. Terminology. Problems and the state of development in Russia]. *Nauka i TJeK*, 2011, no. 6, pp. 21–26.
 14. Ibraev V.I. Prognozirovaniye napryazhennogo sostoyaniya kollektorov i flyuidoprovov neftegasovykh zalezhey v Zapadnoy Sibiri [Prediction of the stress state of collectors and immobile fluid of oil and gas deposits in Western Siberia]. Tyumen, Tyumenskiy dom pechati Publ., 2006. 208 p.
 15. Lisovskiy N.N., Khalimov E.M. O klassifikazii trudnoizvlekaemykh zapasov [Classification of difficult oil]. *Vestnik ZKR Rosndra*, 2009, no. 6, pp. 33–35.
 16. Khalimov E.M. Geotekhnologii razvedki i razrabotki neftyanykh mestorozhdeniy [Geotechnology of exploration and development of oil fields]. *Izbrannyye trudy (1958–2000 gg.)* [Selectas 1958–2000]. Moscow, IGIRGI Publ., 2001. 656 p.
 17. Khalimov E.M. Kontseptsiya differentsirovannoy stavki naloga na dobychu poleznykh iskopaemykh [The concept of differentiated tax rate on mining mineral]. *Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanykh i gazovykh mestorozhdeniy*, 2004, no. 11, pp. 44–50.
 18. Lukyanov E.E., Trenin Yu.A., Derevyagin A.A. Reliability of Geological and Geophysical Information for Oil Reserves Evaluation. *Electronic scientific journal «Oil and Gas Business»*, 2008, no. 1. URL: http://www.ogbus.ru/authors/Lukyanov/Lukyanov_1.pdf (accessed 26 February 2017).
 19. Yakutseni S.P. Rasprostranennost uglevodorodnogo syr'ya, obogshchennogo tyazhelymi elementami-primesyami. Ozenka ekologicheskikh riskov [Prevalence of hydrocarbons enriched with heavy elements impurities. Environmental risk assessment]. St-Petersburg, Nedra Publ., 2005. 372 p.
 20. Yashchenko I.G., Polishchuk Yu.M. Trudnoizvlekaemye nefi; fiziko-khimicheskie svoystva i zakonomernosti razmeshcheniya [Hard-to-recover oil: physico-chemical properties and patterns of distribution]. Ed. by A.A. Novikov. Tomsk, V-Spektr Publ., 2014. 154 p.
 21. Polishchuk Yu.M., Yashchenko I.G. Heavy oils: Regularities of spatial distribution. *Neftyanoe Khozyaistvo – Oil Industry*, 2006, no. 2, pp. 110–113.
 22. Polichtchouk Y.M., Yashchenko I.G. Analysis of Eurasian oils quality. *Neftyanoe Khozyaistvo – Oil Industry*, 2002, no. 1, pp. 66–68.
 23. Polishchuk Yu.M., Yashchenko I.G. Sravnitelnyy analiz kachestva rossiyskoy nefi [Comparative analysis of the quality of Russian oil]. *Tekhnologii TEK*, 2003, no. 3, pp. 51–56.
 24. Ibrahim Asaad M. Ali, Boychenko S.V., Kochirko B.F. Sravnitelnyy analiz svoystv neftey mestorozhdeniy Iraka, Rossii i Ukrainy [Comparative analysis of the properties of the oil fields of Iraq, Russia and Ukraine]. *Refining and Petrochemicals. Scientific and technical achievements and advanced experience*, 2013, no. 9, pp. 7–12.
 25. Kritskaya E.B., Chizh D.V. Izuchenie izmeneniy fiziko-khimicheskikh parametrov neftey Predkavkaz'ya [Study of changes in physico-chemical parameters of oil of the Caucasus]. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Chemistry. Biology. Pharmacy*, 2013, no. 1, pp. 21–23.
 26. Yashchenko I.G., Polishchuk Yu.M. Statistical Analysis of Quality of Hard-to-recover Oils. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2015, vol. 326, no. 4, pp. 56–66. In Rus.
 27. Yashchenko I.G., Polishchuk Yu.M. Sravnitelnyy analiz kachestva trudnoizvlekaemykh neftey [Comparative analysis of quality of hard-to-recover oils]. *Gazovaya Promyshlennost*, 2015, no. 5 (722), pp. 18–23.

Received: 18 April 2017.

Information about the authors

Irina G. Yashchenko, Cand. Sc., head of the laboratory, Institute of Petroleum Chemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

Yuri M. Polishchuk, Dr. Sc., professor, principal researcher, Institute of Petroleum Chemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

УДК 621.762

ВИБРОСТОЙКИЕ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИЕ ПОРИСТЫЕ ПРОНИЦАЕМЫЕ СВС-МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ОКАЛИНЫ ЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ И ДОБАВКАМИ ФЕРРОСИЛИЦИЯ

Коломеец Максим Александрович¹,
kolomeets.m@yandex.ru

Мельберт Алла Александровна²,
aamelbert@mail.ru

Маецкий Александр Владимирович²,
maetsky@rambler.ru

Новосёлова Татьяна Васильевна³,
tatnovos@mail.ru

Тубалов Николай Павлович²,
manemale@mail.ru

Яковлева Ольга Владимировна⁴,
yakovlevaoly@mail.ru

¹ Алтайский государственный медицинский университет,
Россия, 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 40.

² Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
Россия, 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46.

³ Политехнический институт (филиал) Донского государственного технического университета,
Россия, 347904, г. Таганрог, ул. Петровская, 109-а.

⁴ Восточно-Казахстанский государственный технический университет им Д. Серикбаева,
Казахстан, 070004, г. Усть-Каменогорск, ул. Протозанова, 69.

Постоянно возрастающий интерес к практическому использованию пористых проницаемых металлокерамических материалов в машиностроении обусловлен необходимостью выпуска устройств для очистки газообразных выбросов в атмосферу от вредных веществ.

Пористые проницаемые материалы, получаемые с использованием технологий самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС), открытого академиком А.Г. Мержановым и описанного научными школами СФУ (г. Красноярск), НГТУ (г. Новосибирск), АлтГТУ (г. Барнаул) и др., обладают целым рядом преимуществ. К основным из них можно отнести следующие: низкая энергоёмкость получения, возможность использования отходов машиностроения и металлургии, изготовление фильтров с высокими физико-механическими качествами и функциональными свойствами. Фильтры для очистки отработавших газов, полученные по СВС-технологиям, обладая достаточной механической прочностью на сжатие и изгиб, ударной вязкостью, коррозионной стойкостью при использовании на энергетических и автотранспортных средствах, подвержены разрушениям от вибраций.

Целью исследования является создание вибростойких металлокерамических пористых проницаемых материалов на основе окалины легированной стали, оксидов цветных металлов, алюминия и ферросилиция, полученных с применением СВС-технологий методом подбора состава шихты.

Результаты. Базовыми компонентами шихты являются Fe_2O_3 (окалина легированной стали) + Al_2O_3 (электрокорунд) + Al . Выбранный состав шихты получения проницаемых металлокерамических материалов на основе этих реагентов с добавлением (5–20) % CrO_2 (или Se_2O_3), Cr , Ni и (0,5–1,5) % $FeSi$ (ферросилиция) позволяет получить виброустойчивый материал для фильтров отработавших газов на транспорте. Увеличение содержания по массе в % в указанных пределах компонентов, участвующих в синтезе (Fe_2O_3 , Cr , Ni , и $FeSi$), приводит к увеличению модуля упругости, что увеличивает жесткость получаемых материалов.

Ключевые слова:

СВС-материал, оксиды металлов, мелкозернистость, модуль упругости, виброустойчивость.

Введение

Пористые проницаемые металлокерамические материалы (ПММ), получаемые с использованием технологий самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) [1], описанного научными школами СФУ (г. Красноярск), НГТУ (г. Новосибирск), АлтГТУ (г. Барнаул) и др. [2–8], обладают

целым рядом преимуществ. К основным из них можно отнести следующие: получение СВС-продукта без энергозатрат, возможность использования отходов машиностроения и металлургии, изготовление фильтров с высокими физико-механическими качествами и функциональными свойствами.

Поскольку фильтрующие элементы отработавших газов работают в условиях различных по амплитудам и частотным параметрам колебательных процессов – это предопределяет высокий уровень динамических напряжений, возникающих в ПММ.

Поэтому фильтры, полученные по СВС-технологиям, обладая достаточными механической прочностью на сжатие и изгиб, ударной вязкостью, коррозионной стойкостью при использовании на энергетических и автотранспортных средствах, должны обладать вибростойкостью до 150...400 Гц [9–16].

Для установления механизма вибрации воспользуемся определением для вибро смещения и виброускорения. Вибро смещение – максимальные границы перемещения контролируемой точки (макроэлемента фильтра) в процессе вибрации относительно оси, параллельной сечению фильтра. Виброускорение характеризует силовое динамическое взаимодействие элементов внутри фильтрующего элемента, вызванное внешним воздействием со стороны динамической системы.

Экспериментально вышеуказанные физические величины, а также амплитуда, частота и разность фаз определяются измерителем вибрационных параметров ИВП-1 и спектрометром-индикатором СИ-1. Аналитически вибро смещение осуществляется путем расчета динамической системы для определения сил инерции, действующих в связке двигатель–фильтр. При заданных граничных условиях по разным осям для цилиндрической модели методом конечных элементов (МКЭ) получаем распределение перемещений (на торцах фильтра смещение равно нулю). Положение любого элемента фильтра в системе двигатель–фильтр определяется координатами его центра масс и углом поворота элемента относительно глобальной системы координат, а динамическое поведение многомассовой механической системы описывается уравнением Лагранжа для систем с голономными связями в вариационной форме [11].

Проблема повышения вибростойкости СВС-материалов может быть частично решена путем подбора состава шихты. Основу получаемой шихты СВС-материалов составляют порошки окалина легированной стали, некоторых металлов и неметаллов, а также их оксиды.

Получение пористых металлокерамических материалов

С целью повышения механических свойств пористых материалов (модулей упругости, механических напряжений на изгиб, сжатие, виброустойчивость) в качестве исходных основных продуктов взята окалина легированной стали 18Х2Н4МА (содержащая 0,18 % углерода, 4 % никеля и 1 % молибдена), кристаллический порошок Al_2O_3 (корунд) и порошок алюминия (табл. 1).

Исходя из обеспечения физико-механических и функциональных показателей разработан состав шихты с содержанием Cr, Cr_2O_3 , Ni и FeSi.

Таблица 1. Базовый состав шихты

Table 1. Batch basic composition

Материал, масс. m% Material, wt. %	Состав, масс. % Compound, wt. %
Окалина легированной стали 18Х2Н4МА Oxide alloy steel 18Х2Н4МА	30–60
Оксид алюминия Al_2O_3 (корунд) Aluminium oxide Al_2O_3 (corundum)	30–45
Алюминий АСД-1 Aluminium ASD-1	8–15

Окалина использовалась в виде порошка с фракциями 60–125 мкм, а электрокорунд и алюминий с фракциями 50–60 мкм. При этом форма зерна была округлая (угловатая форма зерна имеет недостаточную реакционную способность, что ухудшает качество конечного продукта). Количественное соотношение компонентов исходных материалов взято из расчета термосинтеза при 950–1050 °С без плавления составляющих шихты.

Так как СВС – разновидность горения, то для инициирования реакции используется электрическая спираль или дуга. Реакция идет с выделением тепла $\sim 4 \cdot 10^6$ Дж/кг, с температурой горения 1500–1900 К, скорость горения (распространения фронта горения) $(1,5–2,0) \cdot 10^{-3}$ м/с.

Процесс СВС происходит в тонком слое смеси исходных реагентов и распространяется по всей системе. При этом получается металлокерамический материал с образованием поровой структуры [17, 18], которая формируется за счет перераспределения расплава в реакционной зоне и десорбции газов [5–6].

При СВ-синтезе перераспределение атомов кристаллической структуры происходит в масштабах порядка межатомных расстояний, т. е. возникают т. н. фазовые переходы упорядочения. Кристаллическая решетка неупорядоченной фазы распадается на несколько подрешеток, в каждой из которых концентрация отличается от средней по сплаву. В реальных сплавах Fe-Al переход в эту фазу при понижении температуры происходит в два этапа. Сначала при более высокой температуре происходит фазовый переход доупорядочения ($FeAl \rightarrow Fe_3Al$). Согласно диаграмме состояния системы Fe-Al алюминий с железом образует твердые растворы, интерметаллические соединения и эвтектику. В системе существуют твердые фазы Fe_3Al (β_1), $FeAl$ (β разупорядоченная), (β_2 упорядоченная), Fe_2Al_3 (ϵ), $FeAl_2$ (ξ), $FeAl_3$ (θ), Fe_3Al_5 (η). Преимуществом сплавов на основе Fe_3Al является высокая стойкость против окисления и сульфидной коррозии, а недостатком – низкотемпературная хрупкость, обусловленная насыщением сплава водородом, образующимся при взаимодействии алюминия с парами воды из воздуха и воды, входящей в состав кристаллов корунда.

В структуре конечного продукта проявляется феррит в виде полей размерами от 10 до 300 мкм. А сам механизм образования ферритных полей включает стадии расплавления исходного феррита

окалины, образования первичных зародышей в результате реакции восстановления, а затем их объединения в протяженные области при фазоразделении.

Характерной особенностью СВС-процесса с базовым составом шихты $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Al}$ является образование керамического каркаса из кристаллического оксида алюминия [5, 6]. Одновременно происходит восстановление железа с последующей коалесценцией жидкой фазы железа вокруг твердого каркаса из $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{O}_4-\text{Al}_2\text{O}_3$. Эти макроформирования в результате интенсивного отвода тепла и газораспределения меняют свою форму и увеличивают размер пор. Микроструктура такого продукта описана в [7, 19].

Полученный пористый материал, предлагаемый как фильтрующий элемент, имел предел прочности при сжатии 2–7 МПа, общую пористость ~50 %, а сообщающиеся между собой поры округлой и продолговатой формы имели размеры ~ (20–200) мкм, но могли достигать и 400 мкм.

Для увеличения механической прочности и вибростойкости ПММ в указанную выше исходную шихту тройной системы были введены оксиды хрома и Cr.

Реакционная смесь, содержащая до 60 % (масс) окалины стали и до 20 % (масс) оксида хрома (IV) в результате СВС-процесса дает пористый материал, поровая структура которого формируется при реакции за счет перераспределения расплава в реакционной зоне и десорбции газов с поверхности порошковых материалов шихты. При этом введение оксидов хрома повышает температуру горения (за счет реакции замещения), а значит, дает более равномерный расплав. Параллельное протекание реакций между алюминием и оксидом хрома (IV), а также между алюминием и окалиной приводит к образованию в структуре продукта состава $\text{FeO} (\text{Al}_2\text{O}_3)$.

Основу продукта составляет металлический хром, интерметаллическое соединение Cr_3Al_8 , а также оксид алюминия.

Неравномерное распределение фаз по объему образцов, вызванное фазоразделением при структурообразовании (неблагоприятные для механических свойств) устраняется введением хрома до 14 % (масс) в шихту. Хром относится к эвтектичнообразующим и α -стабилизирующим элементам по отношению к более легкоплавким металлам. Этими факторами определяются особенности структуры продуктов, полученные при СВС в системе.

Экспериментальная часть

С увеличением массовой доли хрома Cr с 5,33 до 8,0 % в шихте значение коэффициента жесткости материала в образце возрастает в 1,12 раза и зависимость имеет линейный характер [9]. Увеличение содержания хрома в системе не приводит к существенному изменению фазового состояния конечного продукта реакции. При введении в си-

стему Cr структура становится более однородной за счет большего объема зафиксированного β -твердого раствора, образующего вместе с α -фазой микроструктуру игольчатого типа.

Введение хрома [5, 9] приводит к более равномерному распределению металлического компонента в каркасе продукта, выравниванию микротвердости и параметра кристаллической решетки твердого раствора, т. е. позволяет добиться более однородного распределения структурных составляющих в основе СВС-материала.

Введение никеля в указанную выше реакционную смесь замедляет скорость реакции и соответственно замедляет разделение по фазам, а значит, за счет растекания при горении позволяет гомогенизировать твердожидкую реакционную область, что приводит к уменьшению пор, увеличению вибростойкости и механической прочности на сжатие до 11 МПа. Кроме того, он увеличивает термостойкость и, что существенно, коррозионную стойкость ПММ [9].

Для увеличения механической прочности и виброустойчивости СВС-материала в состав введен ферросилиций (0,5–1,5) % по массе, содержащий (70–75) % кремния.

Введение ферросилиция приводит к раскислению расплава и очищает расплав от оксидов (шлаков), т. е. рафинирует продукт, а самому материалу придает мелкозернистую структуру, что приводит к увеличению прочности и виброустойчивости при эксплуатации [9, 20–25]. Микроструктура базового состава с содержанием Cr (10 %), Cr_2O_3 (15 %) и FeSi (1,0 %) представлена на рис. 1, а, а структура, содержащая Ni (10 %), – на рис. 1, б. Белое включение в структуре идентифицировано как интерметаллическое соединение Cr_3Al_8 , серое – NiAl, темное – Fe, черное – поры. Фазовый состав для СВС-продукта с микроструктурой, показанной на рис. 1, б, представлен на рис. 2. В итоге ферросилиций повышает механическую прочность продукта на изгиб и на сжатие до (10–12) МПа, а частоты колебаний, соответствующие их разрушению, сдвигаются в область (460–520) Гц [9, 20–25], что соответствует частотам с минимальными амплитудами вибросмещений и не вызывает расшатывание структуры пористого материала СВС-фильтра.

При повышении содержания железа в исходной шихте на поверхности его частиц в ходе протекания СВС-процесса образуется слой интерметаллического соединения, повышение локальной концентрации Fe в растворе-расплаве продолжается до уровня предельной растворимости, при этом идет процесс реакционного растворения тугоплавкого компонента расплавом легкоплавких.

Рентгенофазный анализ для СВС-продукта с микроструктурой (рис. 1, б) для базового состава шихты с добавками проводился на основании международной базы данных PDWN. Значения двойного угла дифракции 2θ (градусы), межплоскостные расстояния d ($d_{\text{ст}}$ – эталонное значение, d_{ex} –

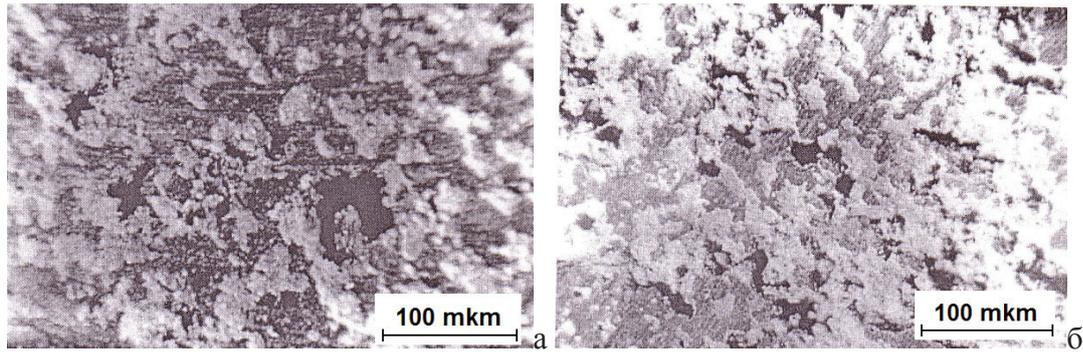


Рис. 1. Микроструктура продукта базового состава шихты с добавками: а) Cr, Cr₂O₃, FeSi; б) Cr, Cr₂O₃, Ni, FeSi
Fig. 1. Microstructure of the base composition of the charge with additives: а) Cr, Cr₂O₃, FeSi; б) Cr, Cr₂O₃, Ni, FeSi

экспериментальное значение, Ангстрем) при использованном дифракционном максимуме, равном 1, представлены в табл. 2.

Таблица 2. Значения двойного угла дифракции 2θ (градусы) и межплоскостных расстояний d (Å) для разных фаз СВС-продукта

Table 2. Values of double angle of diffraction 2θ (degrees) and interplanar spaces d (Å) for different phases of the SHS-product

Fe (6-696)			F ₃ O ₄ (1-111)			Al ₂ O ₃ (5-712)		
2θ°	d _{st.} Å	d _{exr.} Å	2θ°	d _{st.} Å	d _{exr.} Å	2θ°	d _{st.} Å	d _{exr.} Å
44,633	2,0268	2,03	35,451	2,53	2,50	35,136	2,552	2,56
65,021	1,4332	1,43	37,12	2,42	2,40	57,518	1,601	1,60
			53,546	1,71	1,70	25,584	3,479	3,46
Cr ₇ Al ₈ (29-15)			NiAl (44-1188)			Si (2-561)		
2θ°	d _{st.} Å	d _{exr.} Å	2θ°	d _{st.} Å	d _{exr.} Å	2θ°	d _{st.} Å	d _{exr.} Å
33,862	2,645	2,66						
37,104	2,421	2,40	44,377	2,0413	2,04	47,305	1,92	1,90
51,739	1,7654	1,77	64,549	1,4437	1,44	56,402	1,63	1,64
47,318	1,9195	1,92						

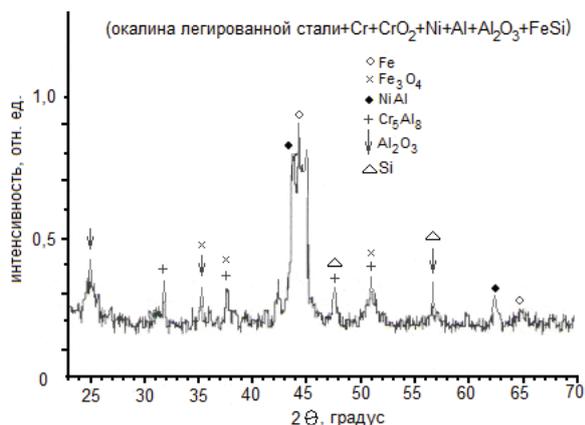


Рис. 2. Рентгенограмма состава шихты (табл. 1) с добавками Cr, Cr₂O₃, Ni и FeSi

Fig. 2. Radiographs of the charge composition (table 1) with additions of Cr, Cr₂O₃, Ni, FeSi

При проведении экспериментальных исследований было обнаружено, что частоты собственных колебаний лежат в области 2,9–3 Гц, в то время как частоты вынужденных колебаний, соответ-

ствующие максимальным ускорениям, лежат в интервале от 400 до 500 Гц. Частота собственных колебаний определяется стандартным методом через коэффициент жесткости, модуль упругости, измеряемый стандартными приборами, и геометрические параметры образцов.

Из этого следует, что при совпадении частот вынужденных колебаний с частотами собственных колебаний в материале фильтров появляются микротрещины и возникает большое число концентраторов напряжений, которые развиваются и через 300–350 часов работ могут привести к разрушению в виде отдельных кусков. При частотах, соответствующих частотам с максимальными ускорениями, происходит разрушение материалов повсеместно по границам зерен компонентов шихты.

С ростом содержания окалины железа наблюдается рост значения модуля упругости. С ростом содержания в шихте Fe₂O₃ с 44 до 52 % по массе модуль упругости возрастает с 104·10³ до 118,25·10³ МПа или при росте содержания Fe₂O₃ на 9 % модуль упругости возрастает на 13,7 % по своей величине. Рост модуля упругости нельзя считать значительным, но он сказывается и на изменении частот собственных колебаний образцов. Это выражается в том, что с ростом содержания в шихте Fe₂O₃ в указанных пределах происходит рост частот собственных колебаний на 0,194 Гц или на 6,7 %, а виброремещение, нежелательное при эксплуатации материала в качестве фильтра, в зависимости от содержания оксида железа носит нелинейный характер. На рис. 3 представлена зависимость виброремещения от массового содержания оксида железа.

Рост содержания Cr по массе с 5,33 до 8 % привел к увеличению модуля упругости материала в изделии с 170·10³ до 190·10³ МПа и на 11,6 %. При этом рост частоты собственных колебаний материала в изделии составил всего 1 %. На рис. 4 дана зависимость виброремещения от массового содержания хрома.

Оксид хрома Cr₂O₃ участвует в металловосстановительных реакциях с окалиной стали в СВС-процессе. При увеличении содержания Cr₂O₃ в шихте свыше 17,5 % по массе происходит снижение механической прочности материала за счет об-

разования раковин и «свищей» в пористой структуре.

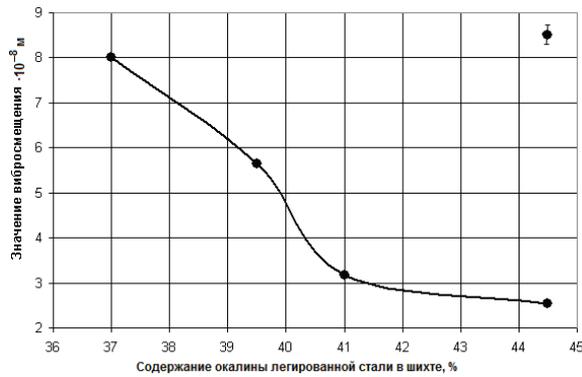


Рис. 3. Зависимость вибросмещения от содержания в шихте окалины легированной стали

Fig. 3. Dependence of vibration displacement on the content of scale alloy steel in the charge

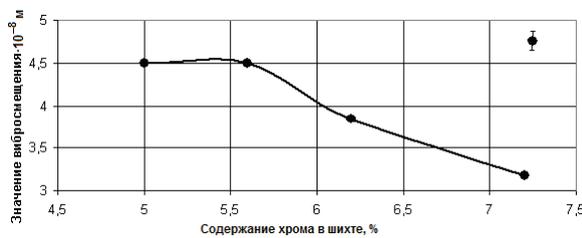


Рис. 4. Зависимость вибросмещения от содержания в шихте хрома

Fig. 4. Dependence of vibration displacement on chromium content in the charge

Проведена оценка влияния изменения концентрации Cr_2O_3 в составе шихты на характеристики СВС-материалов. Обнаружено, что при изменении содержания Cr_2O_3 в шихте с 16 до 19,8 % по массе модуль упругости по своему значению уменьшается на 12,7 %. На рис. 5 дана зависимость вибросмещения от массового содержания Cr_2O_3 .

Частота собственных колебаний образцов из рассматриваемых материалов при указанном изменении содержания Cr_2O_3 в шихте снижается приблизительно на 6 % (с 3,05 до 2,87 Гц).

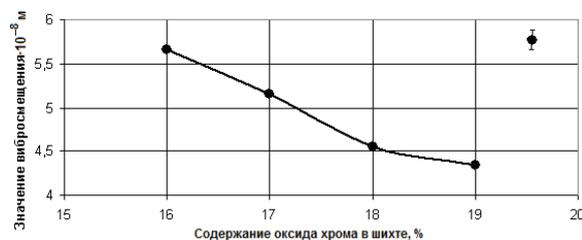


Рис. 5. Зависимость вибросмещения от содержания в шихте оксида хрома

Fig. 5. Dependence of vibration displacement on chromium oxide content in the charge

Ранее [5, 6] при исследовании систем Ni-Al-Fe экспериментально было обнаружено, что присутствие в системе никеля способствует увеличению прочности материалов, повышает их коррозион-

ную стойкость, термостойкость, снижает величину среднего приведенного диаметра пор и повышает их упорядоченность.

Структурные исследования показали, что легирование Ni системы Ni-Al-Fe приводит к образованию твердого раствора на основе интерметаллического соединения Ni-Al.

При инициации горения происходит плавление алюминия и его растекание по каналам среды дисперсных компонентов шихты и одновременно начинается растворение Ni и насыщение им раствора.

В результате экспериментальных и расчетных исследований на стандартных образцах было обнаружено, что частоты собственных колебаний в диапазоне изменения соотношения Ni/Al в % по массе от 0,24 до 0,97 изменяются незначительно с 3,02 до 3,01 Гц. В то же время значение «опасных» частот разрушения от виброускорений имеет диапазон изменений от 420 до 490 Гц.

При увеличении концентрации Ni в шихте в % по массе в образцах происходит рост модуля упругости. В нашем случае при изменении концентрации Ni в шихте с 5 до 13,6 % по массе наблюдалось увеличение значения модуля упругости на 10,2 %. Это приводило к увеличению жесткости образцов пропорционально. При замещении никелем алюминия частота их собственных колебаний практически не изменилась. На рис. 6 дана зависимость вибросмещения от содержания никеля.

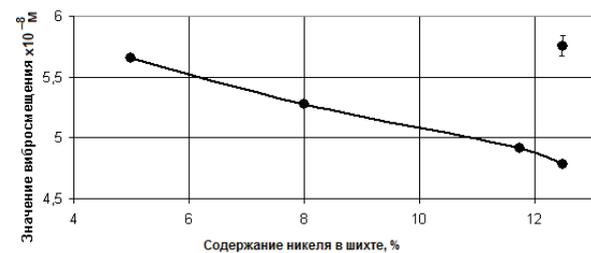


Рис. 6. Зависимость вибросмещения от содержания в шихте никеля

Fig. 6. Dependence of vibration displacement on nickel content in the charge

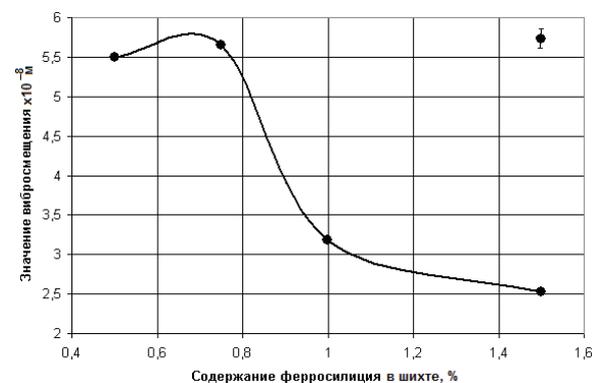


Рис. 7. Зависимость вибросмещения от содержания в шихте ферросилиция

Fig. 7. Dependence of vibration displacement on ferrosilicium content in the charge

На рис. 7 дана зависимость вибро смещения от содержания ферросилиция. Установлено, что при увеличении концентрации ферросилиция с 0,5 до 15 % по массе приводит к экстремальной зависимости виброразрушения от частоты и достигает 480 Гц.

Таблица 3. Влияние содержания компонентов в составе шихты на характеристики СВС-материалов

Table 3. Influence of concentration of components in the charge composition on characteristics of SHS materials

Компоненты, характеристики, свойства и величины Components, characteristics, properties and values	Варианты СВС-материала Options of SHS-material			
Содержание компонентов в шихте, в % по массе Content of components in the charge, in wt. %				
Окалина легированной стали 18Х2Н4МА (порошок) Oxide alloy steel 18X2H4MA (powder)	39,5	39,5	39,5	39,5
Оксид хрома/Chromium oxide	18,0	18,0	18,0	18,0
Хром ПХ-1/Chrome PKh-1	5,6	5,6	5,6	5,6
Никель ПНК-ОТ-1/Nickel PNK-OT-1	12,4	12,4	12,4	12,4
Алюминий АСД-1/Aluminium ASD-1	15,1	15,1	15,1	15,1
Оксид алюминия (электрокорунд) (α -Al ₂ O ₃) Aluminum oxide (electrocorundum) (α -Al ₂ O ₃)	8,9	8,65	8,4	7,9
Ферросилиций (порошок FeSi) Ferrosilicium (FeSi powder)	0,5	0,75	1,0	1,5
Характеристики пористого материала Characteristics of porous material				
Средний диаметр пор, мкм Average pore diameter, micrometer	180	155	135	110
Извилистость пор/Pore tortuosity	1,15	1,18	1,24	1,36
Удельная поверхность, м ² /г Specific surface, m ² /g	118	108	87	83
Пористость, %/Porosity, %	0,47	0,42	0,38	0,28
Физико-механические свойства/Physico-mechanical properties				
Механическая прочность на сжатие, МПа Mechanical strength in compression, MPa	13,6	12,6	11,1	10,5
Механическая прочность на изгиб, МПа Mechanical bending strength, MPa	4,4	4,2	3,9	3,2
Ударная вязкость, Дж/м ² Impact strength, J/m ²	0,285	0,275	0,270	0,155
Частота собственных колебаний, f ₀ , Гц Natural frequency, f ₀ , Hz	2,946	3,015	3,049	3,101
Значение вибро смещения при f ₀ , м·10 ⁻⁸ Value of vibration displacement at f ₀ , m·10 ⁻⁸	5,50	5,65	3,18	2,53
Значение максимальной виброскорости при f ₀ , Z·10 ⁻⁴ м/с Maximum vibration velocity at f ₀ , Z·10 ⁻⁴ m/s	5,00	3,54	1,99	1,58
Значение максимального Z, м/с ² Maximum Z value, m/s ²	3,00	2,12	1,19	0,49
Максимальное виброускорение, g Maximum vibration acceleration, g	17,65	17,35	12,03	11,56
Значение частоты разрушения, Гц Frequency of destruction, Hz	440	430	440	480

В табл. 3 приведено содержание компонентов шихты и свойства полученных СВС-материалов.

