



ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

12+

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

**ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ**

Том 332, № 12, 2021

Издательство
Томского политехнического университета
2021

ИЗВЕСТИЯ ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА. ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ

Редакционная коллегия

Семилетов И.П., гл. редактор, д-р геогр. наук (Россия)
Кириянова Л.Г., выпуск. редактор, канд. филос. наук (Россия)
Глазырин А.С., выпуск. редактор, д-р техн. наук (Россия)
Алексеев С.В., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Борисов А.М., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Воропай Н.И., д-р техн. наук (Россия)
Джин-Чун Ким, Dsc (Южная Корея)
Заворин А.С., д-р техн. наук (Россия)
Зиатдинов Р.А., канд. физ.-мат. наук (Южная Корея)
Ильин А.П., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Конторович А.Э., д-р геол.-минерал. наук (Россия)
Коротеев Ю.М., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Коршунов А.В., д-р хим. наук (Россия)
Кочегуров А.И., канд. техн. наук (Россия)
Маркович Д.М., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Муравьев С.В., д-р техн. наук (Россия)
Никитенков Н.Н., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Оствальд Р.В., канд. хим. наук (Россия)
Пестряков А.Н., д-р хим. наук (Россия)
Покровский О.С., канд. геол.-минерал. наук (Франция)
Руи Д., PhD (Португалия)
Савичев О.Г., д-р геогр. наук (Россия)
Силкин В.М., д-р физ.-мат. наук (Испания)
Спицын В.Г., д-р техн. наук (Россия)
Старостенко В.И., д-р физ.-мат. наук (Украина)
Тойпель У., Dsc (Германия)
Уленев О.Н., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Ханьялич К., Dsc (Нидерланды)
Пойлов В.З., д-р техн. наук (Россия)
Боярко Г.Ю., д-р экон. наук, канд. г.-м. наук, проф. (Россия)
Софронов В.Л., д-р хим. наук (Россия)
Бузник В.М., д-р хим. наук (Россия)
Захаров Ю.А., д-р хим. наук (Россия)
Антипенко В.Р., д-р хим. наук (Россия)
Голик В.И., д-р техн. наук (Россия)
Абуталипова Е.М., д-р техн. наук (Россия)
Полищук В.И., д-р техн. наук (Россия)
Хамитов Р.Н., д-р техн. наук (Россия)
Зюев А.М., д-р техн. наук (Россия)
Белозеров В.Б., д-р геол.-минерал. наук (Россия)
Третьяк А.Я., д-р техн. наук (Россия)
Арбузов С.И., д-р геол.-минерал. наук (Россия)
Ковалев В.З., д-р техн. наук (Россия)
Романенко С.В., д-р хим. наук (Россия)
Стрижак П.А., д-р физ.-мат. 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, 2021

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

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

Учредителем является Томский политехнический университет.

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (свидетельство ПИ № ФС 77-65008 от 04.03.2016 г.)

ISSN (print) – 2500-1019
ISSN (on_line) – 2413-1830

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

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

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

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

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

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

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

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

Окончательное решение по публикации статьи принимает главный редактор журнала.

Все материалы размещаются в журнале на бесплатной основе.

Журнал издается ежемесячно.

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

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

Volume 332, № 12, 2021

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

Editorial Board

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

AIMS AND SCOPES

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

The journal was founded in 1903.

The journal is registered internationally (ISSN 2413-1830) and nationally (Certificate PE no. FM 77-65008, March 04, 2016 from the Federal Service for Supervision in the Sphere of Communications, Information Technology and Mass Media).

ISSN (print) – 2500-1019

ISSN (on-line) – 2413-1830

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

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

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

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

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

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

The publication of manuscripts is free of charge.

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

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

- Опыт применения методов математического моделирования для построения комплексных моделей управления объектами промысловой подготовки нефти
Фарунцев С.Д.
- 7 Experience in application of mathematical modeling methods for elaboration of integrated control models of field treatment facilities
Faruntsev S.D.
- Сезонная изменчивость седиментационных потоков в соленом меромиктическом озере Шира (Хакасия)
Бабич В.В., Дарьин А.В., Калугин И.А., Маркович Т.И., Зыков В.В., Рогозин Д.Ю.
- 22 Seasonal variability of sedimentation flows in salt meromictic lake Shira (Khakassia)
Babich V.V., Darin A.V., Kalugin I.A., Markovich T.I., Zykov V.V., Rogozin D.Yu.
- Определение напряженного состояния краевой части пласта с помощью методов текущего прогноза выбросоопасности
Шадрин А.В., Телегуз А.С.
- 35 Defining a stress state of a coal seam selvage applying outburst danger current prediction methods
Shadrin A.V., Teleguz A.S.
- Группирование и выделение залежей нефти в карбонатных коллекторах по продуктивности на стадии проведения геолого-разведочных работ
Мухаметшин В.Ш., Кулешова Л.С., Сафиуллина А.Р.
- 43 Grouping and determining oil reservoirs in carbonate reservoirs by their productivity at the stage of geological exploration
Mukhametshin V.Sh., Kuleshova L.S., Safullina A.R.
- Геоинформационное обеспечение безопасной эксплуатации трубопроводного транспорта
Долгополов Д.В., Мелкий В.А., Верхотуров А.А.
- 52 Geoinformation support for safe operation of pipeline transport
Dolgopолов D.V., Melkiy V.A., Verkhoturov A.A.
- Типоморфизм минералов вездаринской жилы (Юго-Западный Памир) – репер физико-химических процессов пегматитообразования
Бухарова О.В., Кунгулова Э.Н.
- 64 Typomorphism of minerals of vein Vezdarinskaya (southwestern Pamir) as an indicator of physico-chemical processes of pegmatite formation
Bukharova O.V., Kungulova E.N.
- Геохимические особенности донных осадков в областях разгрузки метан-содержащих флюидов на внешнем шельфе моря Лаптевых
Рубан А.С., Рудмин М.А., Мазуров А.К., Милевский Я.В., Семилетов И.П., Гершелис Е.В., Дударев О.В.
- 76 Geochemical specific of sediments at methane cold seep site on the Laptev Sea outer shelf
Ruban A.S., Rudmin M.A., Mazurov A.K., Milevsky Ya.V., Semiletov I.P., Gershelis E.V., Dudarev O.V.
- Оценка эрозийной опасности водосбора р. Карабула Красноярского края для строительного освоения
Строкова Л.А.
- 90 Assessment of erosion hazard of the watershed of the Karabula river in the Krasnoyarsk Krai for construction development
Strokova L.A.
- Результаты экспериментальных исследований гидромпульсного механизма для бурения пилотных скважин при прокладке трубопроводов
Саруев Л.А., Шадрин А.В., Мельнов К.В., Саруев А.Л.
- 103 Results of experimental studies of the hydraulic pulse mechanism for drilling pilot wells during pipeline laying
Saruev L.A., Shadrin A.V., Melnov K.V., Saruev A.L.
- Особенности минерального состава низкопроницаемых кремнисто-глинистых пород-коллекторов Берёзовской свиты севера Западной Сибири
Ананьева Л.Г., Дорошенко А.А., Ильенко С.С., Карымова Я.О., Коровкин М.В., Максимова Ю.А., Пестерев А.В., Протский О.Н., Савинова О.В., Хрущева М.О.
- 114 Features of mineral composition of low-permeable siliceous-clay reservoir rocks from the Berezovskaya formation in the north of Western Siberia
Ananyeva L.G., Doroshenko A.A., Ilenko S.S., Karymova Ya.O., Korovkin M.V., Maksimova Yu.A., Pesterev A.V., Protsky O.N., Savinova O.V., Khrushcheva M.O.
- Параметрический анализ схемы газопаровой установки с помощью математической модели
Галашов Н.Н., Туболев А.А., Минор А.А., Баннова А.И.
- 124 Parametric analysis of a gas-steam plant scheme using a mathematical model
Galashov N.N., Tubolev A.A., Minor A.A., Bannova A.I.
- Вольтамперометрическое определение тиосульфат-ионов на модифицированном частицами золота углеродсодержащем композитном электроде
Аксиненко О.С., Коршунов А.В., Ковалева С.В.
- 136 Voltammetric determination of thiosulfate ions at a carbon-containing composite electrode modified with gold particles
Aksinenko O.S., Korshunov A.V., Kovaleva S.V.
- Золото-сульфидно-кварцевое рудопроявление Хаак-Саир (Западная Тува): возраст, РТ-параметры, состав флюидов, изотопия S, O и C
Кужугет Р.В., Анкушева Н.Н., Кадыр-оол Ч.О., Редина А.А., Прокопьев И.Р., Пономарчук А.В.
- 148 Khaak-Sair gold-sulfide-quartz ore occurrence (Western Tuva): dating, PT parameters, fluid composition, and isotopes of S, O and C
Kuzhuget R.V., Ankusheva N.N., Kadyr-ool Ch.O., Redina A.A., Prokopyev I.R., Ponomarchuk A.V.
- Модифицирующий эффект продуктов переработки отходов нефтехимии в процессах смачивания и стабилизации твердофазных частиц
Дюрягина А.Н., Островной К.А., Козик Д.Ю.
- 164 Modifying effect of petrochemical waste processing products on wetting and stabilization of solid-phase particles
Dyuryagina A.N., Ostrovnoy K.A., Kozik D.Yu.
- Технологические решения по утилизации жидких продуктов медленного пиролиза древесной биомассы
Слюсарский К.В., Ларионов К.Б., Ивашкина Е.Н., Заворин А.С., Губин В.Е.
- 173 Technological solutions for utilization of liquid products of wood biomass slow pyrolysis
Slyusarsky K.V., Larionov K.B., Ivashkina E.N., Zavorin A.S., Gubin V.E.