Выводы

Многообразие способов получения материалов методом СВС на базе нескольких основных реагентов, входящих в шихту, позволяет вводить в её состав в различных количествах вещества металлов и неметаллов. При этом базовыми компонентами шихты являются Fe₂O₃ (окалина легированной стали) + Al₂O₃ (электрокорунд) + Al. Выбранная модель получения ПММ на основе этих реагентов с добавлением в малых количествах (0,5–1,5) % CrO₂ (или Cr₂O₃), Cr, Ni и незначительной добавки (0,5–1,5) % FeSi (ферросилиция) позволяет получить виброустойчивый материал для фильтров отработавших газов на транспорте.

Восстановление железа в реакции Fe₂O₃+Al₂O₃+Al и коалесценция расплава железа вокруг жесткого остова из Fe-Fe₃O₄-Al₂O₃ с образованием кристаллизующихся формаций с элементами Cr, Ni приводит при интенсивном теплоотводе и давлении расширяющегося газа к изменению размеров пор и их формы.

Определены физико-механические характеристики СВС-материалов с различным содержанием компонентов, и экспериментально установлены диапазоны частот колебаний, опасные с точки зрения их разрушения:

- увеличение концентрации в шихте Fe₂O₃ с 35 до 45,0 % по массе приводит к увеличению частот собственных колебаний образцов на 5,26 %, а диапазон частот разрушения увеличивается на 15 % и достигает 460 Гц;
- увеличение концентрации Ni в шихте с 5 до 12,5 % по массе приводит к незначительному снижению частот собственных колебаний образцов, а диапазон опасных частот разрушения увеличивается на 16,6 % и достигает 490 Гц;
- увеличение концентрации оксида хрома с 16 до 19 % по массе приводит к снижению резонансных виброускорений с 2,16 до 1,82 g, а диапазон опасных частот разрушения увеличивается с 415 Гц и достигает 470 Гц;
- увеличение массовой доли Cr в шихте с 5,33 до 8 % приводит к снижению максимальных виброускорений с 1,72 до 1,52 g, а диапазон опасных частот разрушения увеличивается с 400 Гц и достигает 460 Гц;
- увеличение концентрации ферросилиция с 0,5 до 15 % по массе приводит к экстремальной зависимости виброразрушения от частоты и достигает 480 Гц.

Увеличение содержания по массе в указанных пределах участвующих компонентов в синтезе (Fe₂O₃, Cr, Ni, и FeSi) приводит к увеличению модуля упругости, что увеличивает жесткость получаемых материалов, а вот увеличение оксида хрома приводит к снижению жесткости материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мержанов А.Г. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез: 20 лет поисков и находок. – Черногловка: ИС-МАН, 1989. – 91 с.
2. Интегральные технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза / В.В. Евстигнеев, Б.М. Вольпе, И.В. Милокова, Г.В. Сайгутин. – М.: Высшая школа, 1996. – 274 с.
3. Влияние высокоэнергетических воздействий на микроструктуру синтезированной металлокерамики / В.Е. Овчаренко, О.П. Солоненко, А.Е. Чесноков, В.М. Фомин // Письма в ЖТФ. – 2012. – Т. 39. – № 21. – С. 77–94.
4. Высокотемпературный синтез металлокерамического сплава в порошковой смеси механически активированных металлических компонентов / В.Е. Овчаренко, О.В. Лапшин, О.П. Солоненко, А.Е. Чесноков, В.М. Фомин // Взаимодействие высококонцентрированных потоков энергии с материалами в перспективных технологиях и медицине: Материалы IV Всероссийской конференции. – Новосибирск, 2011. – С. 229–233.
5. Тубалов Н.П., Лебедева О.А., Верещагин В.И. Пористые композиционные керамические материалы, полученные самораспространяющимся высокотемпературным синтезом в системе $Fe_3O_4-Al_2O_3-Al$ // Новые огнеупоры. – 2003. – № 9. – С. 40–42.
6. Верещагин В.И., Тубалов Н.П., Евстигнеев В.В. СВС-технология изготовления пористых проницаемых материалов // Новые огнеупоры. – 2005. – № 6. – С. 61–65.
7. Тубалов Н.П., Лебедева О.А. Структура и эксплуатационные свойства пористых металлокерамических материалов на основе окалины легированных сталей // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Т. 311. – № 2. – С. 142–146.
8. Abu-Jrai A., Tsolakis A., Megaritis A. The influence of H_2 and CO on diesel engine combustion characteristics, exhaust gas emissions, and after treatment selective catalytic NOx reduction // Hydrogen Energy. – 2007. – № 15. – P. 3565–3571.
9. Коломеец М.А., Тубалов Н.П., Новоселов А.Л. Вибрация каталитических фильтров нейтрализаторов отработавших газов дизелей // Ползуновский вестник. – 2012. – № 3. – С. 7–10.
10. Hamada T., Kadano K., Funabiki M. Development of non-Ni low H_2S Pt/Rh/CeO₂ TWC Catalyst // SAE Techn. Pap. Ser. – 1990. – № 900611. – P. 1–8.
11. Вербилов А.Ф., Ковалев В.В., Беляев Л.Н. Расчет динамических перемещений методом временных конечных уравнений // Проблемы совершенствования энергетических установок: сб. ст. под ред. д.т.н., профессора А.А. Мельберт. – Барнаул, 2008. – С. 10–18.
12. Charakterisierung der Partikelemission von modernen Verbrennungsmotoren / S. Aufdenblatten, K. Schänzlin, A. Bertola, M. Mohr // MTZ: Motortecn. Z. – 2002. – № 11. – P. 962–966.
13. Bell A.T. The impact of nanoscience on heterogeneous catalysis // Science. – 2003. – V. 299. – P. 1688–1691.
14. Büchling J. Der neue D-CAT-Motor von Toyota // MTZ: Motortecn. Z. – 2003. – № 12. – P. 1002–1003.
15. Runhua T., Ying C., Bao L. Complex nonlinear mathematical model for a kind of shock absorbers // Chin. J. Mech. Eng. – 1999. – № 1. – P. 32–39.
16. Elsener M., Geering H., Jaussi F. Aufbau und Vermessung eines De NOx – systems auf der Basis von Harnstoff-SCR // MTZ: Motortecn. Z. – 2003. – № 11. – P. 966–971.
17. Chun N.L., Shyan L.C. Combustion synthesis of aluminum nitride powder using additives // J. Mater. Res. – 2001. – V. 16 – P. 2200–2208.
18. Shyan L.C., Chun H.L. Combustion Synthesis of Aluminum Nitride: a review // Key Eng. Mat. – 2012. – V. 521 – P. 101–111.
19. Besmann T.M., Gallois B.M. Structure of porous metal-ceramic materials // MRS Symp. Proc. – Pittsburgh, PA: Materials Research Society, 1990. – P. 168–172.
20. Влияние технологии изготовления пористого композиционного материала каталитического нейтрализатора отработавших газов дизелей на его микроструктуру / Н.Н. Горлова, М.А. Коломеец, Г.В. Медведев, А.А. Ситников // Ползуновский вестник. – 2014. – № 4. – С. 200–203.
21. Получение пористых проницаемых металлокерамических СВС-материалов с использованием руд полиметаллов взамен редкоземельных элементов / А.Е. Бакланов, М.С. Канапинов, С.А. Малашина, Т.В. Новосёлова, А.А. Ситников, Н.П. Тубалов // Ползуновский вестник. – 2016. – № 2. – С. 205–212.
22. Новосёлова Т.В., Медведев Г.В., Горлова Н.Н. Влияние компонентов руды титанита на структуру каталитического материала в нейтрализаторах, используемых для очистки отработавших газов // Инновационные технологии в науке и образовании: V Международная научно-практическая конференция. – Чебоксары, 2016. – № 1. – С. 90–94.
23. СВС-материалы для очистки отработавших газов дизелей / А.Е. Бакланов, О.Е. Бакланова, М.С. Канапинов, С.Б. Канапинов, А.В. Маецкий, Т.В. Новосёлова, А.А. Ситников, Н.П. Тубалов. – Усть-Каменогорск: ВКГУ, 2016. – 132 с.
24. Разработка и создание пористых фильтрующих металлокерамических СВС-материалов с использованием руд полиметаллов / А.Е. Бакланов, М.С. Канапинов, С.А. Малашина, Т.В. Новосёлова, А.А. Ситников, Н.П. Тубалов // Аспекты развития науки, образования и модернизации промышленности: Региональная научно-практическая конференция. – Таганрог, 2016. – С. 51–55.
25. Создание вибростойких металлокерамических пористых проницаемых СВС-материалов на основе окалины легированной стали / А.Е. Бакланов, М.С. Канапинов, С.А. Малашина, М.А. Коломеец, Т.В. Новосёлова, А.А. Ситников, Н.П. Тубалов // Аспекты развития науки, образования и модернизации промышленности: Региональная научно-практическая конференция. – Таганрог, 2016. – С. 55–59.

Поступила 25.04.2017 г.

Информация об авторах

Коломеец М.А., проректор по информатизации Алтайского государственного медицинского университета.

Мельберт А.А., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой безопасности жизнедеятельности Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

Маецкий А.В., кандидат технических наук, программист 1 категории кафедры строительства автомобильных дорог и аэродромов Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

Новосёлова Т.В., старший преподаватель кафедры технологии машиностроения Политехнического института (филиала) Донского государственного технического университета.

Тубалов Н.П., доктор технических наук, профессор кафедры наземных транспортно-технологических систем Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

Яковлева О.В., старший преподаватель кафедры приборостроения и автоматизации технологических процессов Восточно-Казахстанского государственного технического университета им. Д. Серикбаева.

UDC 621.762

VIBRATION-RESISTANT POROUS PERMEABLE METAL-CERAMIC SHS-MATERIALS BASED ON OXIDES OF ALLOY STEELS AND FERROSILICIUM ADDITION

Maksim A. Kolomeets¹,
kolomeets.m@yandex.ru

Alla A. Melbert²,
aamelbert@mail.ru

Alexander V. Maetsky²,
maetsky@rambler.ru

Tatyana V. Novoselova³,
tatnovos@mail.ru

Nikolay P. Tubalov²,
manemale@mail.ru

Olga V. Yakovleva⁴,
yakovlevaoly@mail.ru

¹ Altai State Medical University,
40, Lenin Avenue, Barnaul, 656038, Russia.

² Polzunov Altai State Technical University,
46, Lenin Avenue, Barnaul, 656038, Russia.

³ Polytechnic Institute (branch) of Don State Technical University,
109a, Petrovskaya street, Taganrog, 347904, Russia.

⁴ East Kazakhstan State Technical University,
69, Protozanov street, Ust-Kamenogorsk, 070004, Kazakhstan.

Constantly growing interest in practical use of porous permeable ceramic-metal materials in mechanical engineering is caused by the need to manufacture devices for cleaning gaseous emissions into the atmosphere from harmful substances.

Porous permeable materials obtained by using self-propagating high-temperature synthesis (SHS), discovered by academician A.G. Merzhanov and described by scientific schools of the Siberian Federal University (Krasnoyarsk), Novosibirsk State Technical University (Novosibirsk), Altai State Technical University (Barnaul) and others, have a number of advantages, such as: low energy consumption when obtaining, possibility of using wastes of engineering and metallurgy, production of filters with high physical-mechanical properties and functional properties. The filters obtained by SHS have sufficient mechanical strength in compression and flexural strength, toughness, corrosion resistance, but when they are used in energy and motor vehicles, they are susceptible to damage from vibration and shock.

The aim of the study is to develop vibration-resistant porous permeable metal-ceramic materials based on alloy steel oxides, non-ferrous metal oxides, aluminum and ferrosilicon obtained by using the SHS technology by methods of selection of charge composition, control modes of technological process of production.

The results. The basic components of the charge are Fe_2O_3 (oxide alloy steel) + Al_2O_3 (corundum) + Al. The selected model for obtaining materials on the basis of these reagents with addition of small amounts (5...20) % of CrO_2 (or Ce_2O_3), Cr, Ni and minor additives (0,5...1,5) % of FeSi (ferrosilicon) allows obtaining vibration-proof material to filter exhaust gas in transport. The increase in the content by mass within the above limits of the components, involved in the synthesis (Fe_2O_3 , Cr, Ni and FeSi), leads to the growth in elasticity modulus, which increases the rigidity of the resulting materials.

Key words:

SHS-material, metal oxides, fineness, modulus of elasticity, vibration resistance.

REFERENCES

1. Merzhanov A.G. *Samorasprostranyayushchiysya vysokotemperaturny sintez: 20 let poiskov i nakhodok* [Self-propagating high-temperature synthesis: 20 years of search and discovery]. Chernogolovka, ISMAN Publ., 1989. 91 p.
2. Evstigneev V.V., Volpe B.M., Milyukova I.V., Saygutin G.V. *Integralnye tekhnologii samorasprostranyayushchegosya vysokotemperaturnogo sinteza* [Integral technologies of self-propagating high-temperature synthesis]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1996. 274 p.
3. Ovcharenko V.E., Solonenko O.P., Chesnokov A.E., Fomin V.M. Vliyaniye vysokoenergeticheskikh vozdeystviy na mikrostrukturu sintezirovannoy metallokeramiki [Influence of high-energy impacts on microstructure of synthesized metal ceramics]. *Pisma v ZhTF*, 2012, vol. 39, no. 21, pp. 77–94.
4. Ovcharenko V.E., Lapshin O.V., Solonenko O.P., Chesnokov A.E., Fomin V.M. Vysokotemperaturny sintez metallokeramicheskogo splava v poroshkovoy smesi mekhanicheski aktivirovannykh metallicheskikh komponentov [High-temperature

- synthesis of metal-ceramic alloy in the powder mixture mechanically activated metal components]. *Materialy IV Vserossiyskoy konferentsii «Vzaimodeystvie vysokokontsentririvannykh potokov energii s materialami v perspektivnykh tekhnologiyakh i meditsine»* [Proc. 4th All-Russian Conf. Interaction between high-concentrated energy fluxes and materials in promising technologies and medicine]. Novosibirsk, 2011. pp. 229–233.
5. Tubalov N.P., Lebedeva O.A., Vereshchagin V.I. Poristye kompozitsionnye keramicheskie materialy, poluchennyye samorasprostranyayushchimsya vysokotemperaturnym sintezom v sisteme Fe₂O₃-Al₂O₃-Al [Porous composite ceramic materials obtained by self-propagating high-temperature synthesis in the Fe₂O₃-Al₂O₃-Al system]. *Novye ognepory*, 2003, no. 9, pp. 40–42.
 6. Vereshchagin V.I., Tubalov N.P., Evstigneev V.V. SVS-tekhnologiya izgotovleniya poristykh pronitsaemykh materialov [SHS-technology for producing porous permeable materials]. *Novye ognepory*, 2005, no. 6, pp. 61–65.
 7. Tubalov N.P., Lebedeva O.A. Structure and operational properties of porous metal-ceramic materials based on oxides of alloy steels. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2007, vol. 311, no. 2, pp. 142–146. In Rus.
 8. Abu-Jrai A., Tzolakis A., Megaritis A. The influence of H₂ and CO on diesel engine combustion characteristics, exhaust gas emissions, and after treatment selective catalytic NOx reduction. *Hydrogen Energy*, 2007, no. 15, pp. 3565–3571.
 9. Kolomeets M.A., Tubalov N.P., Novoselov A.L. Vibratsiya kataliticheskikh filtrov neytralizatorov otrabotavshikh gazov dizeley [Vibration of catalytic converters of exhaust gas neutralizers]. *Polzunovskiy vestnik*, 2012, no. 3, pp. 7–10.
 10. Xamada T., Kadano K., Funabiki M. Development of non-Ni low H₂S Pt/Rh/CeO₂ TWC Catalyst. *SAE Techn. Pap. Ser.*, 1990, no. 900611, pp. 1–8.
 11. Verbilov A.F., Kovalev V.V., Belyaev L.N. Raschet dinamicheskikh peremeshcheniy metodom vremennykh konechnykh uravneniy [Calculation of dynamic displacements by the method of time-finite equations]. *Problemy sovershenstvovaniya energeticheskikh ustanovok. Sbornik statey* [Problems of improving power plants. A collection of articles]. Ed. by A.A. Melbert. Barnaul, 2008. pp. 10–18.
 12. Aufdenblatten S., Schänzlin K., Bertola A., Mohr M. Charakterisierung der Partikelemission von modernen Verbrennungs-Motoren [Characterization of the particle emission of modern combustion engines]. *MTZ: Motortech. Z.*, 2002, no. 11, pp. 962–966.
 13. Bell A.T. The impact of nanoscience on heterogeneous catalysis. *Science*, 2003, vol. 299, pp. 1688–1691.
 14. Büchling J. Der neue D-CAT-Motor von Toyota [The new D-CAT engine from Toyota]. *MTZ: Motortech. Z.*, 2003, no. 12, pp. 1002–1003.
 15. Runhua T., Ying C., Bao L. Complex nonlinear mathematical mode for a kind of shock absorbers. *Chin. J. Mech. Eng.*, 1999, no. 1, pp. 32–39.
 16. Elsener M., Geering H., Jaussi F. Aufbau und Vermessung eines De NOx – systems auf der Basis von Harnstoff-SCR [Construction and measurement of a De NOx system based on urea SCR]. *MTZ: Motortech. Z.*, 2003, no. 11, pp. 966–971.
 17. Chun N.L., Shyan L.C. Combustion synthesis of aluminum nitride powder using additives. *J. Mater. Res.*, 2001, vol. 16, pp. 2200–2208.
 18. Shyan L.C., Chun H.L. Combustion Synthesis of Aluminum Nitride: a review. *Key Eng. Mat.*, 2012, vol. 521, pp. 101–111.
 19. Besmann T.M., Gallois B.M. Structure of porous metal-ceramic materials. *MRS Symp. Proc. – Pittsburg, PA: Materials Research Society*, 1990, pp. 168–172.
 20. Gorlova N.N., Kolomeets M.A., Medvedev G.V., Sitnikov A.A. Vliyaniye tekhnologii izgotovleniya poristogo kompozitsionnogo materiala kataliticheskogo neytralizatora otrabotavshikh gazov dizeley na ego mikrostrukturu [Influence of technology of manufacturing porous composite material of a catalytic converter of exhaust gases of diesel engines on its microstructure]. *Polzunovskiy vestnik*, 2014, no. 4, pp. 200–203.
 21. Baklanov A.E., Kanapinov M.S., Malashina S.A., Novoselova T.V., Sitnikov A.A., Tubalov N.P. Poluchenie poristykh pronitsaemykh metallokeramicheskikh SVS-materialov s ispolzovaniem rud polimetallov vzamen redkozemelnykh elementov [Production of porous permeable metal-ceramic SHS materials using polymetal ores instead of rare earth elements]. *Polzunovskiy vestnik*, 2016, no. 5, pp. 205–212.
 22. Novoselova T.V., Medvedev G.V., Gorlova N.N. Vliyaniye komponentov rudy titanita na strukturu kataliticheskogo materiala v neytralizatorakh, ispolzuemykh dlya ochistki otrabotavshikh gazov [Effect of titanite ore components on the structure of a catalytic material in neutralizers used for purification of exhaust gases]. *V Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya. Innovatsionnyye tekhnologii v nauke i obrazovanii* [5th International Scientific and Practical Conf. Innovative technologies in science and education]. Cheboksary, 2016. no. 1, pp. 90–94.
 23. Baklanov A.E., Baklanova O.E., Kanapinov M.S., Kanapinov S.B., Maetskiy A.V., Novoselova T.V., Sitnikov A.A., Tubalov N.P. SVS-materialy dlya ochistki otrabotavshikh gazov dizeley [SHS-materials for cleaning exhaust gases of diesel engines]. Ust-Kamenogorsk, VKGTU Publ., 2016. 132 p.
 24. Baklanov A.E., Kanapinov M.S., Malashina S.A., Novoselova T.V., Sitnikov A.A., Tubalov N.P. Razrabotka i sozdanie poristykh filtruyushchikh metallokeramicheskikh SVS-materialov s ispolzovaniem rud polimetallov [Development and design of porous filtering metal-ceramic SHS-materials using polymetallic ores]. *Regionalnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya. Aspekty razvitiya nauki, obrazovaniya i modernizatsii promyshlennosti* [Regional Scientific and Practical Conf. Aspects of development of science, education and industrial modernization]. Taganrog, 2016. pp. 51–55.
 25. Baklanov A.E., Kanapinov M.S., Malashina S.A., Kolomeets M.A., Novoselova T.V., Sitnikov A.A., Tubalov N.P. Sozdanie vibrostoykikh metallokeramicheskikh poristykh pronitsaemykh SVS-materialov na osnove okaliny legirovannoy stali [Development of vibration-resistant metal-ceramic porous permeable SHS-materials on the basis of scale of alloyed steel]. *Regionalnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya. Aspekty razvitiya nauki, obrazovaniya i modernizatsii promyshlennosti* [Regional Scientific and Practical Conf. Aspects of the development of science, education and industrial modernization]. Taganrog, 2016. pp. 55–59.

Received: 25 April 2017.

Information about the authors

Maksim A. Kolomeets, vice-rector, Altai State Medical University.

Alla A. Melbert, Dr. Sc., professor, head of the department, Polzunov Altai State Technical University.

Alexander V. Maetskiy, Cand. Sc., programmer, Polzunov Altai State Technical University.

Tatyana V. Novoselova, senior lecturer, Polytechnic Institute (branch) of Don State Technical University.

Nikolay P. Tubalov, Dr. Sc., professor, Polzunov Altai State Technical University.

Olga V. Yakovleva, senior lecturer, East Kazakhstan State Technical University.

УДК 536.244

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ И ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В МАГИСТРАЛЬНОМ ГАЗОПРОВОДЕ

Базаров Александр Александрович¹,
aleksbazarov@yandex.ru

Данилушкин Александр Иванович¹,
aidanilushkin@mail.ru

¹ Самарский государственный технический университет,
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244.

Актуальность работы обусловлена необходимостью совершенствования методик расчета термогидравлических режимов газопровода для задач снижения энергозатрат на транспортировку газа и увеличение пропускной способности магистральной трубопроводной системы.

Цель работы: анализ существующих методик расчета тепловых и гидравлических процессов и разработка усовершенствованных экономичных вариантов. Рассмотрен комплекс вопросов по моделированию гидродинамических и тепловых процессов в системе «газовый поток – труба – окружающая среда». Процессы перекачивания газа сопровождаются его нагревом при компримировании, что отражается на росте давления в газопроводе и снижении пропускной способности. Для снижения энергозатрат на транспортировку газа рассмотрен комплекс задач моделирования.

Методы исследования. Расчеты тепловых и гидравлических процессов в грунте и газопроводе выполнены с помощью метода конечных элементов, реализованного в программном пакете Comsol. Проведен анализ влияния сезонных изменений температуры воздуха на тепловые потоки между газопроводом и грунтом. С учетом большой инерционности процессов теплообмена в грунте предложен последовательный алгоритм решения задач моделирования процессов теплопередачи в грунте и процессов термо- и гидродинамики в трубе с движущимся газом.

Результаты. Разработаны численные модели процессов распространения тепла в грунте, определены параметры моделей для стационарных режимов, реализованной термогидравлической модели газового потока в трубе с учетом теплообмена с окружающей средой определен профиль скоростей и толщина пристенного слоя, что позволило перейти к тепловой задаче с движущейся двухслойной средой, эквивалентной по распределению температуры в трубопроводе и величине теплового потока в окружающую среду. На основе расчетов тепловых процессов в грунте определены параметры упрощенной термогидравлической модели для газопровода, что позволяет получить решения для большого диапазона температур среды.

Ключевые слова:

Тепловые процессы, нелинейная задача, гидравлика, связанная модель, турбулентный режим, аппроксимация внешнего теплообмена.

Введение

Транспортировка газа с заданным расходом достигается за счет регулирования давления на дожимных компрессорных станциях. В процессе компримирования происходит разогрев газа, что дополнительно увеличивает давление. Для обеспечения максимальной производительности трубопровода применяется охлаждение газа, чтобы не вызвать превышения допустимых напряжений в стенке трубы и ее разрушения. Эффективность охлаждения газа с помощью аппаратов воздушного охлаждения (АВО) зависит от температуры окружающей среды и количества включенных аппаратов [1–5]. В жаркую погоду температура воздуха близка к температуре газа после компрессора. В этой ситуации возможно применение кондиционеров вместо стандартных АВО. Когда можно обойти проблему снижением расхода газа, то просто отключают аппараты охлаждения.

Плотность газа при повышенном давлении и произвольной температуре определяется с использованием уравнения Менделеева–Клапейрона

$$\rho = \frac{\rho_u}{z} = \frac{10^3 M p}{RTz}.$$

Здесь ρ_u – плотность при избыточном давлении; p – давление; M – молярная масса; R – универсальная газовая постоянная; T – температура; z – сжимаемость газа. Отдельно можно записать выражения в виде функции от давления и температуры

$$\rho = \rho_c P / P_0; \quad \rho = \rho_T \frac{273}{T}.$$

Если итоговое давление, созданное за счет компрессора при температуре 40 °С, равно 75 атм, то при охлаждении до 0 °С давление упадет до 50/1,147=43,59 атм, что приведет к такому же снижению плотности газа.

Таким образом, пропускная способность снижается.

Суточные колебания температуры воздуха сопровождаются изменением теплоотдачи в АВО газа. При близких значениях температуры воздуха и температуры газа теплообмен затруднен, и вентиляторное охлаждение неэффективно.

Стабилизация расхода газа обеспечивается подьемом давления на выходе компрессорной станции, что сопровождается увеличением энергозатрат на компримирование.

В нормальном режиме работы АВО газа существует проблема контроля параметров, таких как

давление, температура, расход, по всей длине газопровода или участка между компрессорными станциями. Полнота и достоверность информации позволяет обеспечить более качественное управление процессом перекачивания.

Выбор режимов работы компрессорных станций производится с учетом не только возможностей систем охлаждения газа, но и распределения температуры на участке газопровода [6]. Тепловые процессы в газовой среде зависят не только от характера движения, режимов и механизмов теплообмена, но и осложнены необходимостью учета изменений теплофизических свойств (вязкости и температуропроводности) от температуры. Взаимосвязанность этих двух задач усложняет решение. Для оперативного получения параметров процессов в трубопроводе желательно использование аналитических методов, но ввиду множества факторов, влияющих на точность решения, целесообразно применение численных методов [7–11]. Целью данной работы является оценка влияния различных факторов на вид и параметры модели.

Разработка математической модели процессов в газопроводе и окружающем грунте

Распределение температуры в газопроводе зависит от теплообмена между трубопроводом и окружающим грунтом. Значительное влияние оказывают сезонные колебания температуры воздуха и грунта, сопровождающиеся промерзанием и оттаиванием, изменением влажности грунта. На общий процесс распространения тепла от центра планеты в окружающую среду оказывают влияние верхние слои почвы. Изменения, происходящие в них, сказываются на значении температуры на глубинах в пределах от единиц до десятков метров. Например, для районов Самарской области при постоянстве влажностного и температурного режима на глубине 3,2 м грунт практически не промерзает [12]. На глубине 1,6 м температура в течение года колеблется в пределах от -7 до $+17$ °С, а на глубине 3,2 м изменяется от -3 до $+12$ °С.

Более достоверная картина распределения температуры при рассмотрении теплообмена в системе «трубопровод–грунт–атмосфера» может быть получена с учетом не только среднегодовых значений, но и сезонных колебаний [13–16]. Моделирование процессов в динамике для области с такими размерами требует значительных вычислительных ресурсов. Более эффективным является подход, основанный на разделении задачи на этапы, определении необходимых параметров, обеспечивающих приемлемую погрешность расчетов при переходе к следующим шагам при умеренных требованиях к вычислительной мощности компьютера.

На первом этапе рассматривается задача теплообмена между поверхностью трубы, грунтом и атмосферой (рис. 1), которая описывается дифференциальным уравнением в частных производных [17].

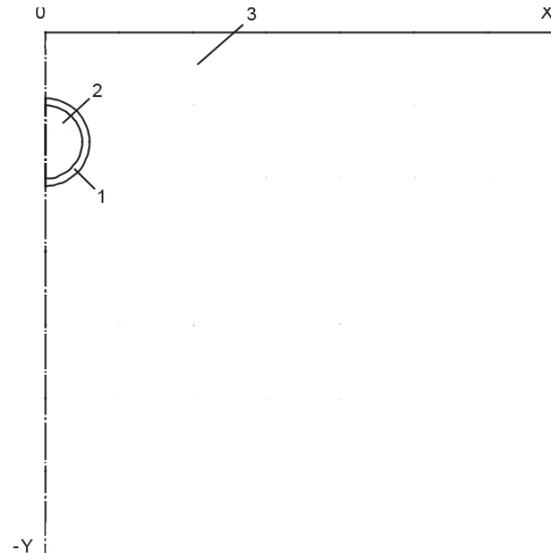


Рис. 1. Геометрическая модель трубы в траншее: 1 – труба, 2 – газ, 3 – грунт

Fig. 1. Geometrical model of the pipe in the trench: 1 is the pipe, 2 is the gas, 3 is the soil

Расчетная область заранее неизвестных размеров охватывает грунт и расположенный в нем трубопровод.

$$\left(\frac{\partial}{\partial x} \lambda \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) = 0.$$

Граничные условия состоят из нескольких составляющих.

Теплообмен поверхности грунта с атмосферой является конвективным

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha (T(0, x) - T_{surf}).$$

Теплообмен на горизонтали на расчетной глубине y_{max} осуществляется при неизменной температуре в течение года, что соответствует граничным условиям первого рода

$$T(y_{max}, x) = T_g.$$

На внутренней поверхности трубы задается температура, которая соответствует среднему значению температуры газового потока на рассматриваемом участке

$$T(l_{int}) = T_{gas}.$$

Теплообмен на вертикальных участках границы области представлен изоляцией

$$\frac{\partial T(x_l, y)}{\partial x} = 0; \quad \frac{\partial T(x_r, y)}{\partial x} = 0.$$

Здесь λ – коэффициент теплопроводности; α – коэффициент конвективного теплообмена; T_{surf} – температура на поверхности грунта; T_g – температура грунта на искомой глубине y_{max} ; x_l , x_r – координаты левой и правой границ области.

Левая сторона области соответствует линии симметрии, а правая сторона соответствует отсут-

ствию градиентов температуры по горизонтали за счет значительного удаления от трубы.

Ниже рассматривается случай расчета температурного распределения в грунте при положительной температуре в атмосфере и грунте, то есть в теплое время года. В случае отрицательных температур необходим учет изменения фазового состояния материалов, содержащих влагу. Если при рассмотрении стационарных процессов достаточно учесть изменение коэффициента теплопроводности, то для нестационарных задач производится учет скрытой теплоты фазового перехода с помощью локального увеличения коэффициента теплоемкости. В ранних версиях программы Comsol эту процедуру можно было выполнить путем задания зависимости теплоемкости от температуры. В более поздних версиях среди параметров предусмотрено задание скрытой теплоты плавления.

Физические свойства среды были приняты с учетом характерных для данного региона видов грунта, климатических условий и распределений температуры. Поверхностный слой имеет самую низкую влажность и коэффициент теплопроводности, равный $0,4 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$. Для более глубоких слоев (более 20 м от поверхности) принята влажность 20 % и теплопроводность $2,7 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ [16]. В рассматриваемой модели среда была разделена по глубине на несколько слоев с отличающимися свойствами. Труба газопровода диаметром 820 мм покрыта изолирующей пленкой в два слоя. Температура поверхности трубы (под пленкой) принята равной 35°C (308 К). Температура воздуха принята равной 15°C , а температура грунта на глубине 40 м – 10°C . В ходе ряда расчетов для областей с разными размерами по глубине и по ширине были определены значения геометрической модели, при которых не происходит дальнейшего изменения теплового потока от трубы в окружающую среду. На представленных на рис. 2 диаграммах температуры в грунте видно, что градиент температуры на горизонтальных плоскостях снижается по мере увеличения расстояния от поверхности. При этом изменение теплового потока от трубы в окружающий грунт на удаленных границах становится несущественным. Это позволило принять размеры области шириной 100 м и глубиной 55 м, обеспечивающие приемлемую погрешность расчетов.