- Сезонная динамика содержания химических элементов в твердых частицах аэрозолей воздуха малых населенных пунктов, расположенных в зоне влияния «восточного» следа радиоактивных выпадений Семипалатинского испытательного полигона**
Темиржанова А.Е., Язиков Е.Г., Дюсембаева М.Т., Шакенов Е.З., Мухамедияров Н.Ж., Ташекова А.Ж., Есильканов Г.М., Колбин В.В., Умаров М.А.
- Способы нормализации микроклимата в глубоких протяженных тупиковых выработках**
Ольховский Д.В., Зайцев А.В., Шалимов А.В., Давыдов А.А.
- Влияние угла падения трещин на локальное напряженное состояние приоткосной зоны вскрышного уступа**
Марков С.О., Хорешок А.А., Тюленев М.А.
- Особенности применения полимерных и органических скрепляющих составов при ремонте подземных горных выработок**
Цибаев С.С., Зорков Д.В., Ренев А.А., Ванг Цин
- Техногенное воздействие на окружающую среду в Российской Арктике на примере Норильского промышленного района**
Юркевич Н.В., Ельцов И.Н., Гуреев В.Н., Мазов Н.А., Юркевич Н.В., Еделева А.В.
- 189 Seasonal dynamics of the content of chemical elements in particulate aerosols in the air of small settlements located in the zone of influence of the «vostochny» trace of radioactive fallout from the Semipalatinsk test site**
Temirzhanova A.E., Yazikov E.G., Dyusembayeva M.T., Shakenov E.Z., Mukhamediyarov N.Zh., Tashekova A.Zh., Esilkanov G.M., Kolbin V.V., Umarov M.A.
- 200 Methods for microclimate normalization in deep long blind drifts**
Olkhovskiy D.V., Zaytsev A.V., Shalimov A.V., Davydov A.A.
- 211 Influence of fracture incidence angle on the local stress state of the near-slope zone of the overburden ledge**
Markov S.O., Khoreshok A.A., Tyulenev M.A.
- 220 Features of application of polymer and organic fastening compounds in underground mining workings repair operations**
Tsibaev S.S., Zorkov D.V., Renev A.A., Qing-duo Wan
- 230 Technogenic effect on the environment in the Russian Arctic by the example of the Norilsk industrial area**
Yurkevich N.V., Eltsov I.N., Gureev V.N., Mazov N.A., Yurkevich N.V., Edelev A.V.

УДК 681.5

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ КОМПЛЕКСНЫХ МОДЕЛЕЙ УПРАВЛЕНИЯ ОБЪЕКТАМИ ПРОМЫСЛОВОЙ ПОДГОТОВКИ НЕФТИ

Фарунцев Сергей Дмитриевич,
sdfar52@gmail.com

Омский государственный технический университет,
Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11.

Актуальность исследования обусловлена существенно возросшими требованиями, предъявляемыми к системам управления наземными объектами нефтегазовых месторождений. Системы управления и регулирования должны обеспечивать безопасное ведение процессов при поддержании заданного качества товарной нефти в условиях действия интенсивного фона возмущений, способность длительного автономного функционирования при минимальном воздействии со стороны оперативно-го персонала, минимизацию рисков отрицательного воздействия производственных факторов на окружающую среду и др. Обязательным условием выполнения перечисленных требований и способом повышения уровня интеллектуализации систем управления объектов подготовки нефти и газа является разработка систем усовершенствованного управления с применением методов математического моделирования, теории автоматического управления и информационных технологий.

Цель: разработка комплексной математической модели для построения системы интеллектуального управления процессами, протекающими в одном из основных аппаратов установки подготовки нефти – трехфазном сепараторе.

Объектом исследования является трехфазный сепаратор, включающий секции дегазирования, обезвоживания и выгрузки нефтяной эмульсии.

Методы: методика Каца расчета компонентного состава газовой и жидкостной фаз разделяющейся эмульсии нефти, материальный и молярный балансы, методы численного решения систем нелинейных уравнений, конфигурирование и обучение искусственных нейронных сетей MATLAB (NFTool, NNTool), принципы ячеечного моделирования, блочное моделирование программными средствами MATLAB Simulink.

Результаты. Разработана комплексная математическая модель управления, описывающая статику и динамику процессов, протекающих в каждой секции трехфазного сепаратора. Для целей идентификации реального процесса обезвоживания эмульсии предложена функция интенсивности, являющаяся аналогом лабораторной кривой отстаивания. Структура ячеечной модели сепаратора параметрически связана с функцией интенсивности. Для решения в едином цикле общей задачи динамики, включающей несколько систем нелинейных уравнений, из цикла исключены локальные итерационные процедуры. Добавлены блоки искусственных нейронных сетей, обученных безитерационному решению локальных нелинейных систем. Проведена конфигурация модели программными средствами MATLAB Simulink. Получено решение, проиллюстрированное графиками статических зависимостей и переходных характеристик трехфазного сепаратора по его основным входным параметрам.

Вывод. Полученные итоги математического моделирования трехфазного сепаратора, так же как и ранее опубликованные автором результаты моделирования подогревателя эмульсии нефти, позволяют рассматривать разработанные модели в качестве основы для построения усовершенствованной системы управления объектами установки подготовки нефти в составе интеллектуального нефтегазового месторождения.