Для принятых геометрических и физических параметров полученное распределение температур соответствует тепловому потоку с одного погонного метра трубопровода, равному 67 Вт.

При переходе к рассмотрению тепловых процессов в трубопроводе и окружающем грунте на протяжении всей трассы даже при использовании осесимметричной 2D-модели резко увеличивается число элементов. Это влечет за собой рост оперативной памяти и времени счета. Одновременно в задачах моделирования гидродинамики [18] наличие неподвижных сред большой размерности сложно имитировать. Таким образом, возникает необходимость упрощения постановки термогидравлической задачи и уменьшения геометрических размеров расчетной области.

гидравлической задачи и уменьшения геометрических размеров расчетной области.

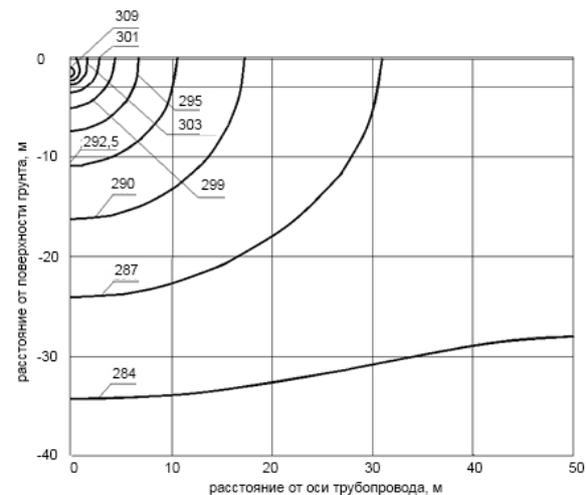


Рис. 2. Диаграммы температур для поперечного разреза трубы и грунта

Fig. 2. Temperature diagrams for cross-section of pipe and soil

Моделирование теплопередачи в системе движущегося газового потока, трубы, грунта и воздуха формально возможно при одновременном рассмотрении уравнений теплопроводности для нескольких сред. Передача тепла в атмосферу может быть учтена в виде граничных условий третьего рода, то есть конвективного теплообмена. Более простым способом решения задачи является исключение из модели грунта и замена процессов теплопередачи в грунте и конвекции между поверхностью грунта и воздухом на комбинацию граничных условий третьего рода между трубой и гипотетической внешней средой, обеспечивающих эквивалентный отвод тепла. Ввиду непостоянства расчетных коэффициентов теплообмена необходимо их определение при различных комбинациях температуры воздуха и температуры грунта на заданной глубине.

В результате расчетов теплообмена между трубой и грунтом на конечно-элементной модели при изменении температуры воздуха в пределах от 25 до 10°C градусов получена таблица значений теплового потока Q_1 от поверхности трубы, учитывающего потоки в глубину грунта и в воздух (таблица).

Для замены реальных процессов простой моделью, учитывающей отвод тепла к двум поверхностям с постоянными условиями теплообмена, проведен ряд вычислений, позволивших найти необходимые параметры. Для области грунта глубиной 55 м и шириной по 50 м в обе стороны от оси трубы обеспечивается снижение градиента температур на границе до очень небольших значений. Это позволяет принять постоянным значение температуры, равное 10°C на глубине 55 м. Процесс теплообмена трубопровода разделяется на две составляющие: передача тепла к нижней поверхно-

сти области грунта и к границе с воздухом. Вторая составляющая учитывает два процесса: передача тепла теплопроводностью от поверхности трубы до границы с воздушной средой и конвективный теплообмен поверхности трубы с атмосферой

$$Q_2 = \alpha_1 SK(T_p - T_G) + \alpha_2 S(1 - K)(T_p - T_A).$$

Здесь K – весовой коэффициент; T_p – температура трубы; T_G – температура грунта; T_A – температура воздуха; α_1 – расчетный коэффициент теплообмена трубы с грунтом; α_2 – расчетный коэффициент конвективного теплообмена трубы с воздухом; S – площадь поверхности трубы длиной 1 м.

В результате выполненных замен, обеспечивающих малую погрешность лишь в небольшом диапазоне изменения температур трубы, воздуха и грунта на заданной глубине, возможен переход от системы «труба–грунт–атмосфера» к эквивалентной системе «труба – окружающая среда» с заменой сложного теплообмена граничными условиями третьего рода. Под окружающей средой понимается комбинация двух составляющих – нижней и верхней. Хотя, строго говоря, представление их в виде жидкости или газа не соответствует реальным средам, это дает возможность уменьшить размеры расчетной области и число сред.

Приведенные ниже параметры (таблица) определены при температуре грунта 10 °С. В диапазоне температур воздуха от 15 до 25 °С коэффициенты аппроксимирующего выражения одинаковы. Аналогично могут быть определены коэффициенты аппроксимации для других условий.

Процесс теплопередачи в газовом потоке вдоль всей трассы зависит от температуры, давления и скорости движения газа. Для построения математической модели требуется учет параметров не только тепловых, но и гидравлических процессов [18]. Для корректного представления задачи за основу принимается связанная термогидравлическая модель.

Таблица. Параметры аппроксимирующей модели теплообмена

Table. Parameters of the approximating heat exchange model

$T_p, ^\circ\text{C}$	37	32	27	22	37	32	27	22
$T_A, ^\circ\text{C}$	20				10			
$Q_1, \text{Вт}$	38,7	25	16,6	6,1	56	45,4	35,1	24,6
$Q_2, \text{Вт}$	36,9	26,8	16,6	6,4	56,3	45,9	35,4	25
$\gamma, \%$	0,55	7	0	4,9	0,53	0,74	0,85	1,63
$\alpha_1, \text{Вт}\cdot(\text{м}^2\text{C}^\circ)^{-1}$	1,2				1,9			
$\alpha_2, \text{Вт}\cdot(\text{м}^2\text{C}^\circ)^{-1}$	1,6				1			
K	0,15				0,35			

Проведенный анализ существующих решений в области построения тепловых [19–22] и гидравлических [23–28] моделей систем транспорта газа и его охлаждения показал возможности для дальнейшего совершенствования алгоритмов управления процессами. Одно из направлений связано с использованием более эффективных режимов те-

плообмена [26]. Препградой является необходимость использования более сложных конструкций трубопровода на выходе из компрессорного цеха для формирования резко переменных скоростных режимов.

В качестве исходных данных принимаем: давление газа, равное 75 атм.; коэффициент теплопроводности газа $\lambda=0,04$ Вт/(м·град); плотность газа при атмосферном давлении $\rho=0,667$ кг/м³; удельная теплоемкость 2,8 кДж/(кг·град); динамическая вязкость $\mu=1,32\cdot 10^{-5}$ Па·с; кинематическая вязкость газа $\nu=\mu/\rho=2,6\cdot 10^{-7}$ м²/с; скорость движения газа w в трубопроводе задается в диапазоне 4–20 м/с. Расчетная плотность газа в трубе определяется выражением $\rho=0,667(1+p/10^5)$ кг/м³.

Участвующие в расчетах коэффициенты теплопроводности и вязкости зависят от температуры и давления. Для практического применения использованы соотношения, принятые в [29].

Вязкость при повышенных давлениях для природного газа вычисляется по формуле

$$\mu = \mu_t C_\mu,$$

где $C_\mu = 1 + \frac{P_n^2}{30(T_n - 1)}$ – поправочный множитель.

Составляющую динамической вязкости природного газа, зависящую от температуры, при атмосферном давлении вычисляют по формуле

$$\mu_t = 3,24 \frac{T^{0,5} + 1,37 - 9,09\rho_c^{0,125}}{\rho_c^{0,5} + 2,08},$$

Приведенные значения давления P_n и температуры T_n определяются по формулам

$$P_n = P / P_{\text{нк}};$$

$$T_n = T / N_{\text{нк}},$$

где псевдокритическое давление $P_{\text{нк}}$ и температура $T_{\text{нк}}$ рассчитываются согласно выражениям

$$P_{\text{нк}} = 2,9585(1,608 - 0,05994\rho_c);$$

$$T_{\text{нк}} = 88,25(0,9915 - 1,759\rho_c).$$

Значение плотности ρ_c соответствует стандартным условиям: температура 0 °С, давление 1 атмосфера.

Для выяснения характера движения произведем расчет некоторых величин.

Критерий Рейнольдса для газового потока в трубе

$$\text{Re} = \frac{wl_0}{\nu} = \frac{4 \cdot 0,8}{2,6 \cdot 10^{-7}} = 1,23 \cdot 10^7.$$

Коэффициент теплообмена

$$a = \lambda / \delta = 0,02 \text{Re}^{0,8} \text{Pr}^{0,43} \left(\frac{\text{Pr}_g}{\text{Pr}_w} \right)^{0,25} \varepsilon_1 =$$

$$= 8477 \text{ Вт} / (\text{м}^2\text{град}).$$

В данном случае величины критерия Прандтля Pr для газа Pr_g и стенки Pr_w совпадают. Здесь $\text{PrPr} = \nu/a = 0,787$. Поправочный коэффициент $\varepsilon_1 = 1$.

Толщина пристеночного слоя, в котором не происходит перемешивания

$$\delta = \lambda / a = 4,7 \cdot 10^{-6} \text{ м.}$$

Из анализа проведенных расчетов можно сделать заключение о турбулентном характере движения.

В качестве модели процесса принимаем $(k-\varepsilon)$ – модель турбулентности, основанную на двух уравнениях [18].

В $(k-\varepsilon)$ -модели выводятся уравнения для турбулентной кинетической энергии k и скорости диссипации турбулентной энергии ε

$$k = 0,5(\overline{u'u'} + \overline{v'v'} + \overline{w'w'}); \quad \varepsilon = \mu \left[\frac{\partial u'_j}{\partial x_j} \right] \left[\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \right].$$

Уравнения для переноса импульса и непрерывности имеют следующий вид:

$$\rho(\mathbf{u}\nabla)\mathbf{u} = \nabla \left[\begin{array}{c} -p\mathbf{I} + (\eta + \eta_T) \left(\begin{array}{c} \nabla\mathbf{u} + (\nabla\mathbf{u})^T \\ (2/3)(\nabla\mathbf{u})\mathbf{I} \end{array} \right) \\ -(2/3)\rho k\mathbf{I} \end{array} \right] + \mathbf{F};$$

$$\nabla(\rho\mathbf{u}) = 0;$$

$$\rho\mathbf{u}\nabla k = \nabla[(\eta + \eta_T / \sigma_k)\nabla k] + \eta_T P(\mathbf{u}) - (2/3)\nabla\mathbf{u} - \rho\varepsilon;$$

$$\rho\mathbf{u}\nabla\varepsilon = \nabla[(\eta + \eta_T / \sigma_\varepsilon)\nabla\varepsilon] +$$

$$+(C_{\varepsilon 1}\varepsilon/k)[\eta_T P(\mathbf{u}) - (2\rho k/3)\nabla\mathbf{u}] - C_{\varepsilon 2}\rho\varepsilon^2/k,$$

где

$$P(\mathbf{u}) = \nabla\mathbf{u} : (\nabla\mathbf{u} + (\nabla\mathbf{u})^T) - (2/3)(\nabla\mathbf{u})^2,$$

$$\eta_T = \rho C_\mu k^2 / \varepsilon.$$

где ρ – плотность (кг/м³); \mathbf{u} – вектор усредненной скорости (м/с); η – динамическая вязкость (Па·с); p – давление (Па); k – энергия турбулентности (м²/с²); ε – коэффициент рассеяния энергии турбулентности (м²/с³); \mathbf{I} – единичный вектор.

Массовые силы \mathbf{F} в задаче не учитываются ввиду малости, так как плотность газа составляет 50 кг/м³.

Здесь для удобства записи использованы тензорные обозначения в декартовых координатах. Данные уравнения выведены из нестационарных уравнений Навье–Стокса, в которых сохранены диффузионные члены, но отброшены члены, соответствующие вязкой диссипации, а также произведена модификация некоторых других членов.

Локальная турбулентная вязкость μ_T может быть выражена через локальные значения k и ε следующим образом:

$$\mu_T = \frac{C_\mu \rho k^2}{\varepsilon}.$$

Эмпирические константы в уравнениях равны

$$C_\mu = 0,09, \quad C_{\varepsilon 1} = 1,44, \quad C_{\varepsilon 2} = 1,92,$$

$$\sigma_k = 1,0, \quad \sigma_\varepsilon = 1,3.$$

Приведенные выше уравнения справедливы при $\mu_T \gg \mu$. Очевидно, что это неверно вблизи твердой поверхности, где турбулентные флуктуации подавляются стенкой. Поэтому вблизи твердой поверхности вводятся специальные пристеночные функции, при определении которых обычно предполагают логарифмический закон изменения тангенциальной составляющей скорости в направлении нормали, а также то, что выделение турбулентной кинетической энергии в области действия логарифмического закона равно ее диссипации. В наиболее простой форме это эквивалентно введению вблизи стенки длины перемешивания при определении дополнительной вязкости. Использование специальных стеночных функций позволяет определить граничные условия для k и ε на некотором удалении от твердой поверхности стенки трубы.

На входе задается скорость, равная 4–20 м/с, а на выходе – расчетное давление, хотя можно задать нулевое в случае принятия постоянной плотности газа.

На осевой линии задаются граничные условия симметрии

$$\mathbf{t}[-p\mathbf{I} + (\eta + \eta_T)(\nabla\mathbf{u} + (\nabla\mathbf{u})^T - (2/3)(\nabla\mathbf{u})\mathbf{I})]\mathbf{n} = 0;$$

$$\mathbf{n}\mathbf{u} = 0;$$

$$\mathbf{n}[(\eta + \eta_T / \sigma_k)\nabla k - \rho\mathbf{u}k] = 0;$$

$$\mathbf{n}[(\eta + \eta_T / \sigma_\varepsilon)\nabla\varepsilon - \rho\mathbf{u}\varepsilon] = 0;$$

Здесь $\mathbf{t} = (-n_x, n_r)$.

На боковой поверхности потока задаются условия с логарифмической функцией стенки

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{u} = 0; \quad [(\eta + \eta_T)(\nabla\mathbf{u} + (\nabla\mathbf{u})^T - (2/3)(\nabla\mathbf{u})\mathbf{I})]\mathbf{n} =$$

$$= [\rho C_\mu^{0,25} k^{0,5} / (\ln(\delta_w^+) / k + C^+)]\mathbf{u};$$

$$\mathbf{n} \cdot \nabla k = 0; \quad \varepsilon = C_\mu^{0,75} k^{1,5} / (k\delta_w),$$

где $\delta_w^+ = \delta_w \rho C_\mu^{0,25} k^{0,25} / \eta$.

На входе задается начальное значение скорости

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_0; \quad k = (3I_T^2 / 2)(\mathbf{u}_0\mathbf{u}_0),$$

$$\varepsilon = C_\mu^{0,75} ((3I_T^2 / 2)(\mathbf{u}_0\mathbf{u}_0))^{1,5} / L_T.$$

Здесь L_T – шкала турбулентной длины; I_T – интенсивность турбулентности.

На выходе задается давление

$$(\eta + \eta_T)(\nabla\mathbf{u} + (\nabla\mathbf{u})^T - (2/3)(\nabla\mathbf{u})\mathbf{I})\mathbf{n} = 0;$$

$$\mathbf{n}\nabla k = 0; \quad \mathbf{n}\nabla\varepsilon = 0; \quad p = p_0.$$

Приведенные дифференциальные уравнения для среды и граничных условий описывают математическую модель турбулентного движения газового потока, заложенную в программном пакете Comsol, который использован для проведения дальнейших расчетов.

Кроме выявления характера движения газового потока при моделировании стоит задача расчета теплового потока от трубопровода в окружающий грунт. В данном случае к гидравлической модели добавляется расчет теплопередачи в газовом потоке.

Стационарная задача теплопроводности для движущейся среды описывается дифференциальным уравнением в частных производных

$$\nabla(-\lambda \nabla T) = Q - \rho C_p \mathbf{u} \nabla T.$$

Вектор скорости \mathbf{u} передается из гидравлической задачи.

Граничные условия состоят из нескольких уравнений:

- теплообмен боковой поверхности трубопровода с окружающей средой задается в виде граничных условий третьего рода

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial r} = \alpha_1 K(T(R, x) - T_G) + \alpha_2 (1 - K)(T(R, x) - T_A);$$

- на входе задается постоянная температура

$$T(r, 0) = T_0;$$

- на осевой линии задается условие симметрии, заключающееся в отсутствии теплового потока в направлении, перпендикулярном оси

$$\frac{\partial T(0, x)}{\partial r} = 0;$$

- на выходе задается отсутствие теплообмена с окружающей средой

$$\frac{\partial T(r, X)}{\partial x} = 0.$$

В результате расчетов получены диаграммы температур на поверхности трубы (рис. 3) при разных значениях температуры воздуха на оси потока трубопровода длиной 100 км. Зависимость плотности теплового потока повторяет диаграммы температур. Линии 4 соответствуют значениям плотности потока от $1,56 \cdot 10^8$ Вт/(м²·°С) в начале до $1,43 \cdot 10^8$ Вт/(м²·°С) в конце линии.

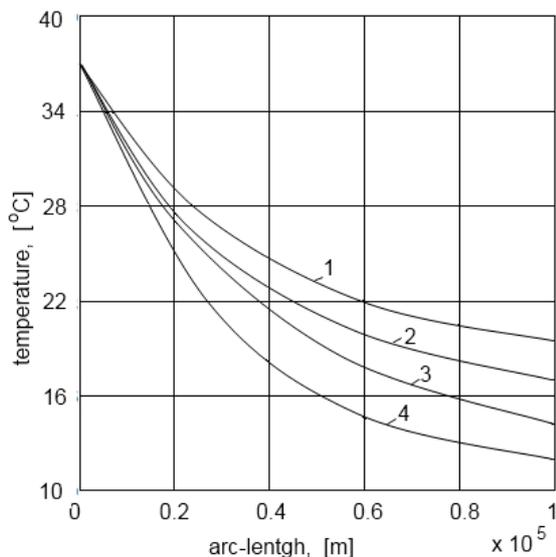


Рис. 3. Диаграммы температуры стенки трубы по длине газопровода при температуре воздуха (°С): 1) 25; 2) 20; 3) 15; 4) 10

Fig. 3. Diagrams of the pipe wall temperature along the length of the gas pipeline at air temperature (°C): 1) 25; 2) 20; 3) 15; 4) 10

Проведенные теоретические и расчетные исследования теплообмена в системе «газовый поток – труба – грунт» показали значительное влияние природных процессов на характер теплообмена. При моделировании теплопередачи от газопроводов в грунт и атмосферу можно пренебречь внутренним тепловым сопротивлением в газовом потоке. Построение моделей теплообмена для протяженных участков газопровода возможно без применения гидравлических расчетов, что позволяет обеспечить приемлемую точность решения задачи средствами персонального компьютера. Как отмечалось выше, снижение давления в газопроводе отражается на скорости перемещения. Диаграмма скорости по длине газопровода (рис. 4) оказывает влияние на характер зависимости теплового потока от движущегося газа к стенке трубы.

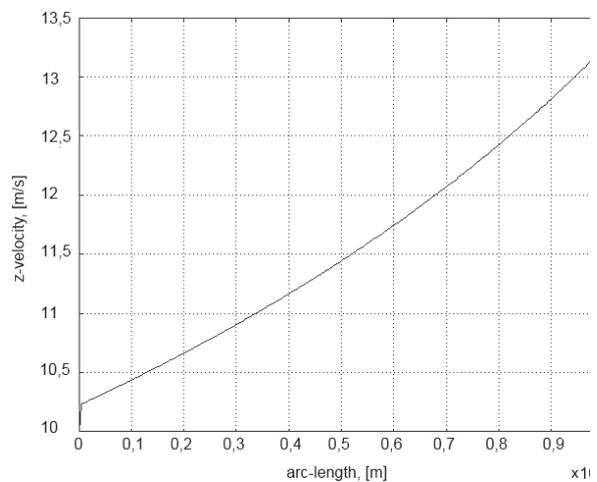


Рис. 4. Диаграмма скорости по длине газопровода

Fig. 4. Velocity diagramme along the gas pipeline length

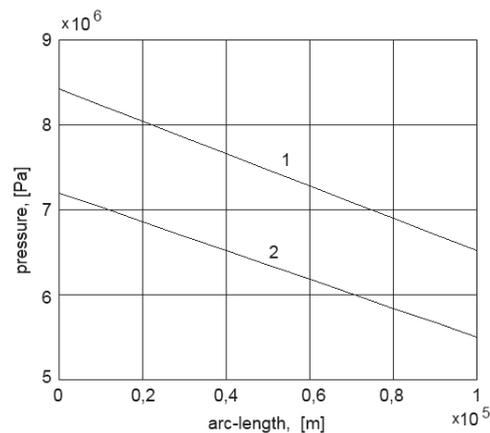


Рис. 5. Диаграммы давления по длине газопровода на участке длиной 100 км при давлении в конце линии: 1) 65; 2) 55 МПа

Fig. 5. Pressure diagrammes along the gas pipeline length on the 100 km section at pressure in the end of the line: 1) 65; 2) 55 MPa

Расчетные диаграммы давления по длине газопровода приведены на рис. 5. Здесь при заданных значениях давления в конце линии диаграммы да-

влений представлены в виде параллельных линий. Теоретически диаграммы имеют нелинейный характер. Однако принятый масштаб не позволяет оценить истинный характер влияния температуры на падение давления.

Расчет температурных распределений и перепадов давлений в условиях более точного представления параметров газопровода дает возможность решения задачи выбора режима работы компрессорной станции и АВО газа более обоснованно [30–32]. Суточные графики изменения температуры воздуха, сезонные изменения температуры и влажности грунта могут быть заданы для всей трассы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соколов С.М., Кисев С.В. Проектирование промышленных трубопроводов в коридорах коммуникаций в сложных условиях // Известия ВУЗов. Нефть и газ. – 2014. – № 4. – С. 77–79.
2. Перспективы снижения энергетических затрат на транспорт углеводородов / С.М. Дудин, А.Н. Шиповалов, С.Ю. Подорожников, Ю.Д. Земенков // Известия ВУЗов. Нефть и газ. – 2011. – № 2. – С. 65–69.
3. Беркутов Р.А., Малюшин Н.А. Оперативное определение оптимальной глубины охлаждения газа на компрессорных станциях магистральных газопроводов // Известия ВУЗов. Нефть и газ. – 2010. – № 4. – С. 53–58.
4. Байков И.Р., Китаев С.В., Шаммазов И.А. Перспективы энергосбережения в условиях длительно эксплуатируемой газотранспортной системы // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2012. – № 4. – С. 9–13.
5. Влияние теплоемкости трубы на процесс теплообмена при транспортировке природного газа / С.А. Коршунов, А.М. Чионов, В.С. Кулик, К.А. Казак // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2013. – № 6. – С. 8–11.
6. Yanvarev I.A., Vanayshov A.D., Krupnikov A.V. Thermal Management Technologies Development for the Gas Transport on the Gas-main Pipeline // Procedia Engineering. – 2015. – V. 113. – P. 237–243.
7. Fast thermal simulation of a heated crude oil pipeline with a BFC-based POD reduced-order model / Dongxu Han, Bo Yu, Yi Wang, Yu Zhao, Guojun Yu // Applied Thermal Engineering. – 5 September 2015. – V. 88. – P. 217–229.
8. Чионов А.М., Черепанов А.В. Моделирование системы трубопроводов с различной пропускной способностью в нестационарном режиме // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2015. – № 4. – С. 18–21.
9. Abraham Debebe Woldeyohannes, Mohd Amin Abd Majid. Simulation model for natural gas transmission pipeline network system / Simulation Modelling Practice and Theory. – January 2011. – V. 19. – Iss. 1. – P. 196–212.
10. Чионов А.М. Метод расчета параметров потока газа в трубопроводе в приближении аксиальной симметрии температурного поля окружающей среды // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2014. – № 3–4. – С. 38–43.
11. Mahmood Farzaneh-Gord, Hamid Reza Rahbari. Unsteady natural gas flow within pipeline network, an analytical approach // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – January 2016. – V. 28. – P. 397–409.
12. Базаров А.А., Данилушкин А.И. Моделирование процессов теплообмена между газопроводом и окружающей средой // Вестник СамГТУ. Технические науки. – 2015. – № 2. – С. 66–75.
13. Математическое моделирование взаимодействия наземных трубопроводов с окружающей средой / Ю.Д. Земенков, Б.В. Моисеев, К.Н. Илюхин, Н.В. Налобин // Известия ВУЗов. Нефть и газ. – 2014. – № 2. – С. 51–56.
14. Reza Madoliat, Esmaeel Khanmirza, Hamid Reza Moetamedzadeh. Transient simulation of gas pipeline networks using intelligent methods // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – February 2016. – V. 29. – P. 517–529.
15. Dorao C.A., Fernandino M. Simulation of transients in natural gas pipelines // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – March 2011. – V. 3. – Iss. 1. – P. 349–355.
16. Atlas-Yakutia. 2007–2017. URL: <http://atlas-yakutia.ru> (дата обращения: 12.04.2017).
17. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 599 с.
18. Wilcox D.C. Turbulence Modeling for CFD. – Canada; California: DCW Industries Inc., 1993. – 460 p.
19. Validation of 1D flow model for high pressure offshore natural gas pipelines / J.F. Helgaker, A. Oosterkamp, L.I. Langelandsvik, T. Ytrehus // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – January 2014. – V. 16. – P. 44–56.
20. Марков Е.В., Пульников С.А., Гербер А.Д. Проблемы задания граничных условий при моделировании теплового взаимодействия «горячих» трубопроводов с многолетнемерзлыми грунтами // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 2 (Ч. 10). – С. 2106–2110.
21. Вязунов Е.В., Федоров В.В. Опыт определения эмпирических значений температуропроводности грунтов по результатам измерений температуры на метеостанциях // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2011. – № 3 (25). – С. 45–47.
22. Математическая модель температурного режима трубопроводов в вечномерзлых грунтах / Ю.Д. Земенков, Б.В. Моисеев, К.Н. Илюхин, Н.В. Налобин // Известия ВУЗов. Нефть и газ. – 2012. – № 4. – С. 96–99.
23. Баутин С.П., Обухов А.Г. Одно точное стационарное решение системы уравнений газовой динамики // Известия ВУЗов. Нефть и газ. – 2013. – № 4. – С. 81–86.
24. Баутин С.П., Обухов А.Г. Об одном виде краевых условий при расчете трехмерных нестационарных течений сжимаемого вязкого теплопроводного газа // Известия ВУЗов. Нефть и газ. – 2013. – № 5. – С. 55–64.
25. Волков К.Н. Пристеночное моделирование в расчетах турбулентных течений на неструктурированных сетках // Теплофизика и аэромеханика. – 2007. – Т. 14. – № 1. – С. 113–129.
26. Salami L.A. An investigation of turbulent developing flow at the entrance to a smooth pipe // International Journal of Heat and Fluid Flow. – December 1986. – V. 7. – Iss. 4. – P. 247–257.
27. Tatsuhiro Kiuchi. An implicit method for transient gas flows in pipe networks // International Journal of Heat and Fluid Flow. – October 1994. – V. 15. – Iss. 5. – P. 378–383.

Выводы

Проведенные исследования показали возможность построения комплекса численных моделей для процессов, протекающих в газопроводе и окружающей среде. Разработанный алгоритм позволяет осуществлять моделирование тепловых и гидравлических процессов в газопроводе при минимальных требованиях к вычислительным ресурсам и оперативной корректировке параметров модели. Задачи поиска оптимальных режимов работы газопровода, в частности снижения суммарных энергозатрат на перекачивание газа, могут быть выполнены оперативно для краткосрочных промежутков времени с минимальной погрешностью.

28. Comparison study on the accuracy and efficiency of the four forms of hydraulic equation of a natural gas pipeline based on linearized solution / Peng Wang, Bo Yu, Yajun Deng, Yu Zhao // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. – January 2015. – V. 22. – P. 235–244.
29. ГОСТ 30319.2–2015. Газ природный. Методы расчета физических свойств. Вычисление физических свойств на основе данных о плотности при стандартных условиях и содержании азота и диоксида углерода. – М.: Стандартинформ, 2016. – 13 с.
30. Optimal operation of trunk natural gas pipelines via an inertia-adaptive particle swarm optimization algorithm / Xia Wu, Changjun Li, Wenlong Jia, Yufa He // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. – November 2014. – V. 21. – P. 10–18.
31. Madoliat R., Khanmirza E., Pourfard A. Application of PSO and cultural algorithms for transient analysis of natural gas pipeline // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 20 January 2017. – V. 149. – P. 504–514.
32. Optimization of natural gas pipeline transportation using ant colony optimization / A. Chebouba, F. Yalaoui, A. Smati, L. Amodeo, K. Younsi, A. Tairi // *Computers & Operations Research*. – June 2009. – V. 36. – Iss. 6. – P. 1916–1923.

Поступила 28.04.2017 г.

Информация об авторах

Базаров А.А., доктор технических наук, доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий электротехнического факультета Самарского государственного технического университета.

Данилушкин А.И., доктор технических наук, профессор кафедры электроснабжения промышленных предприятий электротехнического факультета Самарского государственного технического университета.

UDC 536.244

MODELING OF THERMAL AND HYDRAULIC PROCESSES IN THE MAIN GAS PIPELINE**Alexander A. Bazarov¹,**
aleksbazarov@yandex.ru**Alexander I. Danilushkin¹,**
aidanilushkin@mail.ru¹ Samara State Technical University,
244, Molodogvardeyskay street, Samara, 443100, Russia.

The relevance of the discussed issue is caused by the necessity to improve the procedures of designing thermohydraulic modes of a pipeline for reducing power requirements on gas transporting and increasing carrying capacity of the main pipeline.

The main aim of the study is to analyze the existing design procedures of thermal and hydraulic processes and to develop the advanced economical alternatives. The paper considers the complex of problems on modelling the hydrodynamic and thermal processes in the system «gas stream – pipe – circumambient». Gas swapping is accompanied by its heating at compression, that is reflected in pressure growth in a pipeline and capacity reduction. To decrease power inputs on gas transporting the authors have considered the complex of modelling problems.

The methods. The authors applied the finite element method realized in software package Comsol to calculate thermal and hydraulic processes in the ground and the pipeline. The influence of air temperature seasonal modifications on thermal streams between the pipeline and the ground was analyzed. Taking into account large inertia of heat transfer processes in the ground the authors proposed the consecutive algorithm of solving the problem of modelling heat transfer in the ground and thermo- and fluid dynamics in a pipe with moving gas.

The results. The authors developed the numerical model of heat distribution processes in the ground and determined the parameters of the models for stationary modes. On the basis of the thermohydraulic model of a gas stream in a pipe the velocity profile and thickness of a wall layer were determined taking into account heat exchange with environment. This allowed passing to a thermal problem with the moving two-layer medium, equivalent in temperature distribution in the pipeline and magnitude of a thermal stream into environment. Based on the calculations of thermal processes in the ground the authors determined the parameters of the simplified thermohydraulic model for a pipeline that allows gaining the solutions for a great range of environment temperature.

Key words:

Thermal processes, nonlinear problem, hydraulics, connected model, turbulent regime, approximation of external heat transfer.