Ключевые слова:

Интеллектуальное нефтегазовое месторождение, установка подготовки нефти, комплексная математическая модель статики и динамики, система усовершенствованного управления, трехфазный сепаратор, искусственная нейронная сеть, MATLAB Simulink.

Введение

Решение задач повышения эффективности процессов добычи и подготовки нефти и газа в настоящее время уже невозможно рассматривать вне парадигмы интеллектуального (цифрового) нефтегазового месторождения [1, 2]. В свою очередь, концепция интеллектуального месторождения является частью глобальной тенденции промышленной автоматизации Industry 4.0, предлагающей решения для отрасли, которые обеспечивают увеличение прибыли и снижение затрат путем использования методов математического моделирования и искусственного интеллекта на всех этапах, начиная с разведки, анализа состояния пластов и управления скважинной добычей [3–6] и заканчивая процессами автоматизации объектов подготовки, транспортировки и переработки [7].

Одними из главных наземных объектов современного интеллектуального месторождения нефти являются установки подготовки нефти (УПН), в которых осуществляются процессы подготовки нефтяной эмульсии, поступающей от скважин (дегазация, обезвоживание, обессоливание), к дальнейшей транспортировке до предприятий нефтепереработки. Существующими нормами жестко регламентируется максимальное содержание в товарной нефти на выходе УПН воды, хлористых солей, механических примесей, сернистых и иных соединений.

Исторически в российской нефтегазовой отрасли сложилась ситуация, что системы управления и автоматизации объектов добычи и подготовки нефти в части интеллектуализации отстают от таковых для процессов нефтепереработки и нефтехимии [8], снижая общий уровень готовности нефтегазовой отрасли к

«цифровизации» [9]. Это объясняется спецификой большинства российских нефтяных месторождений, состоящей в территориальной разбросанности технологических объектов, их удаленности от крупных промышленных центров, суровых климатических условиях. Между тем указанные особенности предъявляют повышенные требования к системам автоматизации и управления объектами УПН, среди которых обеспечение безопасного ведения процессов, поддержание заданного качества товарной нефти в условиях действия интенсивного фона возмущений, способность длительного автономного функционирования при минимальном воздействии со стороны оперативного персонала, сокращение рисков отрицательного воздействия производственных факторов на окружающую среду и др.

Важным условием выполнения перечисленных требований и способом повышения уровня интеллектуализации систем управления объектов подготовки нефти и газа является разработка систем усовершенствованного управления с применением методов математического моделирования, теории автоматического управления и информационных технологий [8]. Среди известных методов синтеза математических моделей для объектов технологии [10] указывается, в частности, на преимущества построения для целей управления ячеечных моделей [11, 12]. В работах [13, 14], являющихся логическим началом настоящей публикации, описываются постановка и решение задач разработки математической модели и систем усовершенствованного управления для одного из центральных объектов подготовки нефти – печи подогрева нефтяной эмульсии на примере трубчатого подогревателя ПТБ-10. Задачи решались с использованием принципов ячеечного моделирования, искусственных нейронных сетей (ИНС) и программных средств MATLAB Simulink.

В настоящей работе описывается процедура разработки статических и динамических моделей управления технологическими процессами сепарации газа и осаждения воды из нефтяной эмульсии, осуществляющимися в трехфазных сепараторах (ТФС), составляющих совместно с подогревателями основу современных установок подготовки нефти. Цель математического моделирования для решения задач управления – рассчитать не только статику, но и динамику изменения во времени режимных параметров существующих аппаратов при их известных размерах, при заданных технологических и многих изменяющихся параметрах – возмущениях. Модели должны быть корректными, т. е. адекватно отображающими поведение реальных объектов, и одновременно достаточно простыми, доступными для реализации в условиях реального производства

При построении статической модели сепарации газа использована аналитическая методология Каца [15–17]. Для решения нелинейной системы уравнений, включающей уравнения баланса и равновесия, предложен оригинальный алгоритм, описанный в работе.

При разработке математического описания процесса обезвоживания принят гибридный вариант мо-

делирования, использующий как аналитические методы, так и принципы экспериментально-статистического уточнения коэффициентов аналитических уравнений в условиях реальной эксплуатации. Эмпирические методы экспериментально-статистического исследования рассматриваемого процесса не могут быть рекомендованы ввиду необходимости постановки изучающего эксперимента при всяком изменении технологической ситуации на объекте управления – изменении условий эксплуатации, состава сырья и др. Чисто аналитический подход к построению модели управления процесса отстаивания в промышленных условиях оказывается трудно реализуем ввиду его достаточной сложности и невозможности априори учесть все факторы, воздействующие на процесс. В качестве основы для разработки модели обезвоживания в настоящей работе принята идея наличия некоей интегральной функции эффективности обезвоживания, распределенной по длине сепаратора и рассчитываемой как отношение расхода воды, выделившейся из эмульсии в отдельных участках, к расходу воды, поступившей в сепаратор в составе эмульсии. Общий вид и параметры данной функции должны быть приняты на основе предварительного лабораторного анализа эмульсии и уточняющего эксперимента на реальном оборудовании.

Как и в предыдущих работах [13, 14], при разработке моделей ТФС активно используется методология ячеечного моделирования, дополненная методами построения ИНС, находящимися в арсенале программных средств MATLAB Simulink. Разработанные модели предназначены для построения систем усовершенствованного (интеллектуального) управления объектами УПН.

Модель статики процесса сепарации газа

Нефтяная эмульсия поступает от скважин к установкам подготовки нефти в виде смеси жидкой углеводородной составляющей, газовой составляющей и пластовой воды, содержащей различные соли. Процессы сепарации газа в составе УПН могут осуществляться как в автономных аппаратах – газовых сепараторах горизонтального и вертикального типа, так и в отдельных секциях отстойников нефти или трехфазных сепараторов [18]. Система уравнений описания процесса газовой сепарации, использующая в своей постановке методику Каца, представлена ниже в виде равенств (1)–(10)

$$G+L+G^{yn}=1, \quad (1)$$

$$\eta = \frac{G}{G+G^{yn}}, \quad (2)$$

$$L = 1 - \frac{G}{\eta}, \quad (3)$$

$$z_i = (G+G^{yn}) \cdot y_i + L \cdot x_i \quad i = \overline{1, n}, \quad (4)$$

$$y_i = K_i \cdot x_i, \quad (5)$$

$$K_i = \frac{P_i^0}{P}, \quad (6)$$

$$x_i = \frac{z_i}{1 + \frac{G}{\eta}(K_i - 1)}, i = \overline{1, n}, \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^n x_i = 1; 0 \leq x_i \leq 1, i = \overline{1, n}, \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^n y_i = 1; 0 \leq y_i \leq 1, i = \overline{1, n}, \quad (9)$$

$$0 \leq G \leq 1, 0 \leq L \leq 1. \quad (10)$$

где G, L, G^{yn} – мольные доли разделения 1-го моля нефти на газовую, жидкую фазу и на долю унесенного газа потоком жидкости, соответственно; η – отношение количества газа на выходе сепаратора к теоретически возможному количеству газа, которое может быть получено в процессе по условиям равновесия (коэффициент полезного действия сепаратора); z_i, x_i, y_i – объемные (мольные) доли i -го компонента в исходном продукте и выделившихся жидкой и газовой фазах, соответственно; K_i – константа фазового равновесия i -го компонента; P_i^0 – давление насыщенных паров i -го вещества (упругость, т. е. давление при котором происходит процесс конденсации паровой фазы), Па; P – давление в сепараторе, Па.

Решаться система нелинейных уравнений (1)–(10) должна численными методами. Величины P_i^0 давлений насыщения компонентов (упругости), необходимые для расчета констант равновесия, или сами константы равновесия могут быть выбраны из справочных пособий [16–18] по давлению и температуре для условий задачи.

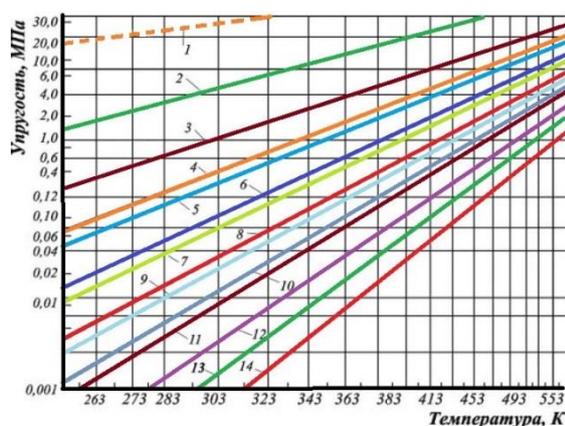


Рис. 1. Зависимость упругости чистых углеводородов от температуры [18]

Fig. 1. Dependence of pure hydrocarbons elasticity on temperature [18]

Рис. 1 иллюстрирует в логарифмическом масштабе графики зависимостей упругости некоторых чистых углеводородов от температуры. На рисунке цифрами обозначены следующие виды углеводородов: 1 – метан, 2 – этан, 3 – пропан, 4 – *i*-бутан, 5 – *n*-бутан, 6 – *i*-пентан, 7 – *n*-пентан, 8 – *i*-гексан, 9 – *n*-гексан, 10 – *i*-гептан, 11 – гептан, 12 – октан, 13 – нонан, 14 – декан. Существуют также многочисленные расчетные способы вычисления констант равновесия –

Антуана, Ашворта и др. В рассматриваемом случае расчет констант фазового равновесия углеводородов от метана до гексана был произведен путем линейной аппроксимации графиков зависимости давления насыщенных паров чистых углеводородов от температуры, а затем по уравнению (6) были рассчитаны $K_i, i = \overline{1, n}$.

Аппроксимация производилась в пространстве логарифмических координат с последующим переходом в пространство с равномерными координатами. Расчет констант фазового равновесия неуглеводородных компонентов (CO_2 и N_2) выполнен по

модели Ашворта. Принятый алгоритм решения нелинейной системы уравнений (1)–(10) состоит в следующем.

Преобразуем систему уравнений, имеющую $2n+2$ уравнений и содержащую столько же неизвестных $x_i, y_i, i = \overline{1, n}, L$ и G (полагаем коэффициент полезного действия сепаратора η постоянным и заданным), следующим образом. Выразим в каждом из $2n+2$ уравнений одну из вычисляемых переменных в функции от остальных, т. е. получим следующую систему уравнений

$$G = \text{varie}, \quad (11)$$

$$L = 1 - G/\eta, \quad (12)$$

$$x_i = \frac{z_i}{1 + \frac{G}{\eta}(K_i - 1)}, \dots, x_n = \frac{z_n}{1 + \frac{G}{\eta}(K_n - 1)}, \quad (13)$$

$$y_i = x_i \cdot K_i, \dots, y_n = x_n \cdot K_n, \quad (14)$$

где G – варьируемый параметр в пределах от 0 до 1. В таком виде систему удобно решать блочным методом средствами MATLAB Simulink, начиная от самого первого уравнения, двигаясь сверху вниз и слева направо. В системе (11)–(14) не учтены ограничения (8) и (9) на значения величин переменных $x_i, y_i, i = \overline{1, n}$, контроль которых будет осуществляться следующим образом. Сформируем критерий Φ в виде уравнения (15) суммы квадратов отклонений расчетных значений x_i, y_i от единицы и будем в каждом цикле увеличения G от нуля на некоторую малую величину сравнивать значение Φ с заданным значением ε ($\varepsilon = 0,00001$). Как только выполнится условие $\Phi < \varepsilon$, вычисления прекратятся.

$$\Phi = (1 - \sum_{i=1}^n x_i)^2 + (1 - \sum_{i=1}^n y_i)^2. \quad (15)$$

По окончании расчета составов жидкой и газовой фаз нефти $x_i, y_i, i = \overline{1, n}$ производится расчет параметров (16)–(24), необходимых для последующего моделирования процессов обезвоживания

$$\rho_L = \sum_{i=1}^n (x_i^{ob} \cdot \rho_i), \quad (16)$$

$$x_i^{ob} = \frac{x_i^{mcc}}{\rho_i \cdot \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i^{mcc}}{\rho_i} \right)}, \quad (17)$$

$$x_i^{mass} = \frac{x_i \cdot M_i}{\sum_{i=1}^n (x_i \cdot M_i)}, \quad (18)$$

$$\rho_G^{NC} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \cdot M_i}{22.414}, \quad (19)$$

$$\rho_G^{WC} = \frac{\rho_G^{NC} \cdot 273.16 \cdot P}{(273.15 + T_{em}) \cdot 0.1013}, \quad (20)$$

$$M^L = \sum_{i=1}^n x_i \cdot M_i, \quad (21)$$

$$M^G = \sum_{i=1}^n y_i \cdot M_i, \quad (22)$$

$$e_{mass} = \frac{M^G \cdot G}{M^G \cdot G + M^L \cdot L}, \quad (23)$$

$$\begin{aligned} G_{Oil_out} &= G_{em_in} \cdot (1 - e_{mass}), \\ G_{Gas_out} &= G_{em_in} \cdot e_{mass}, \end{aligned} \quad (24)$$

где ρ_L – плотности жидкой фазы нефти после сепарации, кг/м³; ρ_i – плотность i -го компонента нефти, кг/м³; ρ_G^{NC} – плотность газовой фазы нефти после сепарации в нормальных условиях ($T=273,15$ К, $P=101325$ Па), кг/м³; M_i – молярная масса i -го компонента газовой фазы нефти, кг/кмоль; ρ_G^{WC} – плотность газовой фазы нефти после сепарации в рабочих условиях, кг/м³; P – давление в зоне сепарации, МПа; T_{em} – температура в зоне сепарации, С; M^L – молярная масса жидкой фазы нефти, кг/кмоль; M^G – молярная масса газовой фазы нефти, кг/кмоль; e_{mass} – массовая доля отгона газа, отн. ед.; G, L – мольные доли разделения нефти на газовую и жидкую фазу, соответственно,

отн. ед.; G_{Oil_out}, G_{Gas_out} – массовый расход жидкой и газовой фаз нефти после сепарации, соответственно.