REFERENCES

- Sokolov S.M., Kisev S.V. Designing of field pipelines in the communication corridors under difficult condition. *Higher Educational Institutions News. Oil and Gas*, 2014, no. 4, pp. 77–79. In Rus.
- Dudin S.M., Shipovalov A.N., Podorozhnikov S.Yu., Zemenkov Yu.D. Prospects for reducing energy costs for hydrocarbon transportation. *Higher Educational Institutions News. Oil and Gas*, 2011, no. 2, pp. 65–69. In Rus.
- Berkutov R.A., Malyushin N.A. On-line detection of the optimal depth of gas cooling at compressor stations in trunk gas pipelines. *Higher Educational Institutions News. Oil and Gas*, 2010, no. 4, pp. 53–58. In Rus.
- Baykov I.R., Kitaev S.V., Shammazov I.A. Prospects of energy saving in long operating gas-transport system. *Transport i khranenie nefteproduktov i uglevodородного syirya*, 2012, no. 4, pp. 9–13. In Rus.
- Korshunov S.A., Chionov A.M., Kulik V.S., Kazak K.A. Influence of a pipe heat capacity on heat transfer when transporting natural gas. *Truboprovodny transport: teoriya i praktika*, 2013, no. 6, pp. 8–11. In Rus.
- Yanvarev I.A., Vanyashov A.D., Krupnikov A.V. Thermal Management Technologies Development for the Gas Transport on the Gas-main Pipeline. *Procedia Engineering*, 2015, vol. 113, pp. 237–243.
- Dongxu Han, Bo Yu, Yi Wang, Yu Zhao, Guojun Yu. Fast thermal simulation of a heated crude oil pipeline with a BFC-Based POD reduced-order model. *Applied Thermal Engineering*, 5 September 2015, vol. 88, pp. 217–229.
- Chionov A.M., Cherepanov A.V. Modeling pipe-line system with different flow capacity in nonsteady state. *Truboprovodny transport: teoriya i praktika*, 2015, no. 4, pp. 18–21. In Rus.
- Abraham Debebe Woldeyohannes, Mohd Amin Abd Majid. Simulation model for natural gas transmission pipeline network system. *Simulation Modelling Practice and Theory*, January 2011, vol. 19, Iss. 1, pp. 196–212.
- Chionov A.M. Method of calculating parameters of gas flow in a pipe-line in approach of axial symmetry of environmental temperature field. *Truboprovodny transport: teoriya i praktika*, 2014, no. 3–4, pp. 38–43. In Rus.
- Mahmood Farzaneh-Gord, Hamid Reza Rahbari. Unsteady natural gas flow within pipeline network, an analytical approach. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, January 2016, vol. 28, pp. 397–409.
- Bazarov A.A., Danilushkin A.I. Modeling environment-pipeline heat exchange. *Vestnik SamGTU. Tehnicheskie nauki*, 2015, no. 2, pp. 66–75. In Rus
- Zemenkov Yu.D., Moiseev B.V., Ilyukhin K.N., Nalobin N.V. Mathematical modelling of ground-surface pipelines interacting with environment. *Higher Educational Institutions News. Oil and Gas*, 2014, no. 2, pp. 51–56. In Rus.
- Reza Madoliat, Esmaeel Khanmirza, Hamid Reza Moetamedzadeh. Transient simulation of gas pipeline networks using intelligent methods. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, February 2016, vol. 29, pp. 517–529.
- Dorao C.A., Fernandino M. Simulation of transients in natural gas pipelines. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, March 2011, vol. 3, Iss. 1, pp. 349–355.
- Atlas-Yakutia. 2007–2017*. Available at: <http://atlas-yakutia.ru> (accessed 12 April 2017).
- Lyikov A.V. *Teoriya teploprovodnosti* [Thermal conductivity]. Moscow, Visshaya shkola Publ., 1967. 599 p.
- Wilcox D.C. *Turbulence Modeling for CFD*. Canada; California, DCW Industries Inc., 1993. 460 p.

19. Helgaker J.F., Oosterkamp A., Langelandsvik L.I., Ytrehus T. Validation of 1D flow model for high pressure offshore natural gas pipelines. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, January 2014, vol. 16, pp. 44–56.
20. Markov E.V., Pulnikov S.A., Gerber A.D. Problems in setting the boundary conditions when modeling thermal interaction of «hot» pipe-lines with permafrost soils. *Fundamentalnye issledovaniya*, 2015, no. 2 (P. 10), pp. 2106–2110. In Rus.
21. Vyazunov E.V., Fedorov V.V. Experience in defining empirical values of soil temperature conductivity by temperature measurements results at meteostations. *Truboprovodny transport: teoriya i praktika*, 2011, no. 3 (25), pp. 45–47. In Rus.
22. Zemenkov Yu.D., Moiseev B.V., Ilyukhin K.N., Nalobin N.V. Mathematical model of temperature condition of pipelines in permafrost grounds. *Higher Educational Institutions News. Oil and Gas*, 2012, no. 4, pp. 96–99. In Rus.
23. Bautin S.P., Obukhov A.G. A single exact stationary solution of the gas dynamics equations system. *Higher Educational Institutions News. Oil and Gas*, 2013, no. 4, pp. 81–86. In Rus.
24. Bautin S.P., Obukhov A.G. About one type of boundary conditions at calculation of 3D unsteady-state-flow of compressible viscous heat-conducting gas. *Higher Educational Institutions News. Oil and Gas*, 2013, no. 5, pp. 55–64. In Rus.
25. Volkov K.N. Pristenochnoe modelirovanie v raschetakh turbulentnykh techeniy na nestrukturirovannykh setkakh [Near wall modeling in calculations of turbulent flows in unstructured mesh]. *Teplofizika i aeromekhanika*, 2007, vol. 14, no. 1, pp. 113–129.
26. Salami L.A. An investigation of turbulent developing flow at the entrance to a smooth pipe. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, December 1986, vol. 7, Iss. 4, pp. 247–257.
27. Tatsuhiko Kiuchi. An implicit method for transient gas flows in pipe networks. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, October 1994, vol. 15, Iss. 5, pp. 378–383.
28. Peng Wang, Bo Yu, Yajun Deng, Yu Zhao. Comparison study on the accuracy and efficiency of the four forms of hydraulic equation of a natural gas pipeline based on linearized solution. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, January 2015, vol. 22, pp. 235–244.
29. GOST 30319.1–96. *Gaz prirodny. Metody rascheta. Metody rascheta fizicheskikh svoystv. Vychislenie fizicheskikh svoystv na osnove dannykh o plotnosti pri standartnykh usloviyakh i soderzhanii azota i dioksida ugleroda* [State Standard 30319.1–96. Natural gas. Calculation techniques of physical features. Physical features calculation based on the data on density under standard conditions and content of nitrogen and carbon dioxide]. Moscow, Standartinform Publ., 2016. 13 p.
30. Xia Wu, Changjun Li, Wenlong Jia, Yufa He. Optimal operation of trunk natural gas pipelines via an inertia-adaptive particle swarm optimization algorithm. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, November 2014, vol. 21, pp. 10–18.
31. Reza Madoliat, Esmaeel Khanmirza, Ali Pourfard. Application of PSO and cultural algorithms for transient analysis of natural gas pipeline. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 20 January 2017, vol. 149, pp. 504–514.
32. Chebouba A., Yalaoui F., Smati A., Amodeo L., Younsi K., Tairi A. Optimization of natural gas pipeline transportation using ant colony optimization. *Computers & Operations Research*, June 2009, vol. 36, Iss. 6, pp. 1916–1923.

Received: 28 April 2017.

Information about the authors

Alexander A. Bazarov, Dr. Sc., associate professor, Samara State Technical University.

Alexander I. Danilushkin, Dr. Sc., professor, Samara State Technical University.

УДК 532.546:536.421

ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОБ ОБРАЗОВАНИИ ГИДРАТА ДВУОКИСИ УГЛЕРОДА В ПОРИСТОМ ПЛАСТЕ, ИЗНАЧАЛЬНО НАСЫЩЕННОМ ГИДРАТОМ МЕТАНА

Гималтдинов Ильяс Кадирович¹,

iljas_g@mail.ru

Столповский Максим Владимирович¹,

s_maxim.pmm@mail.ru

Додова Маргарита Иссаевна¹,

dodova.m@yandex.ru

¹ Уфимский государственный нефтяной технический университет,
Россия, 450062, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

Актуальность работы обусловлена теоретическим исследованием процессов образования газовых гидратов в пористых средах применительно к проблемам добычи, транспортировки, консервации и хранения углеводородного сырья.

Цель исследования: на основе математической модели рассмотреть в осесимметричной постановке задачу о замещении гидрата метана, изначально содержащегося в пористом пласте, гидратом углекислого газа и выявить закономерности динамики образования газовых гидратов в пористой среде конечной протяженности при нагнетании газа через его левую границу, когда другая внешняя граница является открытой для потока газа.

Методы исследования: методы механики многофазных систем совместно с численными методами решения обобщенной задачи Стефана.

Результаты. Представлена математическая модель, и проведено численное исследование закачки диоксида углерода в пористый пласт, изначально насыщенный метаном и его гидратом, в осесимметричной постановке. Для решения поставленной задачи, заключающейся в нахождении распределения полей давления и температуры, а также в определении положения границы фазового перехода, был применен численный метод ловли фронтов в узел пространственной сетки. Установлено, что процесс замещения газогидрата сопровождается незначительным понижением давления и повышением температуры среды. Показано, что температура на границе фазового перехода зависит от давления закачиваемого газа. При высоких значениях давления нагнетаемого газа она стремится к своему предельному значению, зависящему от исходной гидратонасыщенности пласта. Исследованы зависимости времени полного вытеснения метана из пласта в зависимости от его проницаемости и давления нагнетаемого газа.

Ключевые слова:

Газогидраты, пористая среда, увеличение температуры, замещение газогидрата, задача Стефана, фазовые переходы, метод ловли фронта в узел пространственной сетки.

Введение

Изучение газовых гидратов на сегодняшний день представляет значительный научный и технический интерес, поскольку большая часть природного газа содержится в виде гидратной фазы. Существующие традиционные способы добычи газа из состава гидрата, такие как нагрев, разгерметизация пласта или закачка ингибитора [1], отличаются низкой энергоэффективностью [2] и могут приводить к геологическим опасностям во время добычи газа [3]. Поэтому для решения указанных проблем при добыче газа из состава гидрата предлагается использовать закачку в пористый пласт углекислого газа. Этот метод основан на замещении молекул метана, входящих в состав гидрата, молекулами углекислого газа.

Экспериментальные исследования замещения метана в газогидрате углекислым газом были проведены в работах [4–11]. Математические модели образования и разложения газогидратов в пористых средах при инъекции газа рассмотрены, например, в работах [12, 13]. Однако в данных работах закачивается тот же самый газ, который насыщает пласт в начальном состоянии. Математиче-

ская модель закачки углекислого газа в пористый пласт, насыщенный метаном и водой, представлена в работе [14]. В [15] исследуются особенности разложения газогидрата метана при инъекции теплового углекислого газа в пористую среду, насыщенную метаном и его газогидратом. Задача об инъекции вскипающей углекислоты была рассмотрена в [16].

В работах [17, 18] рассмотрены эксперименты, подтверждающие возможность замещения в газогидрате метана диоксида углерода при давлениях и температурах, соответствующих на фазовой диаграмме системы «метан–вода» зоне стабильного существования газогидрата метана. В настоящей работе на основе рассмотренных выше экспериментов представлена математическая модель инъекции углекислого газа в метаногидратный пласт конечной длины, при давлении и температуре, соответствующих стабильному устойчивому состоянию гидратов обоих газов. Принципиальная особенность математической модели такой задачи состоит в учете не только фазовых переходов, но и массопереноса в пористой среде. Необходимость учитывать фильтрационные процессы (движение

газа в пористой среде) усложняет задачу, поскольку, хотя она и сводится к задаче Стефана, но, в отличие от классической задачи Стефана, температура фазового перехода зависит от давления.

Известно, что большинство численных методов решения задач с фазовым переходом (задач Стефана) условно можно разделить на две группы: схемы сквозного счета и схемы с явным выделением фронта. Алгоритмы сквозного счета особенно широко применяются для многомерных задач, однако точность расчета, как значения температуры, так и положения границы раздела фаз, сильно зависит от параметра сглаживания, определить который часто довольно непросто. Поэтому в данной работе для решения задачи используется метод ловли фронта в узел пространственной сетки, рассмотрение которого представлено в работах [13, 19].

Постановка задачи

Условия существования газогидратов (диоксида углерода и метана) показаны на фазовой диаграмме (рис. 1) [20]. На данной диаграмме кривая 1 – кривая кипения CO_2 , а кривые 2 и 3 определяют равновесные условия диссоциации гидратов CH_4 и CO_2 , соответственно (области стабильного существования гидратов расположены выше этих кривых).

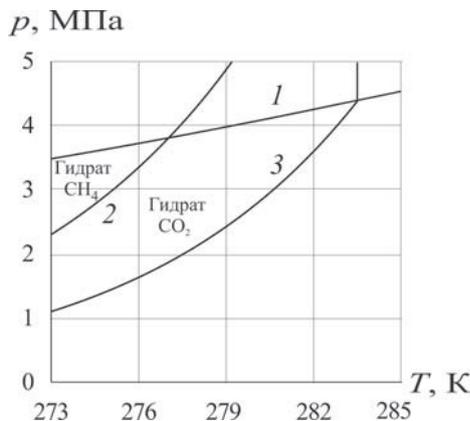


Рис. 1. Фазовые диаграммы систем « $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ » и « $\text{CH}_4\text{-H}_2\text{O}$ »

Fig. 1. PT diagrams of $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ and $\text{CH}_4\text{-H}_2\text{O}$ systems

Рассмотрим круговой пористый пласт с радиусом контура питания R_k , насыщенный в начальный момент времени газом (метаном) и его гидратом, давление p_0 и температура T_0 которых соответствуют условиям их стабильного существования, т. е. лежат выше кривой 2 (рис. 1). Будем полагать, что в центре пласта пробурена скважина радиуса r_w , вскрывшая его на всю толщину, через которую закачивается углекислый газ под давлением p_e и температурой T_e . Данные параметры соответствуют условиям стабильного существования углекислого газа и его гидрата (выше кривой 3), а также метана и воды (выше кривой 2). Положим, что в результате нагнетания диоксида углерода в пласте образуются две области. Так, в ближней, примыкающей к

скважине, области в порах присутствуют CO_2 и его гидрат, а в дальней, примыкающей к контуру питания, – CH_4 и его гидрат. При этом возникает подвижная граница фазовых переходов $r=r_{(t)}$, движущаяся вглубь пласта и разделяющая между собой две указанные области. Будем считать данную границу фазовых переходов устойчивой, поскольку вязкость углекислого газа выше вязкости метана и течения газов ламинарное.

При описании процессов тепло- и массопереноса, сопровождающихся фазовым переходом в пористой среде, примем следующие допущения: скелет пористой среды, гидраты метана и углекислого газа несжимаемы и неподвижны, пористость постоянна, газы являются калорически совершенными:

$$\phi, \rho_{sk}, \rho_{h(i)} = \text{const}, v_{sk}, v_{h(i)} = 0, \rho_{g(i)} = p/R_{g(i)} T.$$

Здесь ϕ – пористость; ρ_{sk} и v_{sk} – соответственно плотность и скорость скелета пористой среды; ρ_h и v_h – соответственно плотность и скорость гидрата; ρ_g – плотность газовой фазы; p – давление; T – температура; R_g – приведенная газовая постоянная. Здесь и в дальнейшем нижние индексы $i=m$ и d соответствуют параметрам метана и диоксида углерода или их гидратам. Кроме того, примем одно-температурную модель пористой среды, т. е. температура пористой среды и насыщающего её вещества в данной точке совпадают. Будем полагать, что гидраты углекислого газа и метана являются двухкомпонентными системами с массовыми долями газа соответственно G_d и G_m .

Система основных уравнений, включающая в себя уравнения неразрывности и притока тепла в пренебрежении баротермического эффекта, а также закон Дарси при отмеченных выше допущениях имеют вид:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\phi S_{g(i)} \rho_{g(i)}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \phi S_{g(i)} v_{g(i)} \rho_{g(i)}) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho c T) + c_{g(i)} \rho_{g(i)} \phi S_{g(i)} v_{g(i)} \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right), \quad (2)$$

$$\phi S_{g(i)} v_{g(i)} = - \frac{k_{g(i)} \partial p}{\mu_{g(i)} \partial r}. \quad (3)$$

Здесь r – радиальная координата; t – время; $S_{g(i)}$, $v_{g(i)}$, $c_{g(i)}$, $\mu_{g(i)}$ – соответственно насыщенность пор, скорость, удельная теплоемкость, вязкость газовой фазы ($i=d, m$), ρc – удельная объемная теплоемкость; λ – коэффициент теплопроводности. Поскольку основной вклад в теплопередачу вносят параметры скелета, то ρc и λ будем считать постоянными величинами. Зависимость коэффициента проницаемости $k_{g(i)}$ газовой фазы от текущей газонасыщенности будем задавать на основе формулы Козени [21]:

$$k_{g(i)} = k_0 S_{g(i)}^3,$$

где k_0 – коэффициент абсолютной проницаемости пласта.

Поскольку, как было отмечено выше, перемещение газов отсутствует и имеется устойчивый фронт вытеснения $r=r_{(n)}$, условия баланса массы и тепла на нем имеют вид [14–16, 22, 23]:

$$\begin{aligned} \phi S_{g(d)} \rho_{g(d)} (v_{g(d)} - \dot{r}_{(n)}) &= \phi S_{h(d)} G_{(d)} \rho_{h(d)} \dot{r}_{(n)}, \\ \phi S_{g(m)} \rho_{g(m)} (v_{g(m)} - \dot{r}_{(n)}) &= \phi S_{h(m)} G_{(m)} \rho_{h(m)} \dot{r}_{(n)}, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \lambda \frac{\partial T_{(d)}}{\partial r} - \lambda \frac{\partial T_{(m)}}{\partial r} &= \\ &= \phi (\rho_{h(d)} S_{h(d)} L_{h(d)} - \rho_{h(m)} S_{h(m)} L_{h(m)}) \dot{r}_{(n)}. \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь $\dot{r}_{(n)}$ – скорость движения границы фазового перехода. Применив к (4) закон Дарси (3), получим:

$$-\frac{k_{g(d)}}{\mu_{g(d)}} \frac{\partial p_{(d)}}{\partial r} = \phi \left(S_{g(d)} + \frac{S_{h(d)} G_{(d)} \rho_{h(d)}}{\rho_{g(d)}} \right) \dot{r}_{(n)}, \quad (6)$$

$$-\frac{k_{g(m)}}{\mu_{g(m)}} \frac{\partial p_{(m)}}{\partial r} = \phi \left(S_{g(m)} + \frac{S_{h(m)} G_{(m)} \rho_{h(m)}}{\rho_{g(m)}} \right) \dot{r}_{(n)}. \quad (7)$$

Кроме того, давление и температуру на данной границе будем считать величинами непрерывными:

$$p_{(d)} = p_{(m)} = p_{(n)}, \quad r = r_{(n)}, \quad (8)$$

$$T_{(d)} = T_{(m)} = T_{(n)}, \quad r = r_{(n)}. \quad (9)$$

Поскольку вся вода, находящаяся в составе гидрата метана, при замещении переходит в состав гидрата углекислого газа, то:

$$\phi(1 - G_d) \rho_{h(d)} S_{h(d)} = \phi(1 - G_m) \rho_{h(m)} S_{h(m)}. \quad (10)$$

В начальный момент времени пласт насыщен гидратом метана с гидратонасыщенностью $S_{h(m)}=v$ и находится под давлением p_0 и температурой T_0 ,

$$t = 0: \quad p = p_0, \quad T = T_0, \quad S_{h(m)} = v. \quad (11)$$

Тогда для гидратонасыщенности ближней области из (10) можно записать:

$$S_{h(d)} = \frac{\rho_{h(m)}(1 - G_m)}{\rho_{h(d)}(1 - G_d)} v.$$

Через скважину закачивается углекислый газ с параметрами p_e и T_e :

$$r = r_w, \quad t > 0: \quad p = p_e, \quad T = T_e. \quad (12)$$

На контуре питания поставим условия отсутствия потока тепла и постоянства давления (открытая граница):

$$r = R_k, \quad t > 0: \quad p = p_0, \quad \frac{\partial T}{\partial r} = 0. \quad (13)$$

Применив к (1) закон Дарси (3) и пренебрегая изменением температуры в пласте по сравнению с исходной температурой, получим уравнение пьезопроводности для обеих областей:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{k_{g(i)}}{\phi S_{g(i)} \mu_{g(i)}} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r p \frac{\partial p}{\partial r} \right). \quad (14)$$

Уравнение теплопроводности (2) можно также привести к виду:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} - c_{g(i)} \rho_{g(i)} \frac{k_{g(i)}}{\mu_{g(i)}} \frac{\partial p}{\partial r} \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right). \quad (15)$$

Для решения задачи (14), (15) с начально-граничными условиями (11)–(13) и условиями (5)–(9) на границе фазового перехода данная система дифференциальных уравнений в частных производных представляется в виде неявной конечно-разностной схемы. Для ее решения используем метод ловли фронта в узел пространственной сетки, суть которого заключается в том, что за неизвестный и определяемый в ходе решения задачи временной шаг τ^{j+1} фронт фазового перехода перемещается по координатной сетке ровно на один шаг. Решение системы уравнений проводилось на каждом временном слое методом итераций. Число точек разбиения по пространственной координате $n=2000$.

Анализ результатов

На рис. 2 представлены распределения температуры и давления от координаты (рис. 2, а) для моментов времени $t=150$ сут. (линия 1) и 250 сут. (линия 2) и от времени (рис. 2, б) для точек с координатами $r=20,1$ (линия 1) и 50,1 м (линия 2) при нагнетании в пласт диоксида углерода под давлением $p_e=3,2$ МПа и температурой $T_e=274$ К. Для остальных параметров, характеризующих систему, приняты следующие значения $\phi=0,1$, $v=0,2$, $k_0=10^{-14}$ м², $p_0=3$ МПа, $T_0=274$ К, $\rho_c=2,5 \cdot 10^6$ Дж/К·м³, $\lambda=2$ Вт/м·К, $G_1=0,28$, $G_2=0,13$, $R_{g(d)}=189$ Дж/кг·К, $R_{g(m)}=520$ Дж/кг·К, $\rho_{h(d)}=1100$ кг/м³, $\rho_{h(m)}=900$ кг/м³, $\mu_{h(d)}=1,3 \cdot 10^{-5}$ Па·с, $\mu_{h(m)}=10^{-5}$ Па·с, $L_{h(d)}=4 \cdot 10^5$ Дж/кг, $L_{h(m)}=4,5 \cdot 10^5$ Дж/кг, $c_{h(d)}=800$ Дж/кг·К, $c_{h(m)}=1560$ Дж/кг·К, $r_w=0,1$ м, $R_k=100,1$ м. Как следует из рисунка, температура пласта на фронте фазового перехода поднимается выше исходной. Это объясняется тем, что объемная плотность энергии фазового перехода при образовании гидрата углекислого газа выше, чем при разложении гидрата метана. При этом давление в пласте практически не изменяется с течением времени.

На рис. 3 представлена зависимость координаты фазовых переходов от времени при нагнетании газа под давлением $p_e=3,2$ МПа. Линии 1 и 2 соответствуют значениям абсолютной проницаемости $k_0=10^{-13}$ и 10^{-14} м². Как следует из рисунка, с течением времени скорость движения границы фазового перехода уменьшается. Согласно рассматриваемой постановке, данная скорость лимитируется поступлением двуокиси на границу раздела, которая, в свою очередь, прямо пропорциональна проницаемости, и уменьшается по мере продвижения фронта вглубь пласта.

На рис. 4 представлены зависимости температуры на границе фазовых переходов (а) и ее координаты (б) от давления нагнетаемого газа для момента времени $t=10$ сут. при разных значениях исходной гидратонасыщенности пласта $v=0,2$ (кривая 1) и 0,4 (кривая 2). Остальные параметры соответствуют рис. 2. Рис. 4, а показывает, что температура на фронте замещения увеличивается с ростом давления инъекции до определенного значения, за-

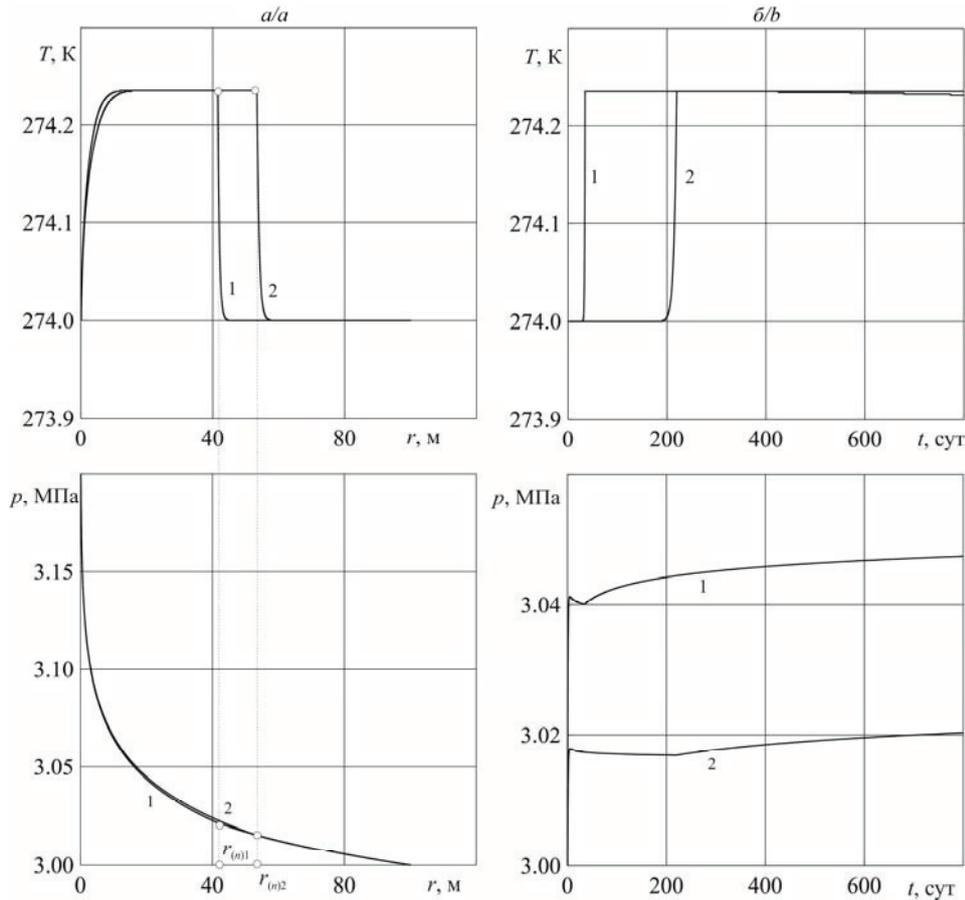


Рис. 2. Зависимость температуры и давления от координаты (а) и от времени (б)

Fig. 2. Dependence of temperature and pressure on the coordinate (a) and time (b)

висящего от исходной гидратонасыщенности пласта. Это обусловлено тем, что часть тепла, выделяющегося на фронте замещения, отводится теплопроводностью через левую границу пласта. А согласно рис. 4, б, с ростом давления закачки углекислого газа координата границы фазового перехода увеличивается, т. е. уменьшается эффективность отвода тепла через левую границу. При высоких значениях давления закачиваемого газа температура на фронте замещения стремится к своему предельному значению, определяемому формулой:

$$T_{\max} = T_0 + \frac{\phi(\rho_{hc}L_{hc}S_{hc} - \rho_{hm}L_{hm}S_{hm})}{\rho c} = T_0 + \frac{\phi \nu \rho_{hm}(L_{hc}(1 - G_m) - L_{hm}(1 - G_c))}{(1 - G_c)\rho c}$$

На ис. 5, а представлены зависимости времени полной гидратации пористой среды от давления нагнетаемого газа. Линии 1 и 2 соответствуют значениям абсолютной проницаемости $k_0 = 10^{-14}$ и 10^{-15} м^2 . Как следует из рисунка, рост давления нагнетаемого газа приводит к уменьшению времени гидратации. Это объясняется тем, что скорость гидратации зависит от скорости поступления углекислого газа.

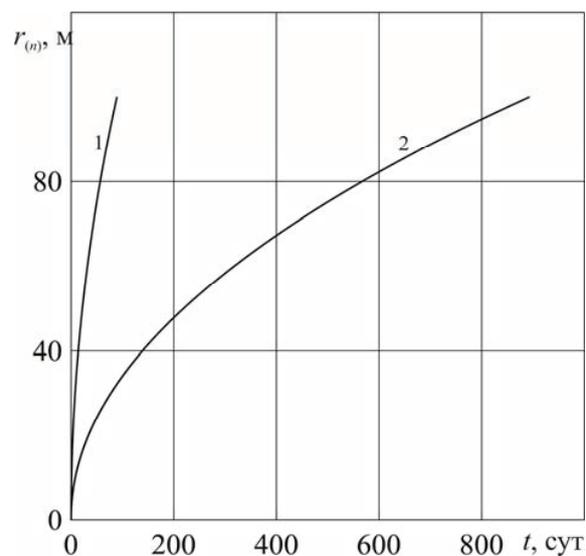


Рис. 3. Зависимость координаты границы фазового перехода от времени при значениях абсолютной проницаемости пласта: 1 - $k_0 = 10^{-14} \text{ м}^2$, 2 - $k_0 = 10^{-15} \text{ м}^2$

Fig. 3. Relation of phase boundary coordinate on time with absolute formation permeability: 1 - $k_0 = 10^{-14} \text{ м}^2$, 2 - $k_0 = 10^{-15} \text{ м}^2$

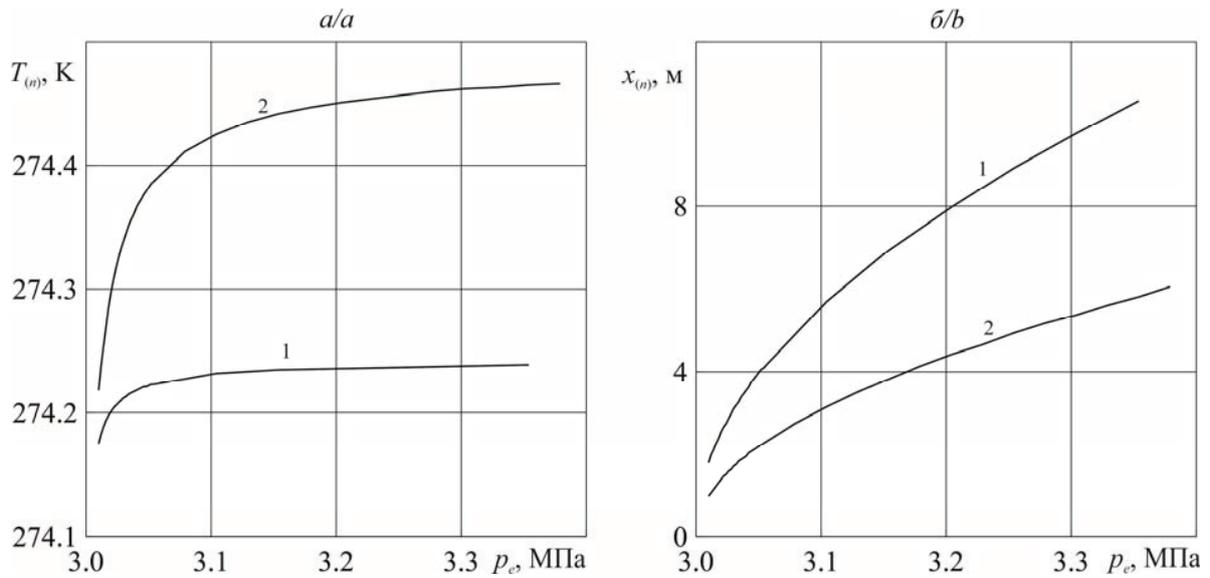


Рис. 4. Зависимости температуры на границе фазовых переходов (а) и ее координаты (б) от давления нагнетаемого газа: 1) $v=0,2$; 2) $v=0,4$

Fig. 4. Temperature – injected gas pressure dependence at phase boundaries (a) and its coordinates (b): 1) $v=0,2$; 2) $v=0,4$

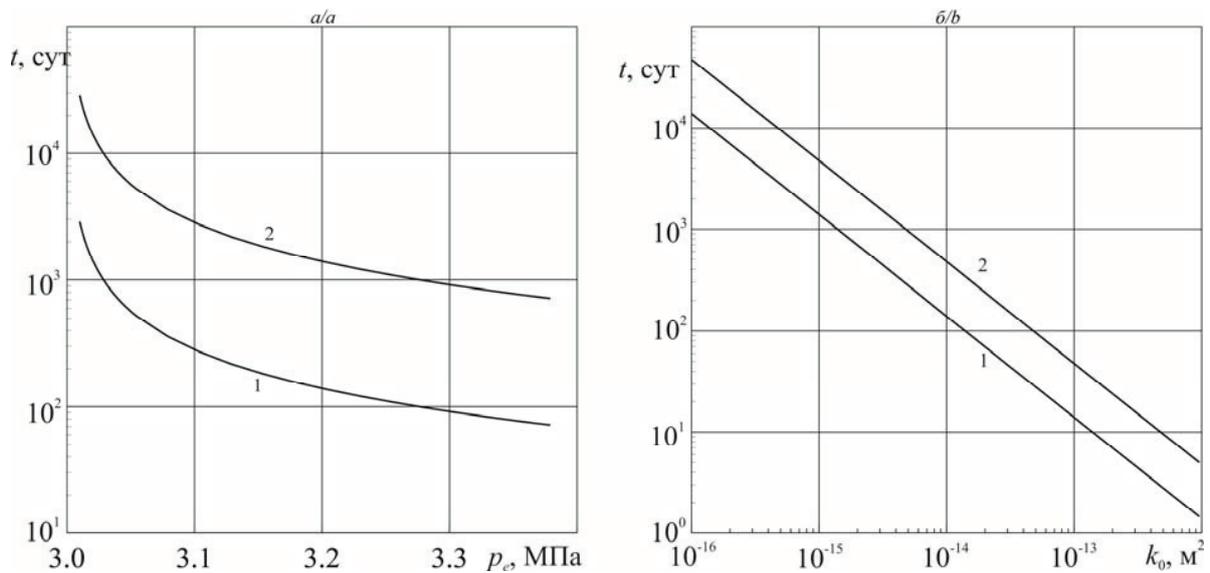


Рис. 5. Зависимость времени гидратообразования от давления нагнетаемого газа (а) и абсолютной проницаемости пласта (б)

Fig. 5. Dependence of hydrate formation time on injected gas pressure (a) and formation absolute permeability (b)

На рис. 5, б представлены зависимости времени полной гидратации от значения абсолютной проницаемости пласта. Линии 1 и 2 соответствуют значениям исходной гидратонасыщенности пласта $v=0,2$ и $0,4$.

Выводы

1. Представлена математическая модель инъекции диоксида углерода в пористый пласт, изначально насыщенный метаном и его гидратом, в осесимметричной постановке при параметрах, соответствующих условиям стабильного существования гидратов обоих газов

2. Установлено, что процесс замещения газогидрата сопровождается незначительным понижением давления и повышением температуры среды.
3. Показано, что температура на границе фазового перехода зависит от давления закачиваемого газа. При высоких значениях давления нагнетаемого газа она стремится к своему предельному значению, зависящему от исходной гидратонасыщенности пласта.
4. Исследована связь времени полного вытеснения метана из пласта от проницаемости и давления нагнетаемого газа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Demirbas A. Methane hydrates as potential energy resource. P. 2. Methane production processes from gas hydrates // *Energy Convers. Manage.* – 2010. – V. 51. – P. 1562–1571.
2. Transport and storage of CO₂ in natural gas hydrate reservoirs / G. Ersland, J. Husebo, A. Graue, B. Kvamme // *Energy Procedia.* – 2009. – V. 1. – P. 3477–3484.
3. Sequestering carbon dioxide into complex structures of naturally occurring gas hydrates / Y. Park, D.Y. Kim, J.W. Lee, D.G. Huh, K.P. Park, J. Lee, H. Lee // *Proc. Natl. Acad. Sci. – U.S.A.*, 2006. – V. 103. – P. 12690–12694.
4. Recovering methane from solid methane hydrate with carbon dioxide / H. Lee, Y. Seo, Y.T. Seo, I.L. Moudrakovski, J.A. Ripmester // *Angew. Chem. Int. Ed.* – 2003. – V. 42. – P. 5048–5051.
5. Сравнение эффективности ингибиторов гидратообразования кинетического типа и опыт их промышленного применения в ПАО «Оренбургнефть» / А.В. Фаресов, А.И. Пономарев, Е.А. Круглов, А.П. Баряев // *Научно-технический сборник «Вести газовой науки».* – 2016. – № 2 (26). – С. 117–122.
6. Determination of appropriate condition on replacing methane from hydrate with carbon dioxide / X.T. Zhou, S.S. Fan, D.Q. Liang, J.W. Du // *Energy Convers. Manage.* – 2008. – V. 49. – P. 2124–2129.
7. Goel N. In situ methane hydrate dissociation with carbon dioxide sequestration: Current knowledge and issues // *J. Petrol. Sci. Eng.* – 2006. – V. 51. – P. 169–184.
8. Experimental study of conditions for methane hydrate productivity by the CO₂ swap method / J.F. Zhao, L.X. Zhang, X.Q. Chen, Z. Fu, Y. Liu, Y.C. Song // *Energy Fuels.* – 2015. – V. 29. – P. 6887–6895.
9. Replacement of CH₄ in the hydrate by use of liquid CO₂ / M. Ota, K. Morohashi, Y. Abe, M. Watanabe, R.L. Smith, H. Inomata // *Energy Convers. Manage.* – 2005. – V. 46. – P. 1680–1691.
10. Methane recovery from methane hydrate using pressurized CO₂ / M. Ota, Y. Abe, M. Watanabe, R.L. Smith, H. Inomata // *Fluid Phase Equilib.* – 2005. – V. 228. – P. 553–559.
11. Experimental verification of methane-carbon dioxide replacement in natural gas hydrates using a differential scanning calorimeter / S. Lee, Y. Lee, J. Lee, H. Lee, Y. Seo // *Environ. Sci. Technol.* – 2013. – V. 47. – P. 13184–13190.
12. Shagapov V.Sh., Musakaev N.G., Khasanov M.K. Formation of gas hydrates in a porous medium during an injection of cold gas // *International Journal of Heat and Mass Transfer.* – 2015. – V. 84. – P. 1030–1039.
13. Численное моделирование образования газогидрата в пористом пласте конечной протяженности при продувке его газом / В.Ш. Шагапов, М.К. Хасанов, И.К. Гималтдинов, М.В. Столповский // *Прикладная механика и математическая физика.* – 2011. – Т. 52. – № 4. – С. 116–126.
14. Цыпкин Г.Г. Образование гидрата углекислого газа при его инъекции в истощенное месторождение углеводородов // *Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа.* – 2014. – № 6. – С. 101–108.
15. Хасанов М.К., Шагапов В.Ш. Разложение газогидрата метана в пористой среде при инъекции теплого углекислого газа // *Инженерно-физический журнал.* – 2016. – Т. 89. – № 5. – С. 1129–1140.
16. Хасанов М.К. Инъекция вскипающей углекислоты в пласт, сопровождающаяся замещением метана в гидрате двуокисью углерода // *Прикладная математика и механика.* – 2016. – № 5. – С. 553–565.
17. Qing Yuan, Chang-Yu Sun, Bei Liu. Methane recovery from natural gas hydrate in porous sediment using pressurized liquid CO₂ // *Energy Conversion and Management.* – 2013. – V. 67. – P. 257–264.
18. Jung J.W., Santamarina J.C. CH₄-CO₂ replacement in hydrate-bearing sediments: a pore-scale study // *Geochem. Geophys. Geosystems.* – 2010. – V. 11. – Q0AA13. DOI: 10.1029/2010GC003339.
19. Васильев В.И., Попов В.В., Тимофеева Т.С. Вычислительные методы в разработке месторождений нефти и газа. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. – 126 с.
20. Истомин В.А., Якушев В.С. Газовые гидраты в природных условиях. – М.: Недра, 1992. – 236 с.
21. Баренблатт Г.И., Ентов В.М., Рыжик В.М. Движение жидкостей и газов в природных пластах. – М.: Недра, 1982. – 211 с.
22. Шагапов В.Ш., Мусакаев Н.Г. Динамика образования и разложения газогидратов. – М.: Наука, 2016. – 240 с.
23. Хабибуллин И.Л., Солдаткин М.В. Динамика промерзания сезонно-талого слоя криолитозоны с учетом наличия снежного покрова // *Вестник башкирского университета.* – 2012. – Т. 17. – № 2. – С. 1131–1139.

Поступила 28.04.2017 г.

Информация об авторах

Гималтдинов И.К., доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики Уфимского государственного нефтяного технического университета.

Столповский М.В., кандидат физико-математических наук, старший преподаватель кафедры физики Уфимского государственного нефтяного технического университета.

Додова М.И., магистр кафедры физики Уфимского государственного нефтяного технического университета.

UDC 532.546:536.421

NUMERICAL SOLUTION OF THE PROBLEM OF CO₂ HYDRATE GENERATION IN A POROUS MEDIUM INITIALLY SATURATED WITH METHANE HYDRATE

Ilyas K. Gimaltdinov¹,

iljas_g@mail.ru

Maksim V. Stolpovsky¹,

s_maxim.pmm@mail.ru

Margarita I. Dodova¹,

dodova.m@yandex.ru

¹ Ufa State Petroleum Technological University,

1, Kosmonavtov street, Ufa, 450062, Russia.

The relevance of the discussed issue is caused by theoretical investigation of gas hydrate generation in porous medium with regard to production, transportation and conservation of hydrocarbon raw material.

The main aim of the study is to consider in axisymmetric formulation the replacement of methane hydrate, initially contained in a porous formation, by carbon dioxide hydrate, on the basis of the mathematical model, and to reveal the regularities of dynamics of gas hydrate generation in porous media of finite extent while injecting gas through its left boundary, with the other boundary being open to gas flow.

The methods used in the study: multiphase system mechanics together with computational method of Stefan generalized problem.

Results of the study. The paper introduces the mathematical model and numerical calculation of carbon dioxide injection into porous formation, initially saturated with methane and its hydrate in the axisymmetric formulation. The authors have used the numerical method of tracking the front node in the spatial grid to solve the problem of finding pressure and temperature distribution, and the boundary of phase transmission. The acquired numerical solutions were compared with analytical self-similar solutions. It was ascertained that gas hydrate displacement is followed by little pressure drop and reservoir temperature increase. It was shown that the temperature at the phase border depends on injected gas pressure. If the pressure is high it tends toward its cutoff value which depends on initial gas hydrate saturation in the reservoir. The authors studied as well the relation of methane total displacement from the reservoir as a function of its permeability and injected gas pressure.

Key words:

Gas hydrates, porous medium, temperature increase, formation and decomposition of hydrates, Stefan problem, phase transitions, method of tracking the front node in the spatial grid.

REFERENCES

- Demirbas A. Methane hydrates as potential energy resource: part 2-methane production processes from gas hydrates. *Energy Convers. Manage.* 2010, vol. 51, pp. 1562–1571.
- Ersland G., Husebo J., Graue A., Kvamme B. Transport and storage of CO₂ in natural gas hydrate reservoirs. *Energy Procedia*, 2009, vol. 1, pp. 3477–3484.
- Park Y., Kim D.Y., Lee J.W., Huh D.G., Park K.P., Lee J., Lee H. Sequestering carbon dioxide into complex structures of naturally occurring gas hydrates. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 2006, vol. 103, pp. 12690–12694.
- Lee H., Seo Y., Seo Y.T., Moudrakovski I.L., Ripmeester J.A. Recovering methane from solid methane hydrate with carbon dioxide. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2003, vol. 42, pp. 5048–5051.
- Faresov A.V., Ponomarev A.I., Kruglov E.A., Barjaev A.P. Svravnenie effektivnosti ingibitorov gidratoobrazovaniya kineticheskogo tipa i opyt ikh promyshlennogo primeneniya v PAO «Orenburgneft» [Comparison of the efficiency of kinetic type hydrate inhibitors and the experience in their industrial application at Orenburgneft]. *Nauchno-tekhnicheskyy sbornik «Vesti gazovoy nauki»*, 2016, no. 2 (26), pp. 117–122.
- Zhou X.T., Fan S.S., Liang D.Q., Du J.W. Determination of appropriate condition on replacing methane from hydrate with carbon dioxide. *Energy Convers. Manage.* 2008, vol. 49, pp. 2124–2129.
- Goel N. In situ methane hydrate dissociation with carbon dioxide sequestration: Current knowledge and issues. *J. Petrol. Sci. Eng.*, 2006, vol. 51, pp. 169–184.
- Zhao J.F., Zhang L.X., Chen X.Q., Fu Z., Liu Y., Song Y.C. Experimental study of conditions for methane hydrate productivity by the CO₂ swap method. *Energy Fuels*, 2015, vol. 29, pp. 6887–6895.
- Ota M., Morohashi K., Abe Y., Watanabe M., Smith R.L., Inomata H. Replacement of CH₄ in the hydrate by use of liquid CO₂. *Energy Convers. Manage.*, 2005, vol. 46, pp. 1680–1691.
- Ota M., Abe Y., Watanabe M., Smith R.L., Inomata H. Methane recovery from methane hydrate using pressurized CO₂. *Fluid Phase Equilib.*, 2005, vol. 228, pp. 553–559.
- Lee S., Lee Y., Lee J., Lee H., Seo Y. Experimental verification of methane-carbon dioxide replacement in natural gas hydrates using a differential scanning calorimeter. *Environ. Sci. Technol.*, 2013, vol. 47, pp. 13184–13190.
- Shagapov V.Sh., Musakaev N.G., Khasanov M.K. Formation of gas hydrates in a porous medium during an injection of cold gas. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, vol. 84, pp. 1030–1039.
- Shagapov V.Sh., Khasanov M.K., Gimaltdinov I.K., Stolpovsky M.V. Chislennoe modelirovanie obrazovaniya gazogidrata v poristom plaste konechnoy protyazhennosti pri prodavke ego gazom [Numerical simulation of gas-hydrate generation in porous layer of finite extent at its gas blow]. *Prikladnaya mekhanika i matematicheskaya fizika*, 2011, vol. 52, no. 4, pp. 116–126.
- Tsyppkin G.G. Obrazovanie gidrata uglekislogo gaza pri ego inzhektzii v istoshchennoe mestorozhdenie uglevodorodov [Generation of carbon dioxide hydrate at its injection into depleted hydrocarbon deposit]. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Mekhanika zhidkosti i gaza*, 2014, no. 6, pp. 101–108.

15. Khasanov M.K., Shagapov V.Sh. Razlozhenie gazogidrata metana v poristoy srede pri inzhektsii teplogo uglekislogo gaza [Methan gas-hydrate decomposition in porous medium at injection of warm carbon dioxide]. *Inzhenerno-fizichesky zhurnal*, 2016, vol. 89, no. 5, pp. 1129–1140.
16. Khasanov M.K. Inzhektsiya vskipayushchey uglekisloty v plast, soprovozhdayushchayasya zameshcheniem metana v gidrate dvoukisyy ugleroda [Injection of boiling up carbon dioxide into a layer accompanying by methane replacement with carbon dioxide in hydrate]. *Prikladnaya matematika i mekhanika*, 2016, no. 5, pp. 553–565.
17. Qing Yuan, Chang-Yu Sun, Bei Liu. Methane recovery from natural gas hydrate in porous sediment using pressurized liquid CO₂. *Energy Conversion and Management*, 2013, vol. 67, pp. 257–264.
18. Jung J.W., Santamarina J.C. CH₄-CO₂ replacement in hydrate-bearing sediments: a pore-scale study. *Geochem. Geophys. Geosystems*, 2010, vol. 11, Q0AA13. DOI: 10.1029/2010GC003339.
19. Vasilev V.I., Popov V.V., Timofeeva T.S. *Vychislitelnye metody v razrabotke mestorozhdeny nefti i gaza* [Calculation techniques in oil-and-gas field development]. Novosibirsk, SO RAN Publ., 2000. 126 p.
20. Istomin V.A., Yakushev V.S. *Gazovye gidraty v prirodnykh usloviyakh* [Gas hydrates in natural conditions]. Moscow, Nedra Publ., 1992. 236 p.
21. Barenblatt G.I., Entov V.M., Ryzhik V.M. *Dvizhenie zhidkostey i gazov v prirodnykh plastakh* [Movement of fluids and gases in natural layers]. Moscow, Nedra Publ., 1982. 11 p.
22. Shagapov V.Sh., Musakaev N.G. *Dinamika obrazovaniya i razlozheniya gazogidratov* [Dynamics of generation and decomposition of gas-hydrates]. Moscow, Nauka Publ., 2016. 240 p.
23. Khabibullin I.L., Soldatkin M.V. Dynamics of frost penetration into seasonal thaw depth of cryolithzone considering presence of snow cover. *Vestnik bashkirskogo universiteta*, 2012, vol. 17, no. 2, pp. 1131–1139. In Rus.

Received: 28 April 2017.

Information about the authors

Ilyas K. Gimaltdinov, Dr. Sc., professor, Ufa State Petroleum Technological University.

Maksim V. Stolpovsky, Cand. Sc., senior lecturer, Ufa State Petroleum Technological University.

Margarita I. Dodova, master, Ufa State Petroleum Technological University.

УДК 621.3

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИДЕНТИФИКАЦИЯ УЗЛОВ НАГРУЗКИ С НЕЛИНЕЙНЫМИ ВОЛЬТАМПЕРНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЙ

Харлов Николай Николаевич¹,

rcr@tpu.ru

Булыга Леонид Леонидович¹,

rcr@tpu.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность работы заключается в совершенствовании методов моделирования несинусоидальных и несимметричных режимов сложных электрических сетей. Расчет режимов сложных электрических сетей проводится с учетом распределенности параметров линий электропередач, геометрии подвески проводов, нелинейных свойств узловых нагрузок. Это в значительной мере усложняет задачу, но в то же время обеспечивает получение новых, более точных сведений о режимах, в частности определение вклада той или иной нелинейной нагрузки в формирование показателей качества напряжения и добавочных потерь электроэнергии от несинусоидальности токов. Существующее разнообразие методов и подходов к моделированию нагрузок, отраженных в статье, указывает на актуальность данного вопроса и значительный научный интерес к их развитию.

Цель исследования: разработка нового подхода к моделированию нелинейных нагрузок.

Методы исследования. В качестве исходных данных для идентификации промышленного узла нагрузки используются временные диаграммы напряжения и тока, полученные при инструментальном обследовании. Временные диаграммы напряжения и тока шестипульсного преобразователя получены по известным аналитическим соотношениям. При разработке модели и алгоритма идентификации использован известный подход к моделированию нелинейных систем. Данные измерений нагрузки получены Региональным центром ресурсосбережения ТПУ при проведении инструментального обследования.

Результаты. Предложена функциональная модель нагрузки с нелинейными вольтамперными характеристиками и необходимые расчетные соотношения, обеспечивающие математическое моделирование в установившихся режимах. Предложен алгоритм идентификации нелинейных нагрузок. В качестве примера приводятся результаты идентификации нагрузки в виде шестипульсного вентильного преобразователя и нагрузки общепромышленного узла сети 110 кВ.

Ключевые слова:

Временная диаграмма напряжения, временная диаграмма тока, математическая модель, нелинейная нагрузка, идентификация, высшие гармонические составляющие тока и напряжения, нелинейная вольтамперная характеристика, функциональная модель.

Введение

При решении различных инженерных задач, таких как расчеты и оценивание установившихся режимов, потерь электрической энергии и мощности при ее транспорте, показателей качества напряжения, возникает проблема моделирования узловых нагрузок электрической сети. Наиболее остро эта проблема имеет место при нелинейных и несимметричных нагрузках, спектры токов которых в значительной степени определяются спектрами напряжения на их зажимах, заранее, как правило, неизвестных и подлежащих определению. В ряде случаев возникает проблема оценивания вклада той или иной нагрузки в искажение и несимметрию напряжения в узлах сети, вызванные нелинейностями нагрузок. Задача в значительной степени усложняется при расчетах режимов сложных электрических сетей, где для получения адекватных результатов необходимо учитывать распределенность и несимметрию параметров линий [1]. Как показано в [2, 3], наличие в составе нагрузки емкостных элементов, а также емкостных проводимостей линий часто приводит к возникновению резонансных явлений со значительным искажением узловых напряжений и токов сети. Значительную роль в данном случае

играют нелинейные свойства узловых нагрузок. Основы концепции системного моделирования несинусоидальных и несимметричных режимов сложных электрических систем и сетей рассмотрены в [4–9]. В рамках данной концепции предполагается наличие моделей нелинейных узловых нагрузок. В опубликованных работах по вопросам моделирования нагрузок рассматриваются различные подходы, основанные на раскрытии внутренних взаимосвязей элементов, входящих в нагрузку [10–13], эквивалентировании отдельных нагрузок [14, 15] и основанные на использовании так называемого «метода черного ящика» [16–19]. Существуют способы идентификации нагрузок, основанные на данных, полученных в ходе измерений параметров режимов [20, 21]. С учетом изложенного, получение сведений о нелинейных свойствах нагрузок, которые могли бы использоваться при моделировании режимов электрических систем и сетей, представляется актуальной проблемой.

В настоящей статье предлагается решение данного вопроса путем пофазного моделирования вольтамперных характеристик нагрузок, получаемых на основе осциллографирования фазных напряжений и фазных токов на их зажимах.

Модель нагрузки

Напряжение и ток питающей сети в общем случае принимаются несинусоидальными и для фазы i записывается в форме ряда Фурье (1), (2):

$$u_i(t) = \sum_{n=1}^N U'_{i,n} \cos(n\omega t) + U''_{i,n} \sin(n\omega t), \quad (1)$$

$$i_i(t) = \sum_{n=1}^N I'_{i,n} \cos(n\omega t) + I''_{i,n} \sin(n\omega t), \quad (2)$$

где $U'_{i,n}$, $U''_{i,n}$, $I'_{i,n}$, $I''_{i,n}$ – косинусные и синусные составляющие разложения соответствующих кривых фазных напряжения и тока; N – число гармонических составляющих, учитываемых в расчете.

В комплексной форме гармонические составляющие напряжения и тока имеют вид:

$$u_i(t) = \sum_{n=-N}^N \dot{U}_{i,n} e^{jn\omega t},$$

$$i_i(t) = \sum_{n=-N}^N \dot{I}_{i,n} e^{jn\omega t},$$

где $\dot{U}_{i,n}$ – комплексные амплитуды:

$$\dot{U}_{i,n} = (U'_{i,n} - jU''_{i,n}) / 2; \quad \dot{U}_{i,k,-n} = (U'_{i,-n} + jU''_{i,-n}) / 2;$$

$$U'_{i,n} = U'_{i,-n}; \quad U''_{i,n} = -U''_{i,-n}; \quad \dot{I}_{i,n} = (I'_{i,n} - jI''_{i,n}) / 2;$$

$$\dot{I}_{i,k,-n} = (I'_{i,-n} + jI''_{i,-n}) / 2; \quad I'_{i,n} = I'_{i,-n}; \quad I''_{i,n} = -I''_{i,-n}.$$

В действующих электроустановках информация о схемах и режимах электроприемников, как правило, является недостаточно полной или, вообще, отсутствует. Нагрузка в этом случае представляется в виде параллельных активного и реактивного элементов, проводимости которых в установленном режиме изменяются периодически с периодом основной частоты. Типовая структурная схема узла нелинейной нагрузки общего вида, включающей большое количество электроприемников, представлена (в расчете на одну фазу с номером i) на рис. 1.

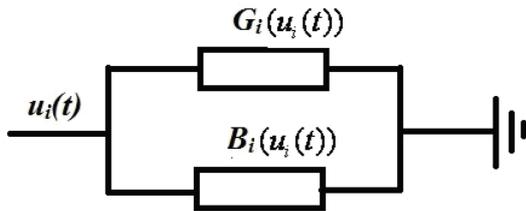


Рис. 1. Типовая структура узла нагрузки общего вида (в расчете на одну фазу)

Fig. 1. Typical structure of the load node of general form (per one phase)

Узел нагрузки фазы i с нелинейной вольтамперной характеристикой представляется нелинейной активной и реактивной проводимостями $G_i(t)$, $B_i(t)$, которые в установленном периодическом режиме также изменяются периодически в соответствии со своими нелинейными свойствами и частотой напряжения питающей сети.

Для получения функциональной и математической моделей нелинейной нагрузки воспользуемся подходом, изложенным в [22], для чего аппроксимируем зависимости проводимостей нагрузки от напряжения полиномами n -й степени (3), (4):

$$G_i(u_i(t)) = \sum_{k=0}^{\infty} g_{i,k} u_i(t)^k; \quad (3)$$

$$B_i(u_i(t)) = j \sum_{k=0}^{\infty} b_{i,k} u_i(t)^k, \quad (4)$$

где $g_{i,k}$, $b_{i,k}$ – коэффициенты с размерностью A/A^{k+1} , подлежащие определению.

В установленном режиме степень напряжения $u_i(t)^k$ раскладывается в ряд Фурье (5):

$$u_i(t)^k = U_{i,k,0} / 2 + \sum_{n=1}^{N_k} U'_{i,k,n} \cos(n\omega t) + U''_{i,k,n} \sin(n\omega t). \quad (5)$$

Здесь при нечетных значениях степени k постоянная составляющая $U_{i,k,0} = 0$; N_k – максимальное число гармонических составляющих, учитываемых в расчете при разложении в ряд Фурье напряжения $u_i(t)^k$; $U'_{i,k,n}$, $U''_{i,k,n}$ – амплитуды n -х косинусных и синусных гармонических составляющих напряжения степени $u_i(t)^k$ с размерностью B^k .

В комплексной форме выражение (5) имеет вид (6):

$$u_i(t)^k = \sum_{n=-N_k}^{N_k} \dot{U}_{i,k,n} e^{jn\omega t}, \quad (6)$$

где

$$\dot{U}_{i,k,0} = U_{i,k,0} / 2; \quad \dot{U}_{i,k,n} = (U'_{i,k,n} - jU''_{i,k,n}) / 2;$$

$$\dot{U}_{i,k,-n} = (U'_{i,k,-n} + jU''_{i,k,-n}) / 2.$$

Проводимости нагрузки фазы i в соответствии с (1), (2) определяются по формулам (7), (8)

$$G_i(t) = \sum_{k=0}^{\infty} g_{i,k} \left(\sum_{n=-N_k}^{N_k} \dot{U}_{i,k,n} e^{jn\omega t} \right); \quad (7)$$

$$B_i(t) = j \sum_{k=0}^{\infty} b_{i,k} \left(\sum_{n=-N_k}^{N_k} \dot{U}_{i,k,n} e^{jn\omega t} \right). \quad (8)$$

Активная и реактивная составляющие тока нагрузки определяются по формулам:

$$i_{i,a}(t) = u_i(t) G_i(t) = u_i(t) \sum_{k=0}^{\infty} g_{i,k} u_i(t)^k = \sum_{k=0}^{\infty} g_{i,k} u_i(t)^{k+1};$$

$$i_{i,\delta}(t) = u_i(t) B_i(t) = u_i(t) j \sum_{k=0}^{\infty} b_{i,k} u_i(t)^k =$$

$$= \sum_{k=0}^{\infty} j b_{i,k} u_i(t)^{k+1}.$$

После разложения периодических зависимостей $i_{i,a}(t)$, $i_{i,\delta}(t)$, $u_i(t)^{k+1}$ в ряд Фурье полученные выражения в комплексной форме приобретают вид:

$$\sum_{n=-N_k}^{N_k} \dot{i}_{i,a,n} e^{jn\omega t} = \sum_{k=0}^{\infty} g_{i,k} \left(\sum_{n=-N_k}^{N_k} \dot{U}_{i,k+1,n} e^{jn\omega t} \right);$$

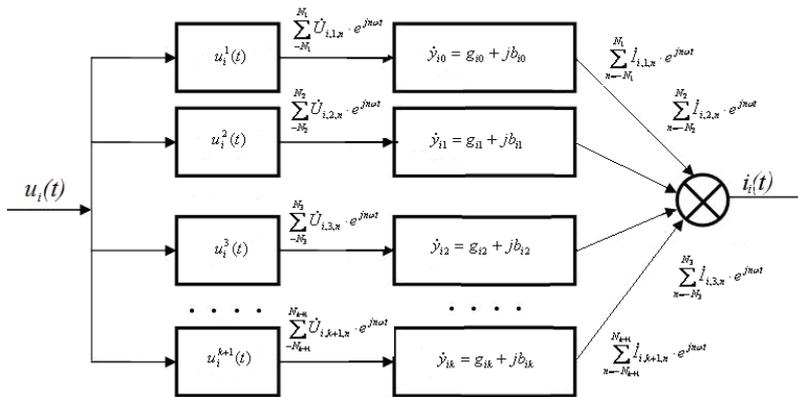


Рис. 2. Функциональная модель узла нагрузки в расчете на одну фазу

Fig. 2. Functional model of load node per one phase

$$\sum_{n=-N_k}^{N_k} i_{i,\delta,n} e^{jn\omega t} = \sum_{k=0}^{\infty} j b_{i,k} \left(\sum_{n=-N_k}^{N_k} \dot{U}_{i,k+1,n} e^{jn\omega t} \right).$$

Данные выражения соответствуют функциональной модели нагрузки (рис. 2), на входе которой действует сигнал $u_i(t)$.

Функциональная модель состоит из бесконечно большого количества параллельных каналов с номерами k .

В пределах каждого k -го канала имеется степенной блок с характеристикой $u_i(t)^{k+1}$. На выходе каждого k -го степенного блока действует сигнал:

$$u_i(t)^{k+1} = \sum_{n=-N_k}^{N_k} \dot{U}_{i,k+1,n} e^{jn\omega t}.$$

Последовательно со степенным блоком k -го канала включен блок с линейными проводимостями $y_{i,k} = g_{i,k} + j b_{i,k}$. На входе линейного блока k -го канала действует сигнал

$$u_i(t)^{k+1} = \sum_{n=-N_k}^{N_k} \dot{U}_{i,k+1,n} e^{jn\omega t}.$$

На выходе n -го линейного блока k -го канала действует сигнал $i(t)_{i,k} = \left(\sum_{n=-N_k}^{N_k} \dot{U}_{i,k+1,n} e^{jn\omega t} \right) (g_{i,k} + j b_{i,k})$, представляю-

щей собой сумму элементарного активного и реактивного токов, комплексные составляющие которых определяются как

$$\begin{aligned} \dot{I}_{i,a,k,n} &= (U'_{i,k+1,n} - j U''_{i,k+1,n}) g_{i,k}, \\ \dot{I}_{i,p,k,n} &= (U'_{i,k+1,n} - j U''_{i,k+1,n}) j b_{i,k}. \end{aligned}$$

В соответствии с данной функциональной моделью, на выходе модели фазы i действует сигнал, равный сумме элементарных токов:

$$i_i = \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{n=-N_k}^{N_k} (\dot{I}_{i,a,k,n} + \dot{I}_{i,p,k,n}) e^{jn\omega t},$$

или, переходя к временной форме ряда Фурье, получаем:

$$\begin{aligned} \dot{i}_{i,a}(t) &= \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{N_k} (\dot{I}'_{i,a,k,n} \cos(n\omega t) + \dot{I}''_{i,a,k,n} \sin(n\omega t)); \\ \dot{i}_{i,p}(t) &= \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{N_k} (\dot{I}'_{i,p,k,n} \cos(n\omega t) + \dot{I}''_{i,p,k,n} \sin(n\omega t)). \end{aligned}$$

Идентификация (определение параметров) нагрузки

Идентификация (определение параметров) узлов нагрузки сводится к определению значений $y_{i,k} = g_{i,k} + j b_{i,k}$ и выполняется в соответствии со следующим алгоритмом.

1. Задается максимальное количество каналов K_{\max} и максимальное количество гармонических составляющих, учитываемых в канале K_{\max} , равным $N_{K_{\max}}$. Выбор количества каналов K_{\max} производится в следующем порядке: при синусоидальном питающем напряжении, поскольку степень k гармонической функции содержит высшие гармоники с максимальным номером также k , K_{\max} принимается равным $N_{K_{\max}}$, где $N_{K_{\max}}$ равно максимальному числу известных гармонических составляющих переменного тока нелинейной нагрузки. При искаженном питающем напряжении K_{\max} принимается наибольшим из $N_{\max u}$ и $N_{\max i}$. Выполненное исследование показывает, что влияние высших гармонических составляющих в спектре исходной функции $u_i(t)$ на спектр степенной функции $u_i(t)^k$ и, соответственно, их влияние на режим нелинейной нагрузки с увеличением k быстро снижается.

В качестве примера на рис. 3. приведены осциллограммы фазных напряжений и токов и значения модулей гармонических составляющих напряжения и тока промышленного узла нагрузки. На рис. 4 приведены модули гармонических составляющих напряжения $u_i(t)^k$ для различных k . Поскольку с ростом номера гармонических составляющих функции $u_i(t)^k$ их значения достаточно быстро убывают для всех k , то значение k может быть ограничено (как правило, также $N_{\max i}$).