В результате многократного решения системы уравнений (1)–(24) должен быть собран набор данных для формирования и обучения статической нейронной сети (25), предназначенной для расчета выходных параметров камеры сепарации газа – величин массового отгона газа e_{mass} , плотностей газа $Dens_Gas_out$ и нефти $Dens_Oil_out$, в зависимости от входных параметров – температуры эмульсии T_{em_in} и давления в камере сепарации ТФС P_Separ , необходимых для последующего безитерационного решения уравнений динамики камеры осаждения

$$[e_{mass}, Dens_Gas_out, Dens_Oil_out] = NN(T_{em_in}, P_Separ). \quad (25)$$

Моделирование процесса обезвоживания нефтяной эмульсии

Процесс обезвоживания нефтяной эмульсии, при котором происходит процесс разрушения агрегатов эмульсии с выделением из них водной фазы, является, наряду с рассмотренной газовой сепарацией, одним из основных процессов обработки скважинной продукции, добываемой на месторождениях нефти и газа, подготовки её к транспортировке для переработки на нефтеперерабатывающих заводах [17, 18].

Процессы обезвоживания и отстаивания проводятся в аппаратах различного типа, среди которых отстойники – горизонтальные и вертикальные, отстойники-сепараторы, трехфазные сепараторы и нефтеводогазоразделители [19]. Схема трехфазного сепаратора, модель которого рассматривается в настоящей работе, показана на рис. 2.



Рис. 2. Внешний вид и схема трехфазного сепаратора [19]

Fig. 2. Appearance and diagram of a three-phase separator [19]

Трехфазный сепаратор состоит из трех камер. Первая (левая на рис. 2) – сепарационная камера, куда поступает нефтяная эмульсия. Из сепарационной камеры нефтяная эмульсия поступает через проницаемую перегородку в камеру отстаивания (осаждения, обезвоживания, коалесценции – иные возможные названия этой камеры), занимающую основной объем горизонтального трехфазного сепаратора. В крайней правой части ТФС расположена камера выгрузки, отделенная от камеры отстаивания непроницаемой перегородкой фиксированной высоты, через которую переливается отстаивающаяся нефть.

При аналитическом математическом описании процессов отстаивания и обезвоживания, используемом, как правило, при проектировании конструкции аппаратов, обычно рассматриваются явления стесненного осаждения капель воды под действием силы тяжести с учетом физико-химических свойств среды и влияния технологических параметров процесса [16, 17]. Однако ранее было отмечено, что чисто аналитические методы описания трудно реализуемы для построения моделей управления.

Представляется более рациональным решением принять гибридный вариант разработки модели, ис-

пользующий как аналитические методы, так и принципы экспериментально-статистического уточнения аналитических уравнений в условиях реальной эксплуатации. В качестве основы для разработки модели обезвоживания в настоящей работе принята идея наличия некоей функции эффективности отстаивания Ψ_{eff}

$$\Psi_{eff} = \frac{G_w^{out}}{G_w^{in}}, \quad (26)$$

где $G_w^{in} = G_{in} \cdot w_{in}$; G_w^{out} – расход воды на выходе аппарата-отстойника, кг/с; G_w^{in} – расход воды, поступающей в отстойник в смеси с эмульсией, кг/с; G_{in} – расход эмульсии на входе, кг/с; w_{in} – влагосодержание эмульсии на входе, отн. ед.

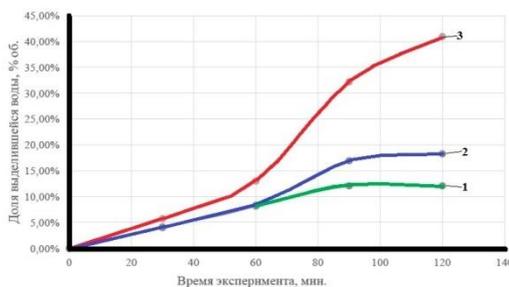
Функция эффективности Ψ_{eff} , согласно предлагаемому методу, первоначально оценивается по результатам выполнения так называемого «бутылочного теста» (от англ. *Bottle Test*) [20, 21], обычно применяемого для исследования активности деэмульгаторов – реагентов, способствующих интенсификации

процессов обезвоживания, с последующим уточнением вида функции в процессе эксплуатации реального оборудования.

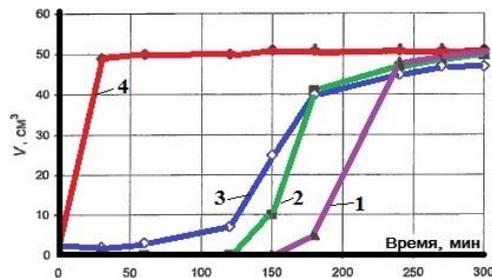
Функция эффективности (26) зависит от времени и при повышении среднего времени пребывания эмульсии в отстойнике увеличивает своё значение от нуля до единицы (в предельном идеальном случае). По форме Ψ_{eff} соответствует виду кривых отстаивания, примеры которых изображены на рис. 3. Параметр среднего времени пребывания нефтяной эмульсии в аппарате-отстойнике τ_{res} является аналогом времени отстаивания бутылочного теста и рассчитывается в виде (27)

$$\tau_{res} = \frac{V}{v_{em}^{out}} = \frac{V \cdot \rho_{em}}{G_{em}^{out}}, \quad (27)$$

где V – рабочий объем отстойника, м³; v_{em}^{out} – объемный расход эмульсии на выходе, м³/с; G_{em}^{out} – массовый расход эмульсии на выходе, кг/с; ρ_{em} – плотность эмульсии, кг/м³.



А



В

Рис. 3. Образцы кривых отстаивания нефтяных эмульсий для различных условий – температуры эмульсии и концентрации деэмульгатора: А) расход деэмульгатора «Demulex» при 20 °C 20 г/т (1), 40 г/т (2), 60 г/т (3) [20]; В) расход реагента СНПКХ 9633 0,25 % (1), 0,5 % (2), 2 % (3), без реагента (4) [21]

Fig. 3. Samples of oil emulsions sedimentation curves for various conditions – emulsion temperature and demulsifier concentration: А) consumption of demulsifier «Demulex» at 20 °C 20 g/t (1), 40 g/t (2), 60 g/t (3) [20]; В) consumption of reagent SNPKh 9633 0,25 % (1), 0,5 % (2), 2 % (3), without reagent (4) [21]

Под рабочим объемом отстойника понимается объем зоны, внутри которой происходит процесс движения эмульсии и отделения от воды. Например, для ТФС рабочим объемом будет считаться объем камеры осаждения, нижнюю поверхность которого составляет межфазовая поверхность воды и нефти, верхнюю – поверхность раздела нефтяной эмульсии с газовой фазой, а боковыми поверхностями – левая и правая стенки камеры осаждения. При этом Ψ_{eff} является собирательной (интегральной) функцией, реагирующей на действие многих факторов, и в связи с этим может служить отправным элементом при разработке математической модели управления аппаратом-отстойником непрерывного действия, аккумулируя и отображая совокупность действующих возмущений.

На рис. 4 изображен примерный вид семейства кривых зависимости функции эффективности Ψ_{eff} от среднего времени пребывания и температуры эмульсии T_{em} , рассчитанных с учетом анализов гипотетиче-

ского бутылочного теста при известном оптимальном значении концентрации деэмульгатора и скорректированных по экспериментальным данным на действующем оборудовании.