2. Определение $y_{i,k} = g_{i,k} + j b_{i,k}$ начинается с $\dot{y}_{i,N_{\max}} = g_{i,N_{\max}} + j b_{i,N_{\max}}$. Для этого для $k=N_{\max}$ выбирается комплексное значение гармоники тока нагрузки $\dot{I}_{i,N_{\max}} = \dot{I}'_{i,N_{\max}} + j \dot{I}''_{i,N_{\max}}$ и комплексное значение гармоники напряжения k -го канала $\dot{U}_{i,N_{\max}+N_{\max}} = U'_{i,N_{\max}+N_{\max}} + j U''_{i,N_{\max}+N_{\max}}$. Значение $\dot{I}_{i,N_{\max}}$ будет элементарным током канала N_{\max} с номером гармонической составляющей N_{\max} , т. е. принимается $\dot{I}_{i,N_{\max}+N_{\max}} = \dot{I}_{i,N_{\max}}$. Значение проводимости канала $N_{\max} - \dot{y}_{i,N_{\max}} = g_{i,N_{\max}} + j b_{i,N_{\max}}$ определится по формуле:

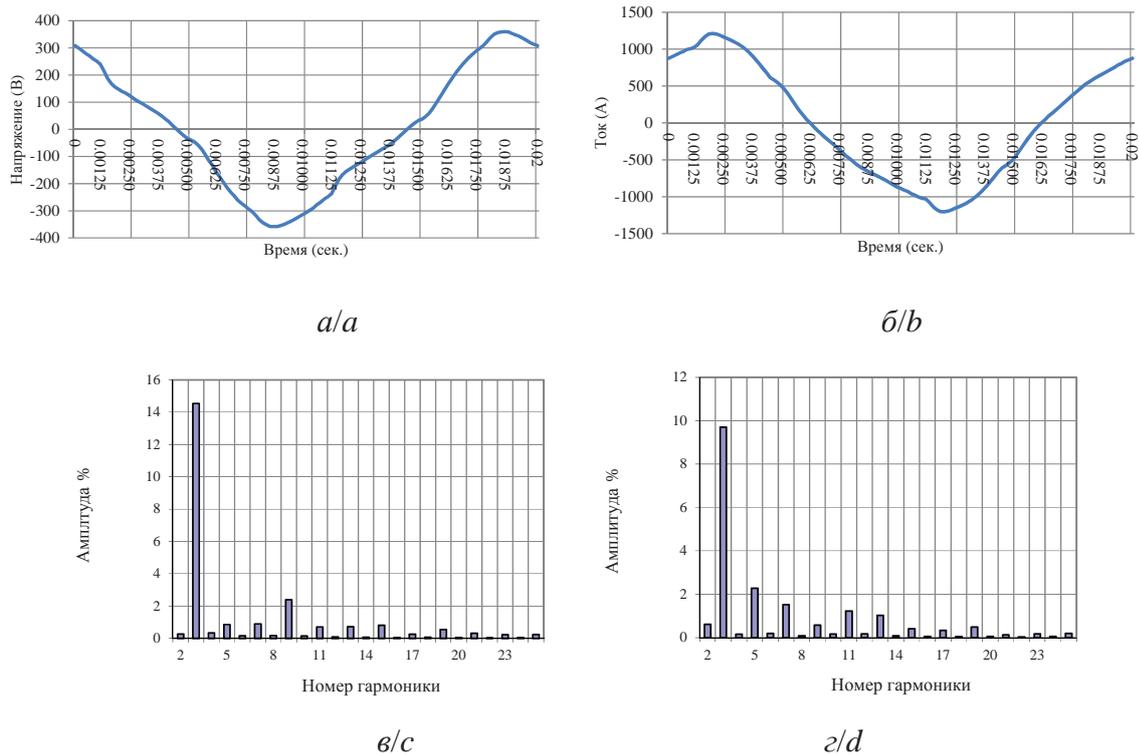


Рис. 3. Фазные напряжение (а) и ток (б) на шинах 0,4 кВ промышленного узла нагрузки; спектры фазных напряжения (в) и тока (г)

Fig. 3. Phase voltages (a) and current (b) on 0,4 kV buses of the industrial load node; spectra of phase voltages (c) and current (d)



Рис. 4. Спектры степенной функции $u_i(t)^k$ для различных значений k

Fig. 4. Spectra of the power function $u_i(t)^k$ for various values of k

$$\dot{y}_{i,N_{\max}} = \dot{I}_{i,N_{\max}} / \dot{U}_{i,N_{\max},N_{\max}}$$

Остальные гармонические составляющие канала N_{\max} определяются по формуле:

$$\dot{I}_{i,N_{\max},n} = \dot{U}_{i,N_{\max},n} y_{i,N_{\max},n}, \quad n < N_{\max}.$$

3. После вычисления гармонических составляющих элементарных токов канала N_{\max} , определяется остаточный ток нагрузки, как $i_{\text{ост}}(t) = i(t) - i_{i,N_{\max}}(t)$ и его гармонические составляющие. Количество гармонических составляющих в остаточном токе будет $N_{\max(N_{\max}-1)} = N_{\max} - 1$.

4. Выполняется переход к каналу $k = N_{\max} - 1$ и пп. 2, 3 повторяются с той лишь разницей, что вместо $i(t)$ принимается $i_{\text{ост}}(t)$.

Данный процесс продолжается, пока k не будет равно 0.

Ниже в качестве примера рассматривается моделирование и определение параметров нагрузки, представляющей собой шестипульсный мостовой выпрямитель, получающий питание от источника с симметричным синусоидальным напряжением единичной амплитуды и работающий с углом управления $\alpha = 0^\circ$, углом коммутации $\gamma = 30^\circ$, которые соответствуют $U_d = 1,543$, $I_d = 0,116$. Расчет осциллограмм переменного напряжения и тока, а также гармонический состав переменного тока в процентах от основной гармоники выполнен в соответствии с [23]. Соответствующие графики, полученные восстановлением по рядам Фурье, приведены на рис. 5, 6.

На рис. 7, 8 приведены проводимости активного и реактивного элементов, их токи и соответствующие мощности, а на рис. 9 – их вольтамперные характеристики.

Вольтамперная характеристика активного элемента схемы замещения преобразователя нелинейная и симметричная по отношению к положительной и отрицательной полуволне питающего напряжения и проходит через начало координат. Вольтамперная характеристика реактивного элемента по отношению к положительной и отрица-

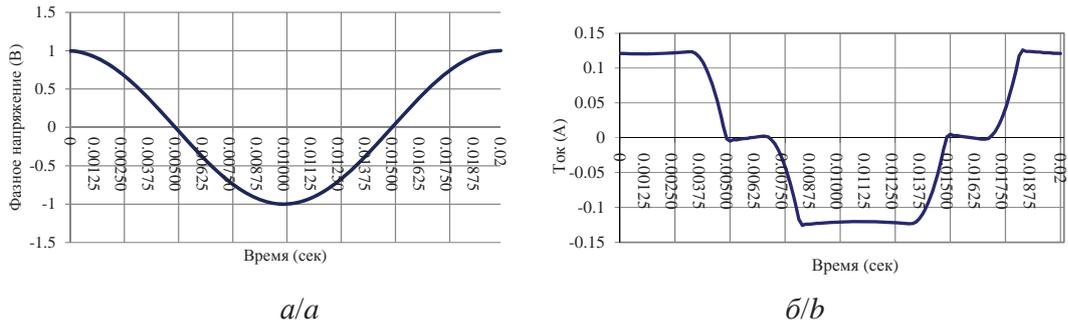


Рис. 5. Фазное напряжение (а) и фазный ток (б) на зажимах преобразователя

Fig. 5. Phase voltage (a) and phase current (b) at converter terminals

тельной полуволне питающего напряжения также симметрична, но имеет петлеобразный вид.

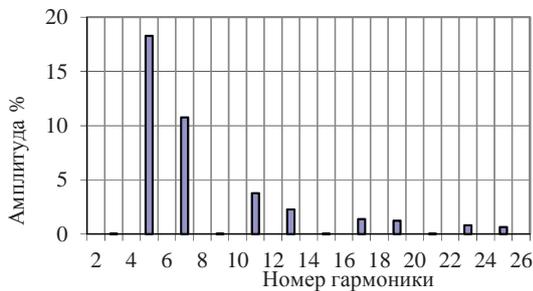


Рис. 6. Гармонический состав переменного тока преобразователя

Fig. 6. Harmonic composition of alternating current converter

На рис. 10 приведены результаты определения параметров режима для одной из фаз промышленного узла нагрузки, осциллограммы фазного напряжения и фазного тока которой приведены на рис. 3, а, а на рис. 11 – вольтамперные характеристики активного и реактивного элементов.

Обращает на себя внимание петлеобразный характер вольтамперной характеристики активного элемента и несовпадение моментов перехода через ноль фазного напряжения на его зажимах и фазного тока. Такой вид вольтамперной характеристики активного элемента характерен для узлов нагрузки промышленных электрических сетей и свидетельствует о сдвиге активного тока относительно приложенного напряжения. Величина данного сдвига составляет для рассматриваемого узла на-

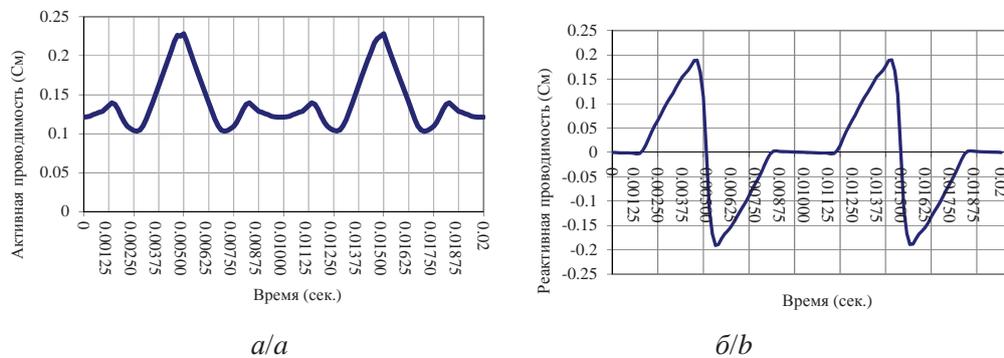


Рис. 7. Проводимости: а) активного элемента; б) реактивного элемента схемы замещения преобразовательной нагрузки

Fig. 7. Conductivity of: a) active element; b) reactive element of the converter load substitution circuit

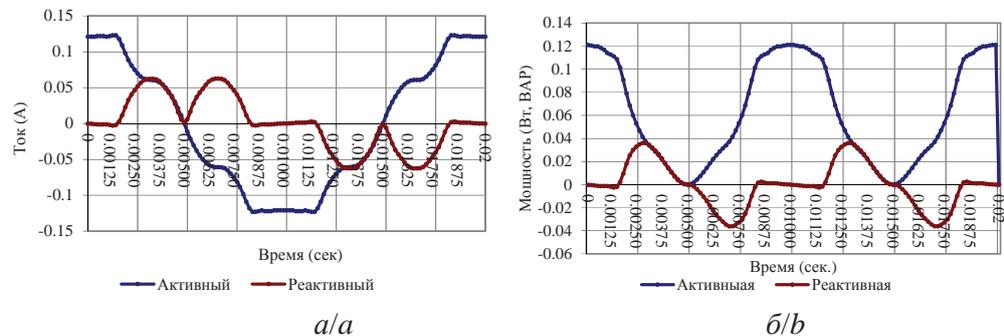


Рис. 8. а) токи; б) мощности активного и реактивного элементов схемы замещения преобразовательной нагрузки

Fig. 8. a) current; b) power of active and reactive elements of the converter load equivalent circuit

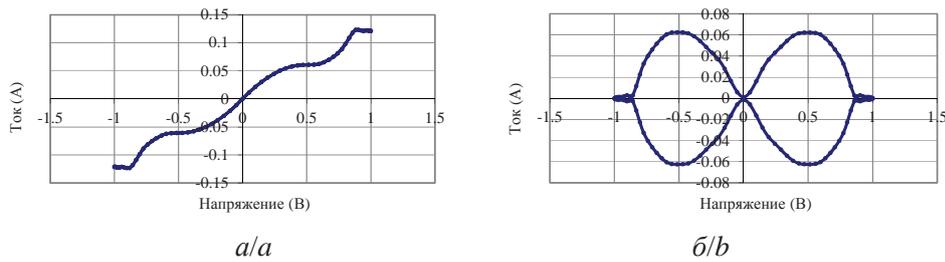


Рис. 9. Вольтамперные характеристики активного (а) и реактивного (б) элементов преобразовательной нагрузки

Fig. 9. Volt-ampere characteristics of active (a) and reactive (b) elements of the converter load

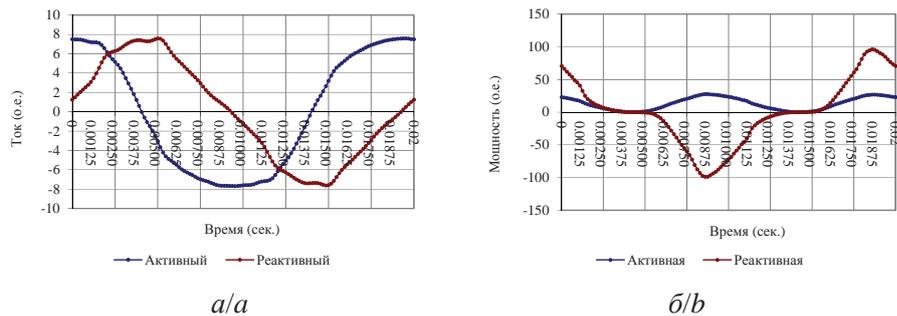


Рис. 10. а) токи; б) мощности активного и реактивного элементов схемы замещения нагрузки

Fig. 10. a) current; b) power of active and reactive elements of the load replacement circuit

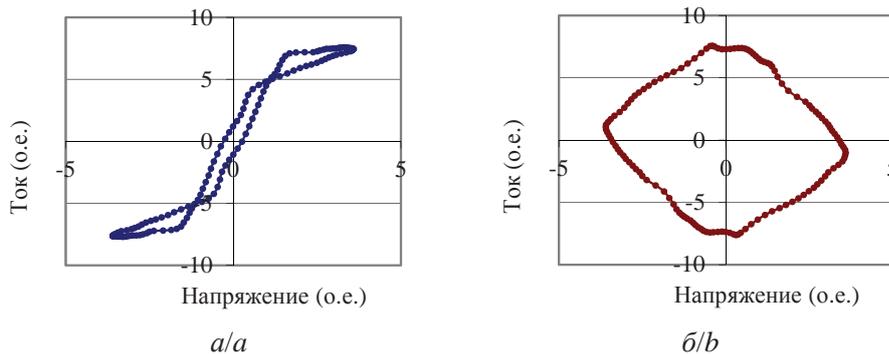


Рис. 11. Вольтамперные характеристики активного (а) и реактивного (б) элементов нагрузки фазы промышленного узла

Fig. 11. Volt-ampere characteristics of active (a) and reactive (b) load cells of the industrial node phase

грузки 5,5–8,5 эл. градусов. Причиной данного сдвига являются активные потери в элементах системы электроснабжения, вызванные наведенными токами (токи намагничивания, вихревые токи, токи, вызывающие поверхностный эффект в проводниках, и пр.).

Выводы

1. Предложенная функциональная модель нагрузки с нелинейными вольтамперными характеристиками обеспечивает математическое моделирование нагрузок в установившихся режимах.
2. Предложенный алгоритм идентификации нелинейных нагрузок по результатам измерения их временных диаграмм фазных напряжений и токов позволяет определять частичные проводимости каналов функциональной модели, по-

строение вольтамперных характеристик активного и реактивного элементов, оценивать влияние наведенных токов в элементах системы электроснабжения.

3. Полученные математические модели нелинейных нагрузок могут использоваться при моделировании несинусоидальных, несимметричных режимов электрических систем и сетей с нелинейными нагрузками, показателей качества напряжения, основных и добавочных потерь электрической энергии и оценивании вклада той или иной нелинейной нагрузки сложной электрической сети в отклонения показателей качества напряжения от нормативных значений.
3. На основе предложенного алгоритма возможно построение нелинейных эквивалентов отдельных подсистем сложной сети.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Харлов Н.Н., Боровиков В.С. Моделирование установившихся режимов сложных электрических сетей с нелинейными и несимметричными нагрузками // Энергетика России в XXI веке. Инновационное развитие и управление: Материалы Всероссийской конференции. – Иркутск, 2015. – С. 229–236.
2. Аррילהга Дж., Брэдли Д., Боджер П. Гармоники в электрических системах / пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.
3. Харлов Н.Н., Боровиков В.С. Итоги обследования режимов распределительных электрических сетей Сибири и юга России // Энергетика России в XXI веке. Инновационное развитие и управление: Материалы Всероссийской конференции. – Иркутск, 1–3 сентября 2015. – С. 183–188.
4. Kharlov N.N. About the Concept of System Modeling of Electric Energy Quality // The Second International Forum on Strategic Technology. – Mongolia, 2007. – P. 448–505.
5. Добуш В.С. Математическое моделирование электрической сети при наличии в ней нелинейной нагрузки // Апробация. – 2014. – № 5. – С. 10–12.
6. Development of calculation methods for additional electrical losses during transportation / N.N. Kharlov, T.V. Acimzhanov, V.S. Borovikov, V.Ya. Ushakov // Conference Digest the 9th International Forum on Strategic Tecnology. – Bangladesh, 2014. – P. 351–354.
7. Использование метода гармонического баланса для расчета нелинейных и несимметричных режимов в системах электроснабжения / Л.А. Кучумов, Н.Н. Харлов, Н.Ю. Картавиди, А.В. Пахомов, А.А. Кузнецов // Электричество. – 1999. – № 12. – С. 10–20.
8. Моделирование влияния величины нелинейной нагрузки на качество электроэнергии промышленных электротехнических систем / Н.Н. Портягин, М.С. Ершов, П.Ю. Барбасов, М.Ю. Чернев // Известия высших учебных заведений. Электротехника. – 2017. – Т. 60. – № 1. – С. 61–66.
9. Load modeling for wide area power systems / P. Ju, C. Qin, F. Wu, H. Xie, Y. Ning // Electrical Power Energy System. – 2014. – V. 33. – P. 909–917.
10. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Ле Конг Зань. Идентификация асинхронной нагрузки // Системы. Методы. Технологии. – 2014. – № 2. – С. 56–61.
11. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Шульгин М.С. Параметрическая идентификация элементов электроэнергетических систем. – Saarbrücken: LAP LAMBERT, 2013. – 126 с.
12. Применение эквивалентирования при расчетах частотных характеристик сопротивлений узлов электрических нагрузок / А.Н. Ожегов, Л.В. Дерендяева, И.А. Суворова, А.А. Закалата // Сборник статей. 2-е издание, исправленное и дополненное. – Киров: Изд-во Вятского государственного университета, 2016. – С. 2089–2093.
13. Arash Miranian, Kumars Rouzbehi. Nonlinear Power System Load Identification Using Local Model Networks // IEEE Transactions on Power Systems. – 2013. – V. 28. – № 3. – P. 2872–2881.
14. Knyazkin V., Cañizares C., Soder L. On the parameter estimation and modeling of aggregate power system loads // IEEE Transactions on Power Systems. – 2004. – V. 19. – № 2. – P. 1023–1031.
15. Идентификация параметров узла нагрузки с эквивалентным электроприемником / А.О. Кашканов, М.Н. Охотников, А.С. Плехов, А.В. Серебряков // Главный энергетик. – 2015. – № 9. – С. 58–62.
16. A New Method for Power System Load Modeling Using a Nonlinear System Identification Estimator / M.Gh. Jahromi, S.D. Mitchell, G. Mirzaeva, D. Gay // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2016. – V. 27. – P. 3535–3542.
17. Karlsson D., Hill D.J. Modelling and identification of nonlinear dynamic loads in power system // IEEE Transactions on Power Systems. – 1994. – V. 15. – P. 157–166.
18. Wang Y.-J., O'Connell R.M., Brownfield G. Modeling and prediction of distribution system voltage distortion caused by nonlinear residential loads // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2001. – V. 7. – P. 744–751.
19. Харлов Н.Н. Математическое моделирование и идентификация узлов нагрузки с нелинейными электроприемниками // Электричество. – 2006. – № 2. – С. 7–12.
20. Power system load modeling by learning based on system measurements / J. Wen, L. Jiang, Q. Wu, S. Cheng // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2003. – V. 18. – № 2. – P. 264–270.
21. Определение параметров элементов электроэнергетических систем по данным измерений / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков, А.А. Кушов, М.С. Шульгин // Системы. Методы. Технологии. – Иркутск: Изд-во ИрГУПС, 2015. – 184 с.
22. Идентификация и оптимизация нелинейных стохастических систем / Ю.С. Попков, О.Н. Киселев, Н.П. Петров, Б.Л. Шмульян. – М.: Энергия, 1976. – 440 с.
23. Глинтерник С.Р. Электромагнитные процессы и режимы мощных статических преобразователей. – Л.: Наука, 1968. – 308 с.

Поступила 28.04.2017 г.

Информация об авторах

Харлов Н.Н., кандидат технических наук, доцент, ведущий инженер Регионального центра ресурсосбережения Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Булыга Л.Л., аспирант кафедры электрических сетей и электротехники, инженер Регионального центра ресурсосбережения Энергетического института, Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 621.3

MODELING AND IDENTIFICATION OF LOAD NODES WITH NONLINEAR CURRENT-VOLTAGE CHARACTERISTICS BASED ON MEASUREMENT DATA

Nikolay N. Kharlov¹,

rcr@tpu.ru

Leonid L. Bulyga¹,

rcr@tpu.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance of the research consists in improving the methods of modeling non-sinusoidal and asymmetric modes of complex electrical networks. The modes of complex electrical networks are calculated taking into account the distribution of the parameters of transmission lines, geometry of wire suspension, nonlinear properties of node loads. This significantly complicates the task, but at the same time provides new, more accurate information on the modes, in particular, the determination of contribution of this or that nonlinear load to formation of voltage quality indicators and additional losses of electricity from current unsinusoidality. The existing variety of methods and approaches to modeling loads, reflected in the article, points to the relevance of the issue and significant scientific interest in their development.

The main aim is to develop a new approach to simulation of nonlinear loads.

The methods of the research. The time diagrams of voltage and current, obtained by instrumental examination, are used as the initial data to identify the industrial load node. The time diagrams of voltage and current of a six-pulse converter were obtained from the known analytical relationships. The authors have used the well-known approach to modeling nonlinear systems when developing the model and identification algorithm. The data of load measurements were obtained by the Regional center of resource saving TPU during the instrumental survey.

The results. The authors proposed the functional load model with nonlinear volt-ampere characteristics and necessary design relationships, providing mathematical modeling in steady-state modes, and the algorithm for identifying nonlinear loads. The paper introduces the results of load identification in the form of a six-pulse converter and the load of a common industrial node of the 110 kV network as an example.

Key words:

Voltage time diagram, current time diagram, mathematical model, nonlinear load, identification, higher harmonic components of current and voltage, nonlinear current-voltage characteristic, functional model.

REFERENCES

1. Kharlov N.N., Borovikov V.S. Modelirovanie ustanovivshikhsya rezhimov elektricheskikh setey s nelineynymi i nesimmetricheskimi nagruzkami [Steady-state modes modeling of complex electric networks with nonlinear and asymmetric loads]. *Materialy Vserossiyskoy konferentsii «Energetika Rossii v XXI veke. Innovatsionnoye razvitiye i upravleniye* [Proc. of the All-Russian Conference. Energy of Russia in the 21st Century. Innovative development and management]. Irkutsk, 2015. pp. 229–236.
2. Arlilaga J., Bradley D., Bodger P. *Garmoniki v elektricheskikh sistemakh* [Harmonics in electrical systems]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1990. 320 p.
3. Kharlov N.N., Borovikov V.S. Itogi obsledovaniya rezhimov raspredelitelnykh elektricheskikh setey Sibiri i yuga Rossii [Results of the survey of electrical distribution networks modes in Siberia and southern Russia]. *Materialy Vserossiyskoy konferentsii «Energetika Rossii v XXI veke. Innovatsionnoye razvitiye i upravlenie* [Proc. of the All-Russian Conference. Energy of Russia in the 21st Century. Innovative development and management]. Irkutsk, 2015. pp. 183–188.
4. Kharlov N.N. About the Concept of System Modeling of Electric Energy Quality. *The Second International Forum on Strategic Technology*. Mongolia, 2007. pp. 448–505.
5. Dobush V.S., Matematicheskoe modelirovanie elektricheskoy seti pri nalichii v ney nelineynoy nagruзки [Mathematical modeling of an electrical network at nonlinear load in it]. *Aprobatsiya*, 2014, no. 5, pp. 10–12.
6. Kharlov N.N., Acimzhanov T.V., Borovikov V.S., Ushakov V.Ya. Development of calculation methods for additional electrical losses during transportation. *Conference Digest the 9th International Forum on Strategic Tecnology*. Bangladesh, 2014. pp. 351–354.
7. Kuchumov L.A., Kharlov N.N., Kartasidi N.Yu., Pakhomov A.V., Kuznetsov A.A. Ispolzovaniye metoda garmonicheskogo balansa dlya rascheta nesinusoidalnykh i nesimmetrichnykh rezhimov v sistemakh elektrosnabzheniya [Use of harmonic balance method to calculate non-sinusoidal and asymmetric modes in power supply systems]. *Electrical Technology Russia*, 1999, no. 12, pp. 10–20.
8. Portnyagin N.N., Ershov M.S., Barbasov P.Yu., Chernev M.Yu. Modelirovanie vliyaniya velichiny nelineynoy nagruзки na kachestvo elektroenergii promyshlennykh elektrotekhnicheskikh sistem [Simulation of nonlinear load influence on the quality of electric power of industrial electrotechnical systems]. *Russian Electromechanics*, 2017, vol. 60, no. 1, pp. 61–66.
9. Ju P., Qin C., Wu F., Xie H., Ning Y. Load modeling for wide area power systems. *Electric Power Energy Systems*, 2014, vol. 33, pp. 909–917.
10. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Le Kong Zan. Identifikatsiya asinkhronnoy nagruзки [Identification of asynchronous load]. *Systems. Methods. Technologies*, 2014, no. 2, pp. 56–61.
11. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Shulgin M.S. *Parametricheskaya identifikatsiya elementov elektroenergeticheskikh sistem* [Parametric identification of elements in electric power systems]. Saarbrücken, LAP LAMBERT, 2013. 126 p.
12. Ozhegov A.N., Derendyayeva L.V., Suvorova I.A., Zakalata A.A. Primenenie ekvivalentirovaniya pri raschetakh chastotnykh kharakteristik soprotivleniy uzlov elektricheskikh nagruзок [Use of equivalence in calculation of frequency characteristics of resi-

- stances in nodes of electrical loads]. *Obshchestvo, Nauka, Innovatsii. Sbornik statey* [Society, Science, Innovation. Articles] Kirov, Vyatsky gosudarstvenny universitet, 2016. pp. 2089–2093.
13. Arash Miranian, Kumars Rouzbehi. Nonlinear Power System Load Identification Using Local Model Networks. *IEEE transactions on Power Systems*, 2013, vol. 28, no. 3, pp. 2872–2881.
 14. Knyazkin V., Cañizares C., Soder L. On the parameter estimation and modeling of aggregate power system loads. *IEEE Transmission Power System*, 2004, vol. 19, no. 2, pp. 1023–1031.
 15. Kashkanov A.O., Okhotnikov M.N., Plekhov A.S., Serebryakov A.V. Identifikatsiya parametrov uzla nagruzki s ekvivalentnym elektropriyemnikom [Identification of load node parameters with an equivalent electrical receiver]. *Glavny energetik*, 2015, no. 9, pp. 58–62.
 16. Jahromi M.G., Mitchell S.D., Mirzaeva G., Gay D. A New Method for Power System Load Modeling Using a Nonlinear System Identification Estimator. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2016, vol. 27, pp. 3535–3542.
 17. Karlsson D., Hill D.J. Modelling and identification of nonlinear dynamic loads in power systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1994, vol. 15, pp. 157–166.
 18. Wang Y.-J., O'Connell R.M., Brownfield G. Modeling and prediction of distribution system voltage distortion caused by nonlinear residential loads. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2001, vol. 7, pp. 744–751.
 19. Kharlov N.N. Matematicheskoe modelirovanie i identifikatsiya uzlov nagruzki s nelineynymi elektropriyemnikami [Mathematical modeling and identification of load nodes with nonlinear electrical receivers]. *Electrical Technology Russia*, 2006, no. 2, pp. 7–12.
 20. Wen J., Jiang L., Wu Q., Cheng S. Power system load modeling by learning based on system measurements. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2003, vol. 18, no. 2, pp. 264–270.
 21. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Kushov A.A., Shulgin M.S. Opredelenie parametrov elementov elektroenergeticheskikh sistem po dannym izmereniy [Determination of the parameters of elements in electric power systems based on measurement data]. *Systems. Methods. Technologies*. Irkutsk, IrGUPS Publ., 2015. 184 p.
 22. Popkov Yu.S., Kiselev O.N., Petrov N.P., Shmulyan B.L. *Identifikatsiya i optimizatsiya nelineynykh stokhasticheskikh sistem* [Identification and optimization of nonlinear stochastic systems]. Moscow, Energiya Publ., 1976. 440 p.
 23. Glinternik S.R. *Elektromagnitnye protsessy i rezhimy moshchnykh staticheskikh preobrazovateley* [Electromagnetic processes and modes of powerful static converters]. Leningrad, Nauka Publ., 1968. 308 p.

Received: 28 April 2017.

Information about the authors

Nikolay N. Kharlov, Cand. Sc., associate professor, chief engineer, National Research Tomsk Polytechnic University.

Leonid L. Bulyga, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 550.47

ДЕНДРОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИСКОПАЕМОЙ ЛИСТВЕННИЦЫ (УРОЧИЩЕ ПАЗЫРЫК) И СОВРЕМЕННЫХ ЛИСТВЕННИЦ ГОРНОГО АЛТАЯ

Рихванов Леонид Петрович¹,

rikhvanov@tpu.ru

Робертус Юрий Владимирович²,

ariecologia@smt.ru

Миროнова Анастасия Сергеевна¹,

asm2@tpu.ru

Бакшт Федор Борисович¹,

baksht@yandex.ru

Судыко Александр Фёдорович¹

sudykoAF@yandex.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

² Алтайский региональный институт экологии,
Россия, 649100, Республика Алтай, п. Майма, ул. Заводская, 54.

Актуальность работы обусловлена необходимостью изучения состояния окружающей среды Алтая, подверженной многолетнему переносу загрязнителей с соседней территории Восточного Казахстана.

Цель работы: провести сравнительный анализ дендрогеохимических особенностей ископаемой, а также современной лиственниц сибирских (*Larix sibirica* Ledeb.) из урочища Пазырык (юго-восток Горного Алтая, VI–V в. до н.э.) и современных лиственниц, произрастающих в области трансграничного переноса химических элементов с территории Республики Казахстан.

Методы исследования: отбор кернов и спилов лиственницы сибирской; естественное высушивание, разделение проб на временные интервалы, измельчение кернов; количественный инструментальный нейтронно-активационный метод анализа (определение содержания 28 химических элементов) для всех проб и количественный метод анализа масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (определение содержания 34 химических элементов) для проб лиственницы из урочища Пазырык; обработка и анализ эмпирических данных статистическими методами.

Результаты. Получены данные о химическом элементном составе годовых колец ископаемой и современной лиственниц из урочища Пазырык. Дендрогеохимический сравнительный анализ показал преобладание в химическом элементном составе современной лиственницы элементов: Li, Al, P, K, Ti, V, Co, Ni, Cu, As, Ba, Se, Nb, Cs, Ba, Eu, Yb, Hg и Th, а ископаемой лиственницы – Be, B, Na, Mg, Ca, Cr, Mn, Fe, Ni, Zn, Br, Sr, Zr, Cd, I, La, Pr, Nd, Sm, Gd и W. В химическом элементном составе годовых колец нашли свое отражение климатические, орографические и геохимические факторы окружающей среды, а также условия сохранения самого ископаемого материала лиственниц.

Ключевые слова:

Горный Алтай, урочище Пазырык, годовые кольца деревьев, лиственница сибирская, геохимия, дендрогеохимия.

Введение

В связи с антропогенным изменением окружающей среды с каждым днем становится всё актуальней вопрос о выборе наиболее информативного индикатора происходящих изменений, который можно было бы использовать при ведении экологического мониторинга.

Изучение особенностей строения и вещественного состава годовых колец древесных видов дает информацию об изменении солнечных циклов (дендрохронология) [1–3], о климатических условиях (дендроклиматология) [1, 4, 5], о загрязнении металлами и другими химическими элементами, а также их соединениями, окружающей среды (дендрогеохимия, дендрозоология) [4, 6–12] в период роста годовых колец дерева.

Исследований в области дендрогеохимии и дендрозоологии на данный момент относительно немного, что предоставляет широкое поле для наблюдений и важных открытий. Изучая определённые периоды роста деревьев, мы можем делать выводы об изменении состава биосферы и тенденциях этих изменений.

Цель работы – провести сравнительный анализ дендрогеохимических особенностей ископаемой (спил бревна из курганного захоронения), а также современной (кern дерева, произрастающего в том же месте в современных условиях) лиственниц сибирских (*Larix sibirica* Ledeb.) из урочища Пазырык (юго-восток Горного Алтая) и современных лиственниц, произрастающих в области трансграничного переноса химических элементов с территории Республики Казахстан.

Материалы и методы

Объектом настоящих исследований являются годовые кольца лиственницы сибирской (*Larix sibirica Ledeb.*). Образцы годичных колец были отобраны с территории Горного Алтая:

- 1) в долине Пазырык (спил бревна лиственницы из погребального сруба одного из Пазырыкских курганных захоронений скифского времени, отобранный и предоставленный для изучения в 1988 г.; и керн современной лиственницы, произрастающей в том же месте в современных условиях, 2013 г. отбора);
- 2) в западной части Республики Алтай, вблизи населенных пунктов: Коргон, Кайсын, Кырлык, Абай, Огневка, Барагаш, Верх-Ябоган, Ело, Иня, Бийка, Обога, и на востоке Алтайского края, вблизи поселка Куяган (спилы лиственниц произведены летом 2009 г.) [13] (рис. 1).

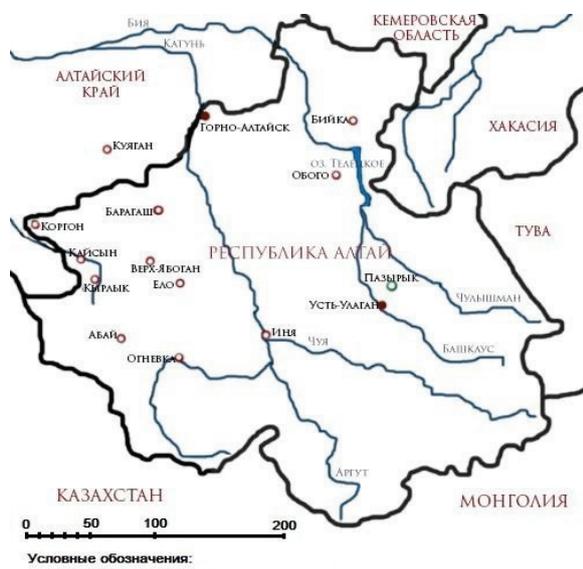


Рис. 1. Схема размещения отобранных для исследования проб лиственницы: а) места отбора современной лиственницы для изучения трансграничных переносов химических элементов [13]; б) место отбора спила древней лиственницы и керна современной лиственницы

Fig. 1. Scheme of location of larch samples selected for study: а) places of modern larch selection to study cross-border transfers of chemical elements [13]; б) place of selection of ancient larch saw cut and modern larch core sample

Первая точка отбора проб привязана к исторически интересному объекту – урочищу Пазырык, а именно к Пазырыкским курганам – древним могилам родовых или племенных скифо-сакских вождей VI–V вв. до н. э. Курганы находятся на южном склоне Чулышманского хребта в сухой висячей долине Пазырык в бассейне реки Б. Улаган ($50^{\circ}44'$ с.ш., $88^{\circ}03'$ в.д.) [14] (рис. 2).

Спил лиственницы (рис. 3) являлся частью погребального сруба, хранившегося в условиях островной мерзлоты на протяжении более двух тысяч лет, до его раскопки в 1929 г. экспедицией Эт-

нографического отдела Русского музея и Государственного Эрмитажа [14]. Данный спил был отобран сотрудниками Института истории и археологии СО РАН и передан Ф.Б. Бакшту на исследования в 1988 г. Возраст ископаемого дерева около 140 лет.



Рис. 2. Общий вид Пазырыкских курганов. Раскопки выполнены в 1929 г. экспедицией Этнографического отдела Русского музея и Государственного Эрмитажа. Фотография 2014 г.

Fig. 2. General view of the Pazyryk barrows. Excavations were carried out in 1929 by the expedition of the Ethnographic Department of the Russian Museum and the State Hermitage. Photo, 2014



Рис. 3. Вид спила лиственницы из Пазырыкского кургана Республики Алтай. Отобран сотрудниками Института истории и археологии СО РАН и передан Ф.Б. Бакшту в ТПУ на исследования в 1988 г.

Fig. 3. Saw cut of larch from Pazyryk barrow, Altai Republic, selected by the Institute of History and Archeology of the SB RAS and given for research at TPU in 1988

Отбор годовых колец современной лиственницы (2013 г.) в долине Пазырык проводился при помощи специального бура (возрастного бурава) (рис. 4), позволяющего получить падающим методом керн диаметром 10 мм (рис. 5).

Отобранный материал подготавливали к анализу путем разделения на временные интервалы и дальнейшего измельчения каждой пробы. Из спила древней лиственницы с учётом ритмичности годовых колец для исследования было подготовлено 4 пробы. Из керна современной лиственницы также было получено 4 пробы, охватывающих четыре временных интервала: 1840–1899, 1900–1944, 1945–1965, 1966–2013 гг. Материал не озолася.

Второй участок отбора проб годовых колец лиственницы был выбран с целью изучения трансгра-

ничных переносов химических элементов с территории Республики Казахстан на территорию Алтай. Отбор проб – спилов лиственниц – проводился в 2009 г. Каждый спил был разделен на 8 проб, включающих годовые кольца десятилетних периодов: 1930–1939, 1940–1949, 1950–1959, 1960–1969, 1970–1979, 1980–1989, 1990–1999, 2000–2009 гг. [13]. Пробы озолялись с последующим определением зольности в соответствии с ГОСТ 26929–94 [15].



Рис. 4. Отбор пробы с помощью возрастного бурава (долина Пазырык, 2013 г., отбор ведёт Эркелей Елдоева, студентка ТПУ)

Fig. 4. Sampling using age-borer (Pazyryk Valley, 2013, Eldoeva Erkel, student of TPU)



Рис. 5. Фотография возрастного ядра лиственницы

Fig. 5. Photo of larch age core sample

Определение валового состава макро- и микроэлементов в образцах золы и неозоленного материала годовых колец лиственницы проводилось инструментальным нейтронно-активационным методом анализа (ИНАА) на 28 элементов в аккредитованной (аттестат № РОСС RU.0001.511901) ядерно-геохимической лаборатории на исследовательском ядерном реакторе ИРТ-Т Национального исследовательского Томского политехнического университета по аттестованным методикам (НСАМ ВИМС № 410-ЯФ). Пробы годовых колец лиственницы из долины Пазырык были дополнительно проанализированы на определение содержания 61 химического элемента количественным методом анализа масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) в химико-аналитическом центре «Плазма» (ООО «ХАЦ «ПЛАЗМА») города Томска. Разложение проб проводилось согласно стандартной методике МУК 4.1.1483–03 [16].

Для дальнейшего сопоставления и сравнения полученной по результатам ИНАА информации содержания химических элементов в озоленных пробах годовых колец Республики Алтай были переведены (путем умножения на коэффициент зольности) в содержания химических элементов в сухих (неозоленных) пробах.

Полученные результаты определения концентрации химических элементов были обработаны

статистическими методами с помощью пакета прикладных статистических программ «Excel 10.0».

Результаты и их обсуждение

Морфологическое описание спила ископаемой лиственницы из урочища Пазырык

Годовые кольца ископаемого спила из Пазырыкского кургана имеют ассимметричный овально-концентрический вид, радиус южной стороны дерева более чем в два раза больше северного радиуса (рис. 3). С учетом этого обстоятельства и небольшой толщины ствола (диаметр 23–26 см), можно предполагать достаточно суровые условия его произрастания. Ширина годовых колец закономерно уменьшается от ядра к периферии (заболони), что свидетельствует о выдержанном характере изменения климата в период роста дерева.

Следы окаменения (силификации) на примере изученного спила проявлены незначительно, но имеются следы внешнего воздействия. В частности, ядровая древесина высветлена в сравнении с заболонью, которая приобрела темно-бурый цвет, по-видимому, из-за гидроокислов железа.

На спиле (южный радиус) отчетливо проявлен ритмический убывающий характер прироста древесины, предположительно отвечающий выделяемым А.Л. Чижевским циклам солнечной активности [17]. Так, границы 11-летних циклов выделяются двумя–тремя более широкими годичными кольцами, особенно образовавшимися в осеннее время, и, вероятно, эти периоды повышенного прироста отвечают минимумам активности Солнца (рис. 6).

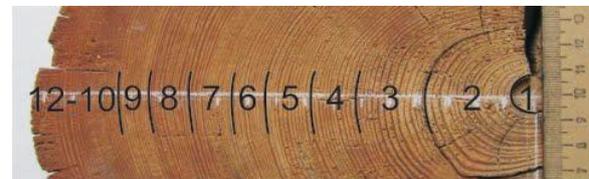


Рис. 6. Регрессивно-циклический характер прироста лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.) из Пазырыкского кургана (цифрами показаны фазы прироста, соответствующие циклам солнечной активности)

Fig. 6. Regressive-cyclical growth nature of the Siberian larch (*Larix sibirica* Ledeb.) from Pazyryk barrow (figures indicate the growth phases, corresponding to the cycles of solar activity)

Известно [18, 19], что в периоды минимальной солнечной активности значительно возрастает активность процессов энерго- и массообмена в оболочках Земли, в том числе в ее атмосфере. В это время на выпадение атмосферных аэрозолей оказывают дополнительное влияние космические лучи, под влиянием которых усиливается ионизация тропосферы, а электромагнитные процессы в ней достигают максимума, что и приводит к усилению аэрозолеобразования и, как следствие, к увеличению содержания микроэлементов в атмосферных выпадениях, а также к усилению прироста древесины.

Ранее авторами установлены значимые прямые связи между содержанием химических элементов (Na, Mg, Al, Ca, Ti, Fe, Cr, Sr, W и др.) в талой воде ледника Большого Актру в Горном Алтае и минимумами солнечной активности в период 1939–2005 гг. [20], а на примере Телецкого озера была выявлена зависимость ряда гидрохимических показателей озерной воды (рН, NH_4^+ , NO_3^- , SiO_2 , SO_4^{2-} , Mo, V и пр.) от циклов солнечной активности, а также показана связь отдельных гидрологических характеристик и температурного режима озера с гелиофизическими параметрами [21].

Сравнительный анализ дендрогеохимических особенностей лиственниц Горного Алтая

Средние содержания оцененных 62 химических элементов в лиственницах Горного Алтая приведены в табл. 1.

В результате математической обработки данных с использованием критерия Стьюдента была установлена статистическая значимость полученных различий между содержаниями химических элементов в годовых кольцах лиственниц Горного Алтая.

Различия между современной лиственницей из Урочища Пазырык и современной лиственницей из западной части Горного Алтая статистически значимы на уровне $p < 0,05$ для химических элементов: Na, Ca, Co, Zn, Ag, Sb, Ba, Nd, Tb, Yb, Ta; и статистически незначимы ($p > 0,05$) для химических элементов: Sc, Cr, Fe, As, Br, Rb, Sr, Cs, La, Ce, Sm, Eu, Lu, Hf, Au, Th, U.

Различия между современной и ископаемой лиственницами из Урочища Пазырык статистически значимы ($p < 0,05$) для химических элементов: Mg, K, Ca, Ti, Fe, Mn, Cd, I, Rb, Sr, Eu, Au, Th; и статистически незначимы ($p > 0,05$) для: Li, Al, B, Be, P, Na, Sc, V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Se, Nb, Mo, Ge, As, Sn, Zr, Pr, Br, Y, Ag, Gd, Py, Ho, Sb, Cs, Ba, La, Ce, Nd, Sm, Er, Tm, W, Pt, Hg, Tl, Pb, Bi, Tb, Yb, Lu, Hf, Ta, U.

Анализ представленных материалов показывает, что содержание Li, Al, P, K, Ti, V, Co, Ti, Cu, As, Ba, Se, Nb, Cs, Ba, Eu, Yb, Hg и Th в современной лиственнице из долины Пазырык выше, чем в ископаемой. И, напротив, в древесине ископаемой лиственницы отмечаются более высокие содержания Be, B, Na, Mg, Ca, Cr, Mn, Fe, Ni, Zn, Br, Sr, Zr, Cd, I, La, Pr, Nd, Sm, Gd и W.

Для ископаемой лиственницы дополнительно были посчитаны средние содержания химических элементов в минерализованной (подверженной внешним процессам окружающей среды) и слабоминерализованной зонах. В минерализованной зоне по сравнению со слабоминерализованной преобладают содержания: Be, Mg, Al, Ti, Fe, Ni.

Обращает на себя внимание, что в современной лиственнице, произрастающей на территории западного Алтая, по сравнению с таковой, но произрастающей в настоящее время в долине реки Пазырык, отмечаются более высокие содержания Ba, La, Sr, Rb, Zn, Sc, а также Na, Ca, Fe.

Для выявления особенностей трансформации вещества ископаемой *Larix sibirica* из захоронения Пазырык был проведен сравнительный анализ ее химического состава с составом современной лиственницы из того же урочища.

Мы получили следующий ряд накопления химических элементов в ископаемой лиственнице, мг/кг сухой массы: Ca (1386) – Mg (531) – Fe (261) – K (215) – Mn (93) – Al (38) – Na (30) – Zn (15) – Sr (9) – P (4) – B (1,6) – Ba (1,5) – Ti (1,1). Ряд накопления химических элементов в современной лиственнице из урочища Пазырык (мг/кг сухой массы) имеет несколько иной вид: K (415) – Mg (300) – Ca (132) – Al (43) – P (8) – Mn (7) – Na (6) – Ti (5) – Fe (4) – Sr (3) – Ba (2) – B (1,4) – Br (1,1).

Следует отметить, что эти ряды по содержанию и отношению химических элементов отличаются от их накопления в древесине голосеменных, мг/кг сухой массы [22]: Ca (6500) – K (6300) – P (2900) – Mg (1300) – Na (340) – Mn (330) –

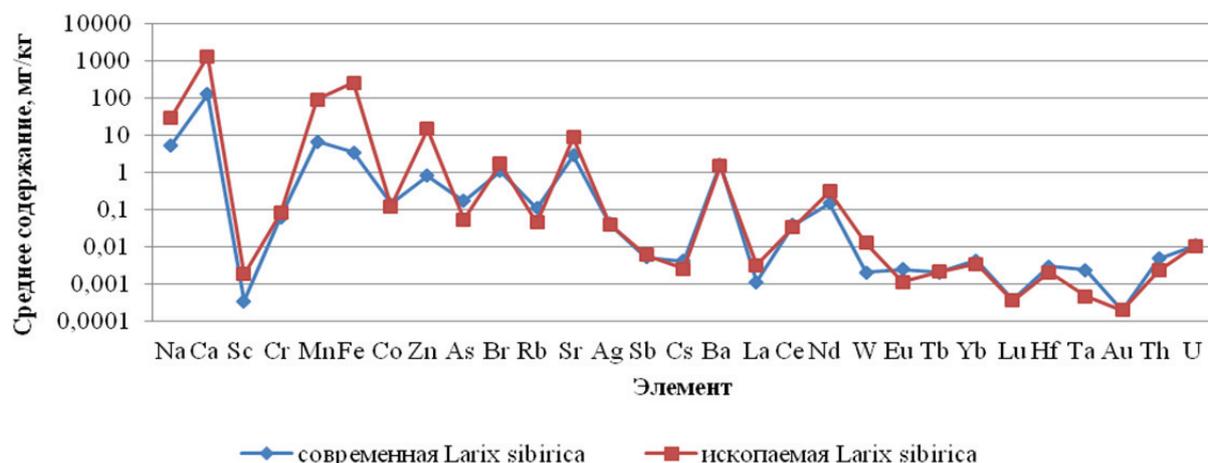


Рис. 7. Элементный состав ископаемой и современной *Larix sibirica* из урочища Пазырык

Fig. 7. Elemental composition of ancient and modern *Larix sibirica* from Pazyryk

Таблица 1. Среднее содержание химических элементов в годовых кольцах лиственниц (*Larix sibirica* Ledeb.) Горного Алтая (мг/кг в сухой массе)

Table 1. Average content of chemical elements in larch (*Larix sibirica* Ledeb.) tree rings, Gorny Altai (mg/kg dry weight)

№ п/п Item №	Урочище Пазырык Pazyryk Valley				Западная часть Горного Алтая, на границе с Республикой Казахстан The western part of the Altai Mountains on the border with the Republic of Kazakhstan
	ископаемая лиственница/fossil larch				современная лиственница/modern larch
	среднее/average value				
	для минерализованной части (зоны 10–12 (рис.6)) the average for the mineralized parts (Zones 10–12 (Fig.6)) $x_{cp} \pm S$ $x_{min} - x_{max}$	для слабоминерализованной части (зоны 1–9 (рис.6)) the average for brackish parts (Zones 1–9 (Fig.6)) $x_{cp} \pm S$ $x_{min} - x_{max}$	по всему спилу average around cut larch $x_{cp} \pm S$ $x_{min} - x_{max}$	по керну average around larch core samples $x_{cp} \pm S$ $x_{min} - x_{max}$	по всем спилам average over all cut larch $x_{cp} \pm S$ $x_{min} - x_{max}$
Li*	0,1±0,03 0,03–0,1	0,02±0,01 0,01–0,03	0,04±0,02 0,02–0,1	0,1±0,01 0,04–0,1	н.о.
Be*	0,01±0,01 0,001–0,02	0,001±0,001 0,0002–0,003	0,003±0,004 0,0005–0,01	0,001±0,001 0,001–0,004	н.о.
B*	2±0,3 1,2–2	2±0,3 1,3–2	2±0,3 1,3–2	1,4±0,3 1,2–2	н.о.
Na	16±21 5–33	45±34 13–94	30,3±23 9–63	6±2 3–7	26±13 9–79
Mg*	595±123 478–770	467±97 376–604	531±110 427–687	300,2±145 142–481	н.о.
Al*	51±27 29–92	26±14 15–47	39±21 22–70	43±21 16–69	н.о.
P*	4±2 3–6	4±2 3–6	4±2 3–6	8±4 2–13	н.о.
K*	204±62 120–266	226±69 133–295	216±66 127–282	415±89 328–497	н.о.
Ca	1069±356 706–1552	1703±568 1126–2472	1386±462 916–2012	132±37 105–188	245±71 115–389
Sc	0,003±0,003 0,0005–0,02	0,001±0,001 0,0002–0,005	0,002±0,002 0,0003–0,01	0,0004±0,0001 0,0002–0,001	0,01±0,01 0,0002–0,03
Ti*	2±4 0,002–10	0,001±0,002 0,000001–0,005	1±2 0,001–5	5±2 3–8	н.о.
V*	0,05±0,05 0,01–0,2	0,01±0,01 0,001–0,03	0,03±0,03 0,004–0,1	0,05±0,02 0,04–0,1	н.о.
Cr	0,1±0,1 0,1–0,1	0,1±0,1 0,1–0,1	0,1±0,1 0,1–0,1	0,1±0,04 0,03–0,1	0,1±0,1 0,02–0,5
Mn*	81±17 57–98	104±22 73–125	93±20 65–112	7±4 3–12	н.о.
Fe	320±112 48–551	201±70 30–346	260±91 39–448	4±2 3–6	22±30 2–107
Co	0,1±0,01 0,1–0,1	0,1±0,01 0,1–0,1	0,1±0,01 0,1–0,1	0,1±0,2 0,04–0,4	0,02±0,03 0,006–0,2
Ni*	0,2±0,04 0,1–0,3	0,2±0,04 0,1–0,3	0,2±0,04 0,1–0,3	0,1±0,1 0,0001–0,3	н.о.
Cu*	0,5±0,1 0,4–1	0,6±0,1 0,5–1	0,5±0,1 0,4–1	1±0,1 0,4–1	н.о.
Zn	1±1 0,1–4	29±27 2–110	15±14 1–57	1±0,2 0,4–1	4±2 1,1–8
Ga*	0,05±0,02 0,03–0,2	0,02±0,01 0,01–0,1	0,03±0,01 0,02–0,1	0,03±0,01 0,02–0,1	н.о.
Ge*	0,01±0,004 0,0001–0,02	0,01±0,004 0,0001–0,02	0,01±0,004 0,0001–0,02	0,01±0,001 0,0001–0,02	н.о.
As	0,1±0,01 0,04–0,1	0,1±0,01 0,04–0,1	0,1±0,01 0,04–0,1	0,2±0,2 0,04–0,3	0,005±0,005 0,001–0,2
Se*	0,09±0,09 0,0004–0,3	0,04±0,04 0,0002–0,1	0,07±0,07 0,0003–0,2	0,1±0,1 0,0003–0,2	н.о.
Br	2±1 1–2	2±1 1–2	2±1 1–2	1,1±0,3 1–2	0,03±0,03 0,001–0,1
Rb	0,1±0,03 0,01–0,1	0,03±0,01 0,003–0,03	0,1±0,03 0,01–0,1	0,1±0,03 0,1–0,2	1±0,4 0,1–2,1
Sr	6±3 3–11	12±7 5–21	9±5 4–16	3±1 3–4	5±4 0,1–14
Y*	0,01±0,004 0,004–0,01	0,004±0,002 0,002–0,004	0,01±0,004 0,004–0,01	0,01±0,003 0,003–0,01	н.о.
Zr*	2±1 0,4–3	0,3±0,15 0,06–0,4	1±0,5 0,2–1,3	1±0,4 0,2–1	н.о.

Окончание табл. 1

Table 1

Nb*	$\frac{0,01 \pm 0,01}{0,001-0,02}$	$\frac{0,004 \pm 0,004}{0,0004-0,008}$	$\frac{0,01 \pm 0,01}{0,001-0,02}$	$\frac{0,02 \pm 0,01}{0,01-0,04}$	н.о.
Mo*	$\frac{0,02 \pm 0,02}{0,0002-0,04}$	$\frac{0,01 \pm 0,01}{0,0001-0,02}$	$\frac{0,01 \pm 0,01}{0,0001-0,02}$	$\frac{0,01 \pm 0,004}{0,002-0,02}$	н.о.
Ag	$\frac{0,05 \pm 0,01}{0,03-0,1}$	$\frac{0,04 \pm 0,01}{0,02-0,1}$	$\frac{0,04 \pm 0,01}{0,02-0,1}$	$\frac{0,04 \pm 0,02}{0,02-0,2}$	$\frac{0,01 \pm 0,01}{0,001-0,1}$
Cd*	$\frac{0,03 \pm 0,01}{0,02-0,03}$	$\frac{0,03 \pm 0,01}{0,02-0,03}$	$\frac{0,03 \pm 0,01}{0,02-0,03}$	$\frac{0,01 \pm 0,003}{0,002-0,01}$	н.о.
Sn*	$\frac{0,02 \pm 0,02}{0,002-0,06}$	$\frac{0,002 \pm 0,002}{0,0002-0,006}$	$\frac{0,01 \pm 0,01}{0,001-0,03}$	$\frac{0,01 \pm 0,004}{0,01-0,01}$	н.о.
Sb	$\frac{0,004 \pm 0,004}{0,0008-0,008}$	$\frac{0,01 \pm 0,01}{0,002-0,02}$	$\frac{0,01 \pm 0,01}{0,002-0,02}$	$\frac{0,01 \pm 0,01}{0,001-0,01}$	$\frac{0,003 \pm 0,002}{0,0004-0,1}$
I*	$\frac{0,1 \pm 0,2}{0,4-0,4}$	$\frac{0,1 \pm 0,2}{0,4-0,4}$	$\frac{0,02 \pm 0,04}{0,1-0,1}$	$\frac{0,01 \pm 0,01}{0,001-0,02}$	н.о.
Cs	$\frac{0,003 \pm 0,001}{0,002-0,004}$	$\frac{0,002 \pm 0,001}{0,001-0,003}$	$\frac{0,003 \pm 0,001}{0,002-0,004}$	$\frac{0,004 \pm 0,004}{0,002-0,02}$	$\frac{0,004 \pm 0,003}{0,0002-0,1}$
Ba	$\frac{2 \pm 0,1}{1,4-2}$	$\frac{2 \pm 0,1}{1,4-2}$	$\frac{2 \pm 0,1}{1,4-2}$	$\frac{2 \pm 0,4}{1,4-2}$	$\frac{8 \pm 6}{1-28}$
La	$\frac{0,002 \pm 0,001}{0,001-0,01}$	$\frac{0,004 \pm 0,003}{0,003-0,01}$	$\frac{0,003 \pm 0,002}{0,002-0,01}$	$\frac{0,001 \pm 0,001}{0,0002-0,002}$	$\frac{0,01 \pm 0,02}{0,001-0,1}$
Ce	$\frac{0,04 \pm 0,01}{0,02-0,04}$	$\frac{0,03 \pm 0,01}{0,02-0,04}$	$\frac{0,03 \pm 0,01}{0,02-0,04}$	$\frac{0,04 \pm 0,001}{0,04-0,04}$	$\frac{0,02 \pm 0,03}{0,0001-0,1}$
Pr*	$\frac{0,01 \pm 0,01}{0,003-0,03}$	$\frac{0,002 \pm 0,002}{0,001-0,01}$	$\frac{0,003 \pm 0,004}{0,001-0,01}$	$\frac{0,001 \pm 0,001}{0,001-0,002}$	н.о.
Nd	$\frac{0,2 \pm 0,1}{0,1-1}$	$\frac{0,4 \pm 0,3}{0,1-1}$	$\frac{0,3 \pm 0,2}{0,1-1}$	$\frac{0,2 \pm 0,2}{0,1-1}$	$\frac{0,04 \pm 0,03}{0,003-0,1}$
Sm	$\frac{0,001 \pm 0,001}{0,0003-0,002}$	$\frac{0,001 \pm 0,001}{0,0003-0,002}$	$\frac{0,001 \pm 0,001}{0,0003-0,002}$	$\frac{0,001 \pm 0,0004}{0,0002-0,001}$	$\frac{0,002 \pm 0,003}{0,0001-0,01}$
Eu	$\frac{0,001 \pm 0,001}{0,0004-0,003}$	$\frac{0,002 \pm 0,002}{0,001-0,01}$	$\frac{0,001 \pm 0,001}{0,0004-0,003}$	$\frac{0,003 \pm 0,001}{0,003-0,003}$	$\frac{0,0004 \pm 0,001}{0,00001-0,003}$
Gd*	$\frac{0,003 \pm 0,003}{0,002-0,02}$	$\frac{0,001 \pm 0,001}{0,001-0,01}$	$\frac{0,002 \pm 0,002}{0,001-0,01}$	$\frac{0,001 \pm 0,001}{0,0001-0,003}$	н.о.
Tb	$\frac{0,0003 \pm 0,0003}{0,00001-0,001}$	$\frac{0,004 \pm 0,004}{0,0004-0,01}$	$\frac{0,002 \pm 0,002}{0,0002-0,004}$	$\frac{0,002 \pm 0,002}{0,0002-0,004}$	$\frac{0,0003 \pm 0,001}{0,00002-0,002}$
Dy*	$\frac{0,002 \pm 0,002}{0,001-0,003}$	$\frac{0,001 \pm 0,001}{0,0004-0,003}$	$\frac{0,001 \pm 0,001}{0,0004-0,003}$	$\frac{0,001 \pm 0,001}{0,001-0,002}$	н.о.
Ho*	$\frac{0,001 \pm 0,0002}{0,0002-0,001}$	$\frac{0,0003 \pm 0,0001}{0,0002-0,001}$	$\frac{0,001 \pm 0,0002}{0,0002-0,001}$	$\frac{0,0004 \pm 0,0002}{0,0002-0,001}$	н.о.
Er*	$\frac{0,002 \pm 0,002}{0,001-0,004}$	$\frac{0,001 \pm 0,001}{0,0003-0,002}$	$\frac{0,001 \pm 0,001}{0,0003-0,002}$	$\frac{0,002 \pm 0,001}{0,0004-0,003}$	н.о.
Tm*	$\frac{0,001 \pm 0,001}{0,001-0,004}$	$\frac{0,0001 \pm 0,0001}{0,0001-0,0004}$	$\frac{0,0002 \pm 0,0001}{0,0001-0,0004}$	$\frac{0,0002 \pm 0,0001}{0,0002-0,0004}$	н.о.
Yb	$\frac{0,003 \pm 0,001}{0,001-0,01}$	$\frac{0,004 \pm 0,001}{0,003-0,03}$	$\frac{0,004 \pm 0,001}{0,001-0,01}$	$\frac{0,01 \pm 0,0001}{0,01-0,01}$	$\frac{0,001 \pm 0,001}{0,00001-0,01}$
Lu	$\frac{0,0003 \pm 0,0001}{0,0002-0,001}$	$\frac{0,0004 \pm 0,0001}{0,0002-0,001}$	$\frac{0,0004 \pm 0,0001}{0,0002-0,001}$	$\frac{0,0004 \pm 0,0001}{0,0002-0,001}$	$\frac{0,001 \pm 0,004}{0,00001-0,02}$
Hf	$\frac{0,003 \pm 0,003}{0,002-0,02}$	$\frac{0,002 \pm 0,002}{0,001-0,01}$	$\frac{0,002 \pm 0,002}{0,001-0,01}$	$\frac{0,003 \pm 0,002}{0,001-0,01}$	$\frac{0,002 \pm 0,003}{0,00002-0,01}$
Ta	$\frac{0,001 \pm 0,0003}{0,0001-0,001}$	$\frac{0,0004 \pm 0,0001}{0,0001-0,001}$	$\frac{0,001 \pm 0,0003}{0,0001-0,001}$	$\frac{0,002 \pm 0,002}{0,001-0,004}$	$\frac{0,001 \pm 0,001}{0,00002-0,01}$
W*	$\frac{0,01 \pm 0,002}{0,002-0,04}$	$\frac{0,02 \pm 0,004}{0,004-0,01}$	$\frac{0,01 \pm 0,002}{0,002-0,04}$	$\frac{0,002 \pm 0,002}{0,0001-0,004}$	н.о.
Pt*	$\frac{0,002 \pm 0,001}{0,001-0,003}$	$\frac{0,001 \pm 0,001}{0,001-0,003}$	$\frac{0,002 \pm 0,001}{0,001-0,003}$	$\frac{0,001 \pm 0,001}{0,0001-0,002}$	н.о.
Au	$\frac{0,0002 \pm 0,0001}{0,0002-0,0002}$	$\frac{0,0002 \pm 0,0001}{0,0002-0,0002}$	$\frac{0,0002 \pm 0,0001}{0,0002-0,0002}$	$\frac{0,0002 \pm 0,0001}{0,0002-0,0002}$	$\frac{0,0004 \pm 0,0003}{0,00001-0,001}$
Hg*	$\frac{0,004 \pm 0,001}{0,002-0,01}$	$\frac{0,003 \pm 0,001}{0,002-0,01}$	$\frac{0,004 \pm 0,001}{0,002-0,01}$	$\frac{0,01 \pm 0,01}{0,0001-0,02}$	н.о.
Tl*	$\frac{0,0002 \pm 0,0001}{0,0001-0,0004}$	$\frac{0,0002 \pm 0,0001}{0,0001-0,0004}$	$\frac{0,0002 \pm 0,0001}{0,0001-0,0004}$	$\frac{0,0003 \pm 0,0001}{0,0002-0,0004}$	н.о.
Pb*	$\frac{0,1 \pm 0,02}{0,04-0,1}$	$\frac{0,04 \pm 0,008}{0,02-0,04}$	$\frac{0,1 \pm 0,02}{0,04-0,1}$	$\frac{0,1 \pm 0,02}{0,02-0,1}$	н.о.
Bi*	$\frac{0,01 \pm 0,004}{0,002-0,01}$	$\frac{0,01 \pm 0,004}{0,002-0,01}$	$\frac{0,01 \pm 0,004}{0,002-0,01}$	$\frac{0,003 \pm 0,001}{0,001-0,004}$	н.о.
Th	$\frac{0,002 \pm 0,002}{0,001-0,01}$	$\frac{0,003 \pm 0,003}{0,002-0,02}$	$\frac{0,002 \pm 0,002}{0,001-0,01}$	$\frac{0,01 \pm 0,001}{0,01-0,01}$	$\frac{0,002 \pm 0,004}{0,00002-0,01}$
U	$\frac{0,002 \pm 0,002}{0,004-0,004}$	$\frac{0,02 \pm 0,02}{0,004-0,04}$	$\frac{0,01 \pm 0,01}{0,002-0,02}$	$\frac{0,01 \pm 0,01}{0,001-0,02}$	$\frac{0,001 \pm 0,001}{0,00002-0,01}$

Примечание: * – элемент определен методом ICP-MS; н.о. – не определялся; хср – среднее значение; S – стандартное отклонение; xmin – минимальное значение; xmax – максимальное значение.