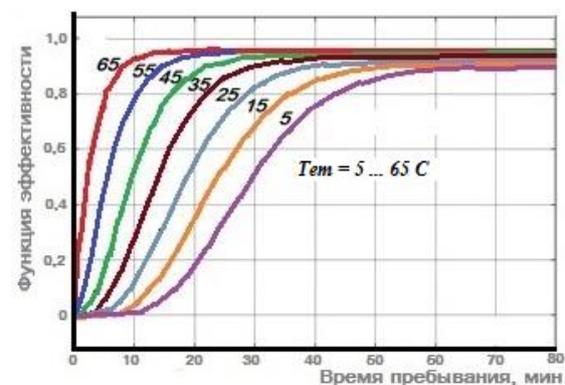


Рис. 4. Вид семейства кривых функции эффективности Ψ_{eff}
 Fig. 4. Family of efficiency function curves Ψ_{eff}

$$\Psi_{eff} = \Psi(T_{em}, \tau_{res}). \quad (28)$$

Для последующего практического применения функции (28) для целей моделирования полезно скорректированные данные бутылочного теста использовать для формирования и обучения нейронной сети, реализующей вычислительную операцию вида (29)

$$\Psi_{eff} = NN(T_{em}, \tau_{res}), \quad (29)$$

что может быть выполнено с помощью одного из приложений *MATLAB* (*NFTool*, *NNTool*) [22].

Особенности моделирования процесса отстаивания воды в горизонтальном аппарате непрерывного типа с использованием ячеечной модели

Принимая факт зависимости количества воды, выделившийся из эмульсии, от длины аппарата и времени, в соответствии с рис. 3, 4, следует для математического описания процессов обезвоживания обра-

таться к аппарату дифференциальных уравнений в частных производных, имеющих в качестве аргументов параметры времени и координаты расстояния. В теории и практике численного решения дифференциальных уравнений в частных производных одним из эффективных способов является применение механизма ячеечных моделей [11, 12], что будет проиллюстрировано в настоящей работе при математическом описании камеры осаждения (обезвоживания) трехфазного сепаратора.

Схема ячеечной модели обезвоживания в приложении к ТФС изображена на рис. 5. Основная особенность рассматриваемой ячеечной модели состоит в том, что длина каждой i -й ячейки l_i , а следовательно, и её объем V_i являются переменными величинами, зависящими от расхода воды G_{wi} , исходящей из ячейки через межфазовую поверхность в рассматриваемый момент времени.

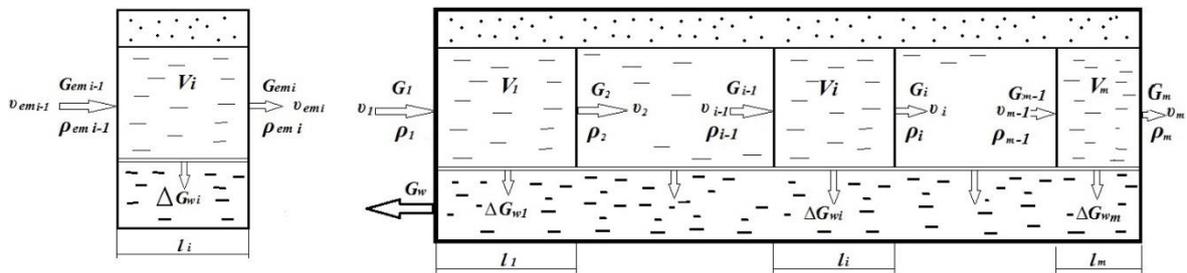


Рис. 5. Схема отдельной ячейки камеры осаждения трехфазного сепаратора (слева) и схема движения частиц эмульсии и воды в ячеечной модели (справа)

Fig. 5. Diagram of a separate cell of the sedimentation chamber of a three-phase separator (left) and a diagram of the movement of emulsion and water particles in the cell model (right)

Материальный баланс i -й ячейки, полагая, что процесс выделения газа завершился в камере сепарации, запишется в виде уравнения

$$G_{i-1} = G_i + \Delta G_{wi}, \quad (30)$$

где G_{i-1} и G_i – массовый расход эмульсии на входе и выходе из ячейки, кг/с; ΔG_{wi} – массовый расход воды из ячейки, кг/с.

Объемные расходы эмульсии v_{i-1} и v_i на входе и выходе из ячейки вычисляются в виде

$$v_{i-1} = \frac{G_{i-1}}{\rho_{i-1}}; \quad v_i = \frac{G_i}{\rho_i}, \quad (31)$$

где ρ_{i-1} и ρ_i – плотность эмульсии на входе и выходе из ячейки, соответственно, кг/м³.

При этом величины среднего времени пребывания частиц эмульсии в каждой из i -х ячеек τ_{resi} являются постоянными и рассчитываются как

$$\tau_{resi} = \frac{V_i}{v_i}, \quad i = \overline{1, m}, \quad (32)$$

$$\tau_{res1} = \dots = \tau_{resi} = \dots = \tau_{resm}. \quad (33)$$

Общее среднее время пребывания вычисляется в виде суммы

$$\tau_{res} = \sum_{i=1}^m \tau_{resi} = \tau_{resi} \cdot m. \quad (34)$$

Для выполнения условий (32), (33) длина и объем каждой i -й ячейки должны изменяться, т. е. должно выполняться условие

$$V_i = v_i \cdot \tau_{resi} = v_i \cdot \frac{\tau_{res}}{m}, \quad i = \overline{1, m}. \quad (35)$$

В равенствах (30)–(35) принято τ_{res} – общее среднее время пребывания частиц эмульсии в камере осаждения, с; τ_{resi} – среднее время пребывания частиц эмульсии в i -й ячейке, с; V_i – объем i -й ячейки, м³; v_i – объемный расход эмульсии в i -й ячейке и на её выходе, м³/с.

Расход воды, вытекающей из каждой i -й ячейки, подчиняется закону, заданному уравнениями (26)–(35). Рис. 6 иллюстрирует закономерности процессов обезвоживания в камере осаждения ТФС. Верхний экран показывает примерный график изменения кривой функции эффективности обезвоживания на протяженной камере осаждения, разделенной на m ячеек, по которой слева направо протекает поток нефтяной эмульсии. График представлен в аналоговом и дискретном виде, во втором случае – в виде ступенек, постоянных по длине отдельной ячейки и равных значениям функции эффективности на выходе i -й ячейки. Количество ячеек по длине камеры осаждения сепаратора для данного примера принято $m=10$.

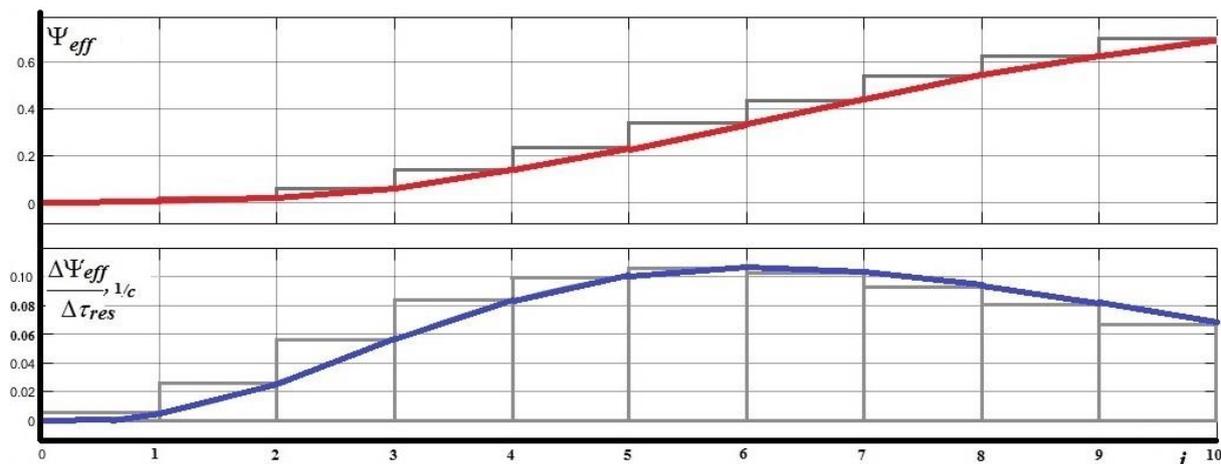


Рис. 6. Закономерности процессов обезвоживания в камере осаждения трехфазного сепаратора