Note: * – element was determined by ICP-MS; н.о. – was not determined; xcp – average value; S – standard deviation; xmin – minimum value; xmax – maximum value.

Fe (130) – Al (65) – В (63) – Ва (63) – Zn (26). Это, предположительно, может указывать на низкую активность биогеохимических процессов в среднегорных условиях урочища Пазырык. Однако высокое содержание таких элементов, как кальций, являющийся основой оболочки клеток, магний и калий, участвующих в процессе метаболизма, естественно и объяснимо [23].

Коэффициенты максимальной концентрации элементов в ископаемой лиственнице (относительно современного фона) образуют убывающий ряд (рис. 7): Fe (72) – Zn (18) – Mn (13) – Ca (10,5) – I (10,5) – W (6,2) – Na (5,5) – Sc (5,4) – Cd (4,6) – Sr (3) – Br (1,5), который в целом близок к ряду электрохимической активности металлов. В приведенном ряду происходит ослабление окислительной способности катионов металлов в водных растворах. Исходя из установленных особенностей накопления металлов, можно предполагать внешнее воздействие содержащих их природных вод на ископаемую лиственницу.

В условиях многовекового нахождения ископаемой лиственницы на глубине 3–4 м определяющим фактором воздействия на средний элементный состав ее древесины могли быть грунтовые воды урочища Пазырык, состав которых отражал вышеотмеченные геохимические особенности присутствующих здесь горных пород в зоне гипергенеза. Их инфильтрация способствовала заметной трансформации исходного состава древесины, особенно ее наружной части (заболони), в которой проявлены максимальные концентрации ряда элементов, в первую очередь, железа, марганца и других элементов, подвижных в зоне гипергенеза.

Небезынтересно отметить, что распределение концентраций железа и марганца в современной и в древней лиственнице изменяется в противофазе, что, предположительно, обусловлено количеством выпадающих осадков. По данным [24], железо в наибольшем количестве отмечается в растениях в засушливые годы, марганец – во влажные периоды.

Установлено, что наибольшие различия в элементном составе ископаемой и современной лиственниц Пазырыка характерны для двух типовых геохимических ассоциаций элементов – Fe-Mn-Zn-W и Ca-Na-Sr-I-Br. Основой первой из них являются гидроокислы железа и марганца, которые сорбируют соединения геохимически близких им вольфрама, цинка (с изоморфным кадмием), скандия [25, 26] в условиях зоны химического выветривания (окисления) карбонатно-терригенных

пород серо- и красноцветной континентальной формации девона, развитой в районе урочища Пазырык.

Вторая ассоциация щелочных металлов и галогенов отражает геохимическую специализацию этой толщи, в которой проявлены признаки зачаточного солеобразования, условно относимого к эвапоритовой формации.

Анализ корреляционных связей химических элементов в современной и ископаемой лиственнице из урочища Пазырык показал значительные различия числа значимых отрицательных связей между ними (положительные связи равны). Так, в ископаемой лиственнице отрицательных связей в полтора раза больше (табл. 2), что, вероятно, объясняется наложением на исходный состав ассоциации привнесенных химических элементов.

Таблица 2. Число корреляционных связей химических элементов *Larix sibirica* из урочища Пазырык

Table 2. Number of correlations of chemical elements in *Larix sibirica* from Pazyryk

Всего Total	Связи/Relations						Знак связи Relations
	более 5 more than 5		4–5		1–3		
древ./совр. fossil/modern	современная modern	древняя fossil	современная modern	древняя fossil	современная modern	древняя fossil	
58/57	40	29	5	13	12	16	Положительная Positive
54/35	7	9	1	7	27	38	Отрицательная Negative

В пользу значительного привноса ряда элементов в древесину ископаемой лиственницы говорит не только превышение их содержания над современным фоном и отличный от него характер корреляционных связей, но и совершенно иные закономерности распределения во времени. Так, спектр четырех основных трендов поведения изученных элементов от ядра к периферии стволов современной и ископаемой лиственницы различается кардинальным образом (табл. 3), который нельзя объяснить с позиций изменения только климата и других природных условий произрастания деревьев. Отметим, что многие тренды распределения элементов в годовых кольцах лиственницы соответствуют подобным трендам и для другой растительности (например, кустарничковой), что описано в работе [27].

Таблица 3. Тренды распределения элементов в лиственнице урочища Пазырык (от ядра к заболони)

Table 3. Trends in distribution of elements in larch from Pazyryk (from core to sapwood)

Уменьшение–увеличение Decrease–increase	Увеличение Increase	Увеличение–уменьшение Increase–decrease	Уменьшение Decrease	Лиственница Larch
Na, Rb, As, Sb, Nd	Mg, P, B, Cr, Mo, Sc, La, Tb, Er, Hf, Ta, Tm	Ca, Br, Cd, Sn, Sm	Mg, K, Pb, W, Se, Ge, Nb	Современная Modern
Fe, P, B, Cr, Sc, Sb, W, Bi	Mn, Li, Br, J, Ag, Ge, Ce, Nb, Hf	Al, Li, As, Pb, Se, Y, Sc, Zr, Sm, Dy, Ho	Ca, Na, Co, Sr, Cu, Zn, Cd, Tb, Yb, U	Ископаемая Fossil

С высокой долей вероятности можно предполагать влияние техногенеза на накопление ряда химических элементов растений. И об этом могут свидетельствовать данные по изучению динамики изменения уровня накопления элементов по временным интервалам.

Анализ временных рядов показывает, что в современной лиственнице отмечено максимальное содержание стронция, кобальта, урана и тория в годичных кольцах на временном интервале первой половины XX в., и это явление можно связать с трансграничным переносом радионуклидов на территорию Алтая [13].

В современной лиственнице максимальная концентрация цезия (0,01 мг/кг) на интервале 1945–1965 гг. совпадает с минимальной концентрацией калия (328 мг/кг). И, наоборот, максимальное содержание калия (497 мг/кг) на интервале 1840–1944 гг. совпадает с минимальным содержанием цезия (0,002 мг/кг). Для радиоизотопа цезия и калия существует следующая взаимосвязь [28]. Калий является неизотопным аналогом цезия и находится в почве в макроколичествах, в то время как цезий – в ультромикроконцентрациях. Вследствие этого в почвенном растворе происходит сильное разбавление микроколичеств цезия-137 ионами калия, и при поглощении их корневыми системами растений отмечается конкуренция за место сорбции на поверхности корней. Поэтому при поступлении этих элементов из почвы в растениях наблюдается антагонизм ионов цезия и калия [28].

Для современной и ископаемой лиственниц были отмечены противоположные тенденции накопления таких элементов, как железо и марганец. Такое поведение микроэлементов в растениях может быть связано с количеством выпадающих осадков [29]. Железо в наибольшем количестве отмечается в растениях в засушливые годы, марганец – во влажные. Также, нами была отмечена взаимосвязь элементов Ca-Sr и K-Rb, являющихся хими-

ческими аналогами. Данные элементы имеют одинаковые тенденции накопления на изучаемых временных промежутках.

Для оценки влияния природно-климатических и техногенных факторов на биохимические особенности современной *Larix sibirica* из урочища Пазырык проведено сопоставление ее химического состава с составом лиственницы с полуострова Таймыр и с территории Западного Алтая (Усть-Канский, Усть-Коксинский и Шебалинский районы Республики Алтай) [13].

Результаты проведенного сравнения показывают, что в лиственнице с Таймыра [29] содержание большинства химических элементов, кроме породообразующих (Al, Mg, K), значительно выше, чем в лиственнице урочища Пазырык (рис. 8). Причиной, предположительно, является влияние природно-климатических факторов, в том числе и вечной мерзлоты на Таймыре, способствующих заторможности биологического круговорота (процессов) и накоплению химических элементов в древесине.

Аналогичное сравнение элементного состава современной лиственницы сибирской из урочища Пазырык и с территории Западного Алтая показало, что в последней содержание большинства элементов выше, кроме отдельных лантаноидов, U, Th, Co, As, Sb, Br, Ag, предположительно, отражающих геохимическую специализацию геологических образований, развитых в районе урочища Пазырык (рис. 9).

В то же время есть основания полагать, что основной вышеотмеченных различий является зональное уменьшение содержания в современной лиственнице химических элементов с запада на восток, то есть в направлении прохождения бывших радиоактивных следов Семипалатинского испытательного полигона и современных выбросов предприятий цветной металлургии Восточного Казахстана, особенно г. Усть-Каменогорска, которые обусловили трансграничный перенос большого

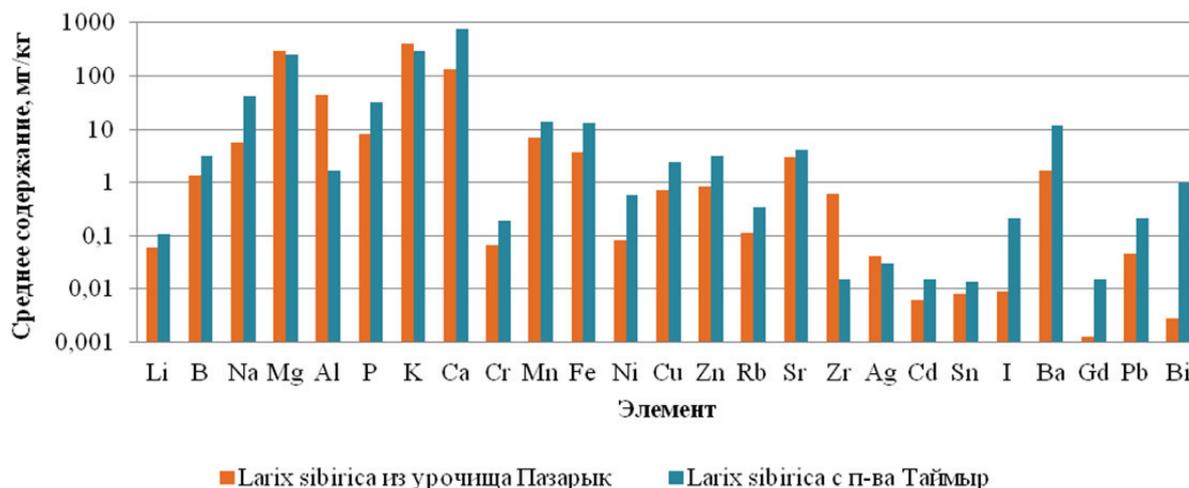


Рис. 8. Элементный состав (мг/кг) лиственницы сибирской с п-ва Таймыр и урочища Пазырык

Fig. 8. Elemental composition (mg/kg) of Siberian larch from the Taimyr Peninsula and Pazyryk

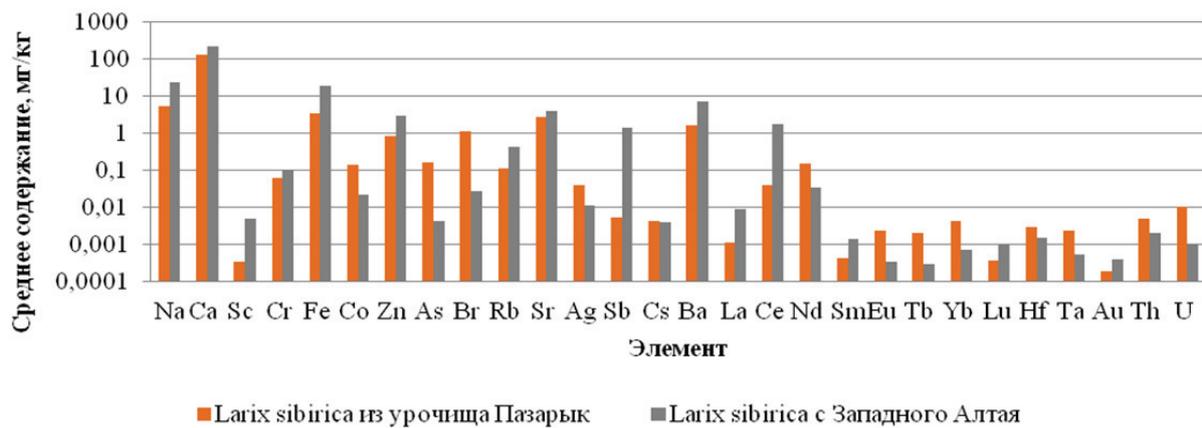


Рис. 9. Элементный состав (мг/кг) лиственницы из урочища Пазырык и Западного Алтая

Fig. 9. Elemental composition (mg/kg) of larch from Pazyryk and Western Altai

комплекса элементов на территорию Западного Алтая (редкоземельные элементы, уран, торий, элементы полиметаллических руд). Установлено [13], что основные периоды этого переноса приходились на шестидесятые и восьмидесятые годы двадцатого века.

В современной лиственнице из урочища Пазырык основной период ядерных испытаний 1945–1965 гг. проявился повышением содержания цезия, висмута, таллия, ртути, европия, то есть спектр и уровень специфических элементов радиоактивного и тяжелометалльного загрязнения из-за удаленности территории выражен относительно слабо.

Заключение

На основании вышеизложенного материала можно сделать следующие выводы:

1. Проведенный анализ ископаемого спила лиственницы из урочища Пазырык помог обосновать, что период произрастания древней лиственницы характеризовался более аридным, чем в настоящее время, резко континентальным климатом.
2. Дополнительный привнос грунтовыми водами химических элементов в ископаемую лиственницу носил ассоциативный характер и зависел от геохимических особенностей зоны химического выветривания геологических образова-

ний урочища Пазырык. Ассоциации привнесенных в ископаемую лиственницу элементов Ca-Na-Sr-I-Br и Fe-Mn-Zn-W отражают геохимические особенности горных пород района урочища Пазырык и зон их химического выветривания.

3. На вариативность химического элементного состава годовых колец лиственницы влияют многочисленные факторы внешней и внутренней среды: географическое расположение объекта исследования; место отбора проб; природные и техногенные геохимические проявления местности; физиологические процессы, происходящие в растении (это проявляется как в непосредственной количественной характеристике содержания элементов, так и в виде ассоциаций положительного и отрицательного характера); климатические факторы.
4. В элементном составе годовых колец находят отражения временные изменения химизма биосферы в результате техногенеза, что хорошо видно при анализе временных промежутков, характеризующихся определённой природно-техногенной геохимической спецификой.
5. Древесина, долго пролежавшая в грунте, мало пригодна для целей дендрогеохимии, т. к. в результате контакта с поровыми водами она существенно изменяет свой первоначальный элементный состав.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Битвинскас Т.Т. Дендроклиматические исследования. – Л.: Гидрометеиздат, 1974. – 172 с.
2. Tree rings and mastings: considering reproductive phenomena when interpreting tree rings? / A.J. Hackett-Pain, A.D. Friend, J.G.A. Lageard, P.A. Thomas // Trace. Tree Rings in Archaeology, Climatology and Ecology Proceedings of the dendrosymposium. – 2015. – № 14. – P. 78–85.
3. Dendrochronology of Utah Juniper (*Juniperus osteosperma* (Torr.) Little) / R.J. Deroose, M.F. Bekker, R. Kjelgren, B.M. Buckley, J.H. Speer, E.B. Allen // Tree-Ring Research. – 2016. – № 72. – P. 1–14.

4. Hulist A., Janecka K., Kaczka R.J. DendroCorr – a simple and powerful software to calculate the growth, climate response, Trace. Tree Rings in Archaeology, Climatology and Ecology // Proceedings of the dendrosymposium. – 2015. – № 14. – P. 44–49.
5. Climatic Changes in the East-European Forest-Steppe and Effects on Scots Pine Productivity / S.M. Matveev, Y.G. Chendev, J.A. Hubbard, D.A. Timashchuk // Pure and Applied Geophysics. – 2017. – № 174. – P. 427–443.
6. Hagemeyer J. Monitoring trace metal pollution with tree rings: a critical assessment // Plants as Biomonitors. Indicators for Heavy Metals in the Terrestrial Environment. – Weinheim: VCH, 1993. – P. 541–63.

7. Ferretti M., Udisfi R., Barbolani E. Mineral nutrients and trace metals in tree rings of Pinus sp // Fresenius J. Anal. Chem. – 1993. – № 347. – P. 467–470.
8. Tout R.E., Gilboy W.B., Spyrou N.M. Neutron activation studies of trace elements in tree rings // Journal of Radioanalytical Chemistry. – 1977. – № 37. – P. 705–715.
9. Рихванов Л.П., Архангельская Т.А., Замятина Ю.Л. Дендрорадиография как метод ретроспективной оценки радиозкологической ситуации. – Томск: Дельтаплан, 2015. – 148 с.
10. Ring width and vessel lumen area of Fagus sylvatica in years with spring and summer drought Trace. Tree Rings in Archaeology, Climatology and Ecology / C. Meinardus, K. Quack, V. Raffelsbauer, A. Bräuning // Proceedings of the dendrosymposium. – 2015. – № 14. – P. 144–148.
11. Combining tree-ring dating and geomorphological analyses in the reconstruction of spatial patterns of the runoff zone of snow avalanches, rybi potok valley, tatra mountains / M. Lempa, R.J. Kazzka, Z., Raćzkowska K. Janecka // Geographia Polonica. – 2016. – № 89 (1). – P. 31–45.
12. Keller E.D., Turnbull J.C., Norris M.W. Detecting long-term changes in point-source fossil CO₂ emissions with tree ring archives // Atmos. Chem. Phys. – 2016. – № 16. – P. 5481–5495.
13. Робертус Ю.В., Рихванов Л.П., Любимов Р.В. Дендрогеохимическая индикация трансграничных переносов экотоксикантов на территорию Алтая // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 317. – № 1. – С. 173–177.
14. Руденко С.И. Культура населения Горного Алтая в скифское время. – М.: Изд-во АН СССР, 1953. – 402 с.
15. ГОСТ 26929–94. Сырье и продукты пищевые. Подготовка проб. Минерализация для определения содержания токсичных элементов. – М.: ИПК «Издательство стандартов», 2002. – 31 с.
16. МУК 4.1.1483–03 Определение содержания химических элементов в диагностируемых биосубстратах, препаратах и биологически активных добавках методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной аргоновой плазмой (Санитарно-эпидемиологическая служба Российской Федерации). – М.: Минздрав России, 2003. – 55 с.
17. Чижевский. А.Л. Земля в объятиях Солнца. – М.: Изд-во «Эксмо», 2004. – 928 с.
18. Дмитриев А.Н. Природные электромагнитные процессы на Земле. – Горно-Алтайск: Универ-Принт, 1995. – 80 с.
19. Environmental drivers of cambial phenology in Great Basin bristlecone pine / E. Ziaco, F. Biondi, S. Rossi, A. Deslauriers // Tree Physiology Advance Access published. – 2016. – № 2. – P. 1–14.
20. Особенности распределения химических элементов в талой воде ледника Большой Актру (Горный Алтай) / Л.П. Рихванов, Ю.В. Робертус, А.В. Таловская, Р.В. Любимов, А.Ю. Шатилов // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 313. – № 1. – С. 97–103.
21. Робертус Ю.В., Шевченко Г.А. Зависимость гидрохимических показателей Телецкого озера и его притоков от солнечной активности // Вестник ТГПУ. – 2009. – № 11 (89). – С. 194–197.
22. Bowen H.J.M. Trace elements in biochemistry. – New York; London: Academic Press, 1966. – 241 p.
23. Динамика содержания зольных элементов в годичных слоях старовозрастных сосен, произрастающих в пойменных биотопах / Ю.П. Демаков, С.М. Швецов, В.И. Таланцев, К.К. Калинин // Лес. Экология. Природопользование. Вестник МарГТУ. – 2011. – № 3. – С. 25–34.
24. Беус А.А., Грабовская Л.И., Тихонова Н.В. Геохимия окружающей среды. – М.: Недра, 1976. – 248 с.
25. Перельман А.И. Геохимия ландшафта. – М.: Высшая школа, 1975. – 341 с.
26. Иванов В.В. Экологическая геохимия элементов: Справочник: В 6 кн. – М.: Недра, 1994. – 304 с.
27. Черненькая Е.В. Динамика изменения элементного состава природной среды по данным изучения гербарных и современных сборов растений юга Сибири: дис.... д-ра геол.-минерал. наук. – Томск, 2016. – 262 с.
28. Парфенова В.И., Якушева Б.И. Радиоактивное загрязнение растительности Беларуси (в связи с аварией на Чернобыльской АЭС). – Мн.: Навука і тэхніка, 1995. – 582 с.
29. Грачев А.М., Ваганов Е.А., Левитт С.У. Методология получения 600-летней многоэлементной летописи на основе годичных колец лиственницы с полуострова Таймыр, Россия // Журнал СФУ. Серия: Биология. – 2013. – Т. 6. – № 1. – С. 61–72.

Поступила 04.05.2017 г.

Информация об авторах

Рихванов Л.П., доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры геоэкологии и геохимии Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Робертус Ю.В., кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник Горно-Алтайского филиала Института водных и экологических проблем СО РАН.

Миронова А.С., аспирант кафедры геоэкологии и геохимии Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Бахит Ф.Б., кандидат геолого-минералогических наук, инженер-исследователь 1 категории кафедры общей геологии и землеустройства Томского политехнического университета.

Судыко А.Ф., старший научный сотрудник ядерно-геохимической лаборатории кафедры геоэкологии и геохимии Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 550.47

DENDROGEOCHEMICAL FEATURES OF FOSSIL LARCH (PAZYRYK) AND MODERN LARCHES OF MOUNTAIN ALTAI

Leonid P. Rikhvanov¹,

rikhvanov@tpu.ru

Yuriy V. Robertus²,

ariecologia@smt.ru

Anastasiya S. Mironova¹,

asm2@tpu.ru

Fedor B. Baksht¹,

baksht@yandex.ru

Alexander F. Sudyko¹,

sudykoAF@yandex.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

² Altai Regional Institute of Ecology,
54, Zavodskaya Street, Mayma, 649100, Russia.

Relevance of the work is caused by the need to study the environment of the Altai, subject to long-term transfer of pollutants from the neighboring territory of East Kazakhstan.

The main aim of the study is to carry out the comparative analysis of dendrobiogeochemical features of the fossil and modern *Larix Siberika* from Pazyryk in the southeast of the Altai Mountains and the modern larch, growing in the area of cross-border transfer of chemical elements from the territory of the Republic of Kazakhstan.

The methods used in the study: sampling; natural drying, separation of samples into time slots, grinding cores; quantitative instrumental neutron activation analysis method (determination of the content of 28 chemical elements) for all samples, and quantitative method for the analysis of mass spectrometry with inductively coupled plasma (determination of the content of a chemical element 34) for larch samples from Pazyryk; processing and analysis of empirical data by statistical methods.

The results. The authors have obtained the data on chemical elemental composition of the annual rings of fossil and modern larches of Pazyryk. The dendrobiogeochemical comparative analysis shows the predominance of the chemical element composition of a modern larch elements: Li, Al, P, K, Ti, V, Co, Cu, As, Se, etc. And in the fossil larch: Be, B, Na, Mg, Ca, Cr, Mn, Fe, Ni, Zn, Br, Sr, and others. In the chemical elemental composition of annual rings reflected climatic, orographic and geochemical environmental factors, as well as the selection and conditions of storage of annual rings of larches samples themselves.

Key words:

Mountain Altai, Pazyryk, annual rings of trees, Siberian larch, geochemistry, dendrogeochemistry.

REFERENCES

1. Bitvinskas T.T. *Dendroklimaticheskie issledovaniya* [Dendroclimatic research]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1974. 172 p.
2. Hacket-Pain A.J., Friend A.D., Lageard J.G.A., Thomas P.A. Tree rings and masting: considering reproductive phenomena when interpreting tree rings? *Trace. Tree Rings in Archaeology, Climatology and Ecology Proceedings of the dendrosymposium*, 2015, no. 14, pp. 78–85.
3. Deroose R.J., Bekker M.F., Kjelgren R., Buckley B.M., Speer J.H., Allen E.B. Dendrochronology of Utah Juniper (*Juniperus osteosperma* (Torr.) Little). *Tree-Ring Research*, 2016, no. 72, pp. 1–14.
4. Hulist A., Janecka K., Kaczka R.J. DendroCorr – a simple and powerful software to calculate the growth\climate response. *Trace. Tree Rings in Archaeology, Climatology and Ecology. Proceedings of the dendrosymposium*, 2015, no. 14, pp. 44–49.
5. Matveev S.M., Chendev Y.G., Hubbart J.A., Timashchuk D.A. Climatic Changes in the East-European Forest-Steppe and Effects on Scots Pine Productivity. *Pure and Applied Geophysics*, 2017, no. 174, pp. 427–443.
6. Hagemeyer J. Monitoring trace metal pollution with tree rings: a critical assessment. Plants as Biomonitors. *Indicators for Heavy Metals in the Terrestrial Environment*. Weinheim, VCH, 1993. pp. 541–563.
7. Ferretti M., Udisfi R., Barbolani E. Mineral nutrients and trace metals in tree rings of *Pinus* sp. *Fresenius J. Anal. Chem.*, 1993, no. 347, pp. 467–470.
8. Tout R.E., Gilboy W.B., Spyrou N.M. Neutron activation studies of trace elements in tree rings. *Journal of Radioanalytical Chemistry*, 1977, no. 37, pp. 705–715.
9. Rikhvanov L.P., Arkhangelskaya T.A., Zamyatina Y.L. *Dendroradiografiya kak metod perspektivnoy otsenki radioekologicheskoy situatsii* [Dendroradiografiya as a method of retrospective assessment of radioecological situation]. Tomsk, Deltaplan Publ., 2015. 148 p.
10. Meinardus C., Quack K., Raffelsbauer V., Bräuning A. Ring width and vessel lumen area of *Fagus sylvatica* in years with spring and summer drought. *Trace. Tree Rings in Archaeology, Climatology and Ecology. Proceedings of the dendrosymposium*, 2015, no. 14, pp. 144–148.

11. Lempa M., Kaczka R. J., Raćzkowska Z., Janecka K. Combining tree-ring dating and geomorphological analyses in the reconstruction of spatial patterns of the runout zone of snow avalanches, rybi potok valley, tatra mountains. *Geographia Polonica*, 2016, no. 89 (1), pp. 31–45.
12. Keller E.D., Turnbull J.C., Norris M.W. Detecting long-term changes in point-source fossil CO₂ emissions with tree ring archives. *Atmos. Chem. Phys.*, 2016, no. 16, pp. 5481–5495.
13. Robertus Y.V., Rikhvanov L.P., Lyubimov R.V. Dendrogeohimicheskaya indication of cross-border transfers of toxicants into the territory of the Altai. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2010, vol. 317, no. 1, pp. 173–177. In Rus.
14. Rudenko S.I. *Kultura naseleniya Gornogo Altaya v skifskoe vremya* [The culture of the population of the Altai Mountains in the Scythian time]. Moscow, the USSR Academy of Sciences Publ. House, 1953. 402 p.
15. GOST 26929–94. *Syrje i produkty pishchevye Podgotovka prob. Mineralizatsiya dlya opredeleniya sodержaniya toksichnykh elementov* [State Standard 26929–94. Raw materials and food products. Sample preparation. Mineralization for determination of the content of toxic elements. Moscow. Publisher standards, 2002. 31 p.
16. MUK 4.1.1483–03. *Opredelenie sodержaniya khimicheskikh elementov v diagnostiruemyykh biosubstratakh, preparatakh i biologicheskii aktivnykh dobavkakh metodom mass-spektrometrii s induktivno svyazannoy argonovoy plazmoy (Sanitarno-epidemiologicheskaya sluzhba Rossiyskoy federatsii)* [MUK 4.1.1483–03. Determination of Chemical Elements in biosubstrates diagnosed, medications and dietary supplements by mass spectrometry with inductively coupled argon plasma (Sanitary and Epidemiological Service of the Russian Federation)]. Moscow, Ministry of Health of Russia, 2003. 55 p.
17. Chizhevsky A.L. *Zemlya v obyatiyakh Solntsa* [Land in the sun embrace]. Moscow, Eksmo Publ. house, 2004. 928 p.
18. Dmitriev A.N. *Prirodnye elektromagnitnye protsessy na Zemle* [Natural electromagnetic processes in the world]. Gorno-Altai, Univer-Print Publ., 1995. 80 p.
19. Ziaco E., Biondi F., Rossi S., Deslauriers A. Environmental drivers of cambial phenology in Great Basin bristlecone pine. *Tree Physiology Advance Access published*, 2016, no. 2, pp. 1–14.
20. Rikhvanov L.P., Robertus Yu.V., Talovskaya A.V., Lyubimov R.V. Shatila A.Yu. Features of distribution of chemical elements in the melted water ice Large Aktru (Gorny Altai). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2008, vol. 313. no. 1, pp. 97–103. In Rus.
21. Robertus Yu.V., Shevchenko G.A. The dependence of hydro-chemical indicators of the Teletskoye Lake and its tributaries from the solar activity. *Herald TGPU*, 2009. no. 11 (89), pp. 194–197. In Rus.
22. Bowen H.J.M. *Trace elements in biochemistry*. New York; London, Academic Press, 1966. 241 p.
23. Demakov Y.P., Shvetsov S.M., Talantsev V.I., Kalinin K.K. Dynamics of the content of mineral elements in the annual layers of old growth pines growing in floodplain habitats. *Forest. Ecology. Nature. Bulletin MarSTU*, 2011, no. 3, pp. 25–34. In Rus.
24. Beus A.A., Grabowska L.I., Tikhonova N.V. *Geokhimiya okruzhayushchey sredy* [Geochemistry of the environment]. Moscow, Nedra Publ., 1976. 248 p.
25. Perelman A.I. *Geokhimiya landshafta* [Geochemistry of landscape]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1975. 341 p.
26. Ivanov V.V. *Ekologicheskaya geokhimiya elementov. Spravochnik* [Environmental Geochemistry of elements: Reference]. Moscow, Nedra Publ., 1994. 304 p.
27. Chernenkaya E.V. *Dinamika izmeneniya elementnogo sostave prirodnoy sredy po dannym izucheniya gerbarnykh i sovremennykh sborov rasteny yuga Sibiri*. Dis. Dokt. nauk [Dynamics of elemental composition of the environment according to the study of herbarium and modern plant collections in southern Siberia. Dr. Diss.]. Tomsk, 2016. 262 p.
28. Parfenov V.I., Yakushev B.I. *Radioaktivnoe zagryaznenie rastitelnosti Belarusi (v svyazi s avariey na Chernobylskoy AES)* [Radioactive contamination of Belarus vegetation (in connection to the accident at the Chernobyl nuclear power plant)]. Minsk, Navuka i tekhnika Publ., 1995. 582 p.
29. Grachev A.M., Vaganov E.A., Levitt S.U. The methodology of obtaining 600-year-old multi-element based on the book of the chronicles of larch tree rings with the Taimyr Peninsula, Russia. *Journal of Siberian Federal University. Series: Biology*, 2013, vol. 6. no. 1, pp. 61–72. In Rus.

Received: 4 May 2017.

Information about the authors

Leonid P. Rikhvanov, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Yuriy V. Robertus, Cand. Sc., leading researcher, Gorno-Altai branch of the Institute for Water and Environmental Problems SB RAS.

Anastasiya S. Mironova, postgraduate, National Research Tomsk Polytechnic University.

Fedor B. Baksht, Cand. Sc., research engineer of 1 category, National Research Tomsk Polytechnic University.

Alexander F. Sudyko, senior researcher, National Research Tomsk Polytechnic 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

Подписано к печати 28.06.2017. Формат 60x84/8. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл. печ. л. 13,296. Уч.-изд. л. 12,62.
Заказ 177-17. Тираж 500 экз.



Издательство

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