Fig. 6. Regularities of dehydration processes in the three-phase separator sedimentation chamber

Выражения для разницы значений функции эффективности (26) для соседних $(i-1)$ -й и i -й ячеек можно записать в виде

$$\Delta\Psi_{eff\ i} = \Psi_{eff\ i} - \Psi_{eff\ i-1} = \frac{G_{wi}}{G_w^{TPS}} - \frac{G_{w\ i-1}}{G_w^{TPS}} = \frac{\Delta G_{wi}}{G_w^{TPS}},$$

$$\Delta G_{wi} = \Delta\Psi_{eff\ i} \cdot G_w^{TPS} \quad i = \overline{1, m}. \quad (36)$$

где G_w^{TPS} – влагосодержание эмульсии на входе в трехфазный сепаратор, отн. ед. Нижний экран рис. 6 иллюстрирует также в аналоговом и дискретном виде график скорости изменения функции эффективности по длине сепаратора и от ячейки к ячейке. Расход воды, осаждающейся из нефтяной эмульсии из i -й ячейки, может быть вычислен, согласно данному графику, в виде равенств

$$\Delta G_{wi} = G_w^{TPS} \cdot \frac{\Delta\Psi_{eff}}{\Delta\tau_{res}} \cdot \tau_{resi}, \quad i = \overline{1, m}, \quad (37)$$

где ΔG_{wi} – расход воды, осаждающейся из i -й ячейки за время τ_{resi} и проходящей через межфазовую поверхность в i -й ячейке, кг/с.

Очевидно, суммарный расход осадившейся воды равняется

$$G_w = \sum_{i=1}^m \Delta G_{wi}. \quad (38)$$

Для практических целей может быть использован как верхний график рис. 6 с уравнением (36), так и нижний график с уравнением (37) (в рассматриваемом случае использовался первый метод).

Постановка задачи расчета статического режима процесса отстаивания

Заданы входные параметры процесса: G_{em}^{SC} – расход эмульсии на входе в камеру осаждения, кг/с; W_{em}^{SC} – влагосодержание эмульсии на входе в камеру осаждения, отн. ед.; T_{em}^{SC} – температура эмульсии на входе в камеру осаждения, С.

Известны следующие конструктивные характеристики трехфазного сепаратора и параметры входных

компонентов: L^{SC} – общая длина камеры осаждения, м; r^{SC} – радиус цилиндрической части камеры осаждения, м; H – высота перегородки, отделяющей камеру осаждения от зоны выгрузки, м; ρ_{oil}^{SC} , ρ_w^{SC} – плотность нефти и воды на входе в камеру осаждения, соответственно, кг/м³.

Требуется рассчитать значения следующих параметров процесса: G_{em}^{outSC} – расход эмульсии на выходе камеры осаждения, кг/с; w_{em}^{outSC} – влагосодержание эмульсии на выходе камеры осаждения, масс. отн. ед.; G_{oil}^{outSC} – расход нефти на выходе камеры осаждения, кг/с; G_w^{outSC} – расход воды на выходе камеры осаждения, кг/с. Для решения задачи требуется задаться данными: h – величина межфазового уровня, м; m – количество ячеек модели. Полагаем при этом, что предварительно рассчитана и получена зависимость (29) в виде обученной нейронной сети.

Запишем систему уравнений для i ячеек $i = \overline{1, m}$, камеры осаждения ТФС в виде системы (39)–(45), в которых принято обозначение: G_i^{WOil} – расход воды, находящейся в эмульсии нефти на выходе из i -й ячейки, кг/с; τ_{res}^{SC} – общее среднее время пребывания частиц эмульсии в зоне осаждения, с

$$\Psi_{eff\ i} = NN(T_{em}^{SC}, \tau_{resi}), \quad (39)$$

$$\Delta G_{wi} = \Delta\Psi_{eff\ i} \cdot G_w^{SC}, \quad (40)$$

$$G_{emi} = G_{emi-1} - \Delta G_{wi}, \quad (41)$$

$$G_i^{WOil} = G_{emi-1} \cdot W_{emi-1} - \Delta G_{wi}, \quad (42)$$

$$\rho_{emi} = \frac{1}{\frac{w_{emi}}{\rho_w} + \frac{(1-w_{emi})}{\rho_{oil}}}, \quad (43)$$

$$w_{emi} = \frac{G_i^{WOil}}{G_{emi}}, \quad (44)$$

$$V_i = v_i \cdot \tau_{res\ i} = v_i \cdot \frac{\tau_{res}^{SC}}{m}. \quad (45)$$

Следующая система уравнений (46)–(48) служит для описания камеры осаждения в целом

$$\tau_{res}^{SC} = \sum_{i=1}^m \tau_{resi}^{SC}, \quad (46)$$

$$V^{SC} = \sum_{i=1}^m V_i^{SC}, \quad V^{SC} = S^{SC} \cdot L^{SC}, \quad (47)$$

$$S^{SC} = f(r^{SC}, h, H), \quad (48)$$

где V^{SC} – общий объем камеры осаждения, m^3 ; S^{SC} – площадь сечения камеры осаждения, m^2 (вычисляется по тригонометрическим формулам площади сегмента кругового сечения в зависимости от высоты перегородки H , межфазового уровня h и радиуса ТФС r^{SC}); L^{SC} – длина камеры осаждения, м.

Граничные условия формируют уравнения (49)–(57).

$$G_w^{SC} = G_{em}^{SC} \cdot w_{em}^{SC}, \quad (49)$$

$$G_{w1}^{in} = G_w^{SC}, \quad (50)$$

$$G_1 = G^{SC}, \quad (51)$$

$$w_1 = w_{em}^{SC}, \quad (52)$$

$$G_w^{outSC} = \sum_{i=1}^m \Delta G_{wi}, \quad (53)$$

$$\rho_{em}^{TPS} = \frac{1}{\frac{w_{em}^{SC}}{\rho_w} + \frac{(1-w_{em}^{SC})}{\rho_{oil}}}, \quad (54)$$

$$G_{oil}^{outSC} = G_{em}^{SC} \cdot (1-w_{em}^{SC}), \quad (55)$$

$$G_{em}^{outSC} = G_m, \quad (56)$$

$$w_{em}^{outSC} = w_m. \quad (57)$$

Система уравнений (39)–(57) является нелинейной и решается принятым численным методом с использованием программных средств MATLAB Simulink. В результате многократного решения данной системы должен быть собран набор статистических данных для формирования зависимости общего среднего времени пребывания эмульсии в камере осаждения от входных параметров в виде искусственной нейронной сети (58), необходимой для безитеративного решения системы уравнений динамики камеры осаждения.

$$\tau_{res}^{SC} = NN(G_{em}^{SC}, w_{em}^{SC}, T_{em}^{SC}, h). \quad (58)$$

Постановка задачи расчета динамики процесса отстаивания

Система уравнений динамики для расчета процессов, протекающих в камере обезвоживания трехфазного сепаратора по координатам времени и пространства, включает системы равенств (59)–(70). Уравнения (59) общего материального баланса для каждой из i ячеек с учетом соотношений $M_i = V_i \cdot \rho_i$ и $G_i = v_i \cdot \rho_i$ запишутся в виде системы (60).

$$\frac{dM_i}{dt} = G_{i-1} - G_i - \Delta G_{wi}, \quad i = \overline{1, m}, \quad (59)$$

$$\frac{d\rho_i}{dt} = \frac{1}{V_i} (G_{emi} - v_{emi} \rho_{emi} - \Delta G_{wi}), \quad i = \overline{1, m}. \quad (60)$$

Численные значения отдельных параметров системы (60) вычисляются в виде системы равенств (61)–(67).

$$V_i = v_{emi} \tau_{resi} = v_{emi} \cdot \frac{\tau_{res}^{SC}}{m}, v_{emi} = \frac{G_{emi}}{\rho_{emi}}, \quad (61)$$

$$G_{emi} = G_{emi-1} - \Delta G_{wi}, \quad (62)$$

$$\tau_{res}^{SC} = NN(G_{em}^{SC}, w_{em}^{SC}, T_{em}^{SC}, h), \quad (63)$$

$$\Delta G_{wi} = \Delta \Psi_{eff i} \cdot G_w^{SC}, \quad (64)$$

$$G_i^{WOil} = G_{emi-1} \cdot w_{emi-1} - \Delta G_{wi}, \quad (65)$$

$$w_i = \frac{G_i^{WOil}}{G_{emi}}, \quad (66)$$

$$\rho_{emi} = \frac{1}{\frac{w_{emi}}{\rho_w} + \frac{(1-w_{emi})}{\rho_{oil}}}, \quad i = \overline{1, m}. \quad (67)$$

Уравнения материального баланса по воде для i -х ячеек запишутся в виде системы уравнений

$$\frac{dM_{wi}}{dt} = G_{emi-1} \cdot w_{emi-1} - G_{emi} \cdot w_{emi} - \Delta G_{wi}, \quad i = \overline{1, m}. \quad (68)$$

где M_{wi} – масса воды, содержащейся в i -й ячейке, кг. С учетом соотношения $M_{wi} = V_{emi} \cdot \rho_{emi} \cdot w_{emi}$ последняя система уравнений запишется в виде

$$V_i \cdot \rho_{emi} \cdot \frac{dw_{emi}}{dt} + V_i \cdot w_{emi} \cdot \frac{d\rho_{emi}}{dt} = G_{emi-1} \cdot w_{emi-1} - G_{emi} \cdot w_{emi} - \Delta G_{wi}, \quad i = \overline{1, m}. \quad (69)$$

Из уравнения материального баланса по нефтяной фракции, расход которой не меняется по отдельным ячейкам, следуют равенства

$$G_{emi} = \frac{G_{emi-1} \cdot (1-w_{emi-1})}{(1-w_{emi})}, \quad i = \overline{1, m}. \quad (70)$$

Граничные условия рассматриваемой постановки соответствуют уравнениям (49)–(57), принятым при расчете статики. Система нелинейных дифференциальных и алгебраических уравнений (59)–(70) также может быть решена одним из численных методов с использованием программных средств MATLAB Simulink.

Постановка задачи расчета динамики процессов камеры выгрузки ТФС

Согласно конструкции ТФС и выбранной концепции моделирования, в камере выгрузки не происходят процессы, приводящие к изменению статического состояния данного объекта (плотности, влагосодержания, компонентного состава). Однако при изменении данных параметров во входном потоке в камере выгрузки также наблюдаются динамические процессы, которые и являются целью моделирования.

Отличие модели камеры выгрузки от ячеечной модели камеры осаждения состоит в том, что, поскольку в камере отсутствует обезвоживание, из модели исключаются члены, связанные с расходом воды из ячеек ΔG_{wi} . Второе отличие – модель камеры выгрузки состоит из одной единственной ячейки. Система уравнений динамики камеры выгрузки (71)–(74) имеет следующий вид. Уравнение общего материального баланса:

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{v_{em}}{V_{unl}} (\rho_{in} - \rho), \quad (71)$$

где $V_{unl} = v_{em} \cdot \tau_{unl}$, $v_{em} = \frac{G_{em}}{\rho}$, G_{em} – массовый расход

эмульсии через камеру выгрузки, кг/с; V_{unl} – объем камеры выгрузки, м³; τ_{unl} – среднее время пребывания в камере выгрузки, с; ρ_{in} , ρ – плотность эмульсии на входе в камеру выгрузки и выходе из неё, соответственно, кг/м³.

Уравнение материального баланса по воде записывается в виде

$$V_{unl} \cdot \rho \cdot \frac{dw}{dt} + V_{unl} \cdot w \cdot \frac{d\rho_{em}}{dt} = G_{em\ in} \cdot w_{em\ in} - G_{em} \cdot w, \quad (72)$$

где $w_{em\ in}$, w – влагосодержание эмульсии на входе в камеру выгрузки и выходе из неё, соответственно, отн. ед.

Из уравнения статики баланса по нефти вычисляется значение расхода эмульсии (73) для подстановки в (72).

$$G_{em} = \frac{G_{em\ in} \cdot (1 - w_{em\ in})}{(1 - w)} \quad (73)$$

Объем камеры выгрузки вычисляется в соответствии с зависимостью

$$V_{unl} = S_{unl} \cdot L_{unl}, \quad (74)$$

где S_{unl} – площадь поперечного сечения камеры выгрузки, заполненной эмульсией, м², вычисляется с использованием тригонометрических уравнений в зависимости от уровня в камере выгрузки h_{unl} и радиуса камеры, численно равного r^{SC} ; L_{unl} – длина камеры выгрузки, м.

Результаты моделирование ТФС средствами MATLAB Simulink

Модель ТФС включает три составляющие, соответствующие конструкции ТФС и сущности протекающих в нем процессов. В качестве математической модели камеры сепарации приняты уравнения статики газовой сепарации. Вторая составляющая – модели статики и динамики камеры осаждения (обезвоживания) дегазированной эмульсии, и третья составляющая – динамическая модель камеры выгрузки нефтяной эмульсии.

Номинальные технологические параметры приняты соответствующими процессам секции предварительного обезвоживания эмульсии УПН и включают: расход эмульсии на входе в ТФС $G_{em\ in}^{TPS} = 200$ т³/ч; влагосодержание водонефтяной эмульсии на входе в ТФС $w_{em\ in} = 60$ % мас.; температура эмульсии $T_{em} = 20$ °С; давление в камере сепарации избыточное $P = 0,65$ МПа; плотность воды при 20 °С $\rho_w^{20} = 998,2$ кг/м³. Приняты также следующие конструктивные характеристики трехфазного сепаратора: общая длина камеры осаждения $L^{SC} = 20$ м; длина камеры выгрузки $L^{unl} = 2$ м; радиус цилиндрической части ТФС $r^{TRS} = 1,7$ м; высота перегородки, отделяющей камеру осаждения от зоны выгрузки, $H = 2,3$ м. Для решения задачи также заданы следующие характеристики: величина

межфазового уровня $h = 1$ м; величина уровня эмульсии нефти в камере выгрузки $h_{unl} = 1,5$ м; количество ячеек модели камеры осаждения $m = 21$.

Средствами MATLAB Simulink сконфигурирована модельная ячеечная схема, способная рассчитывать составы ($y_i, x_i, i = \overline{1, n}$) и параметры газовой и жидкой фаз разделения исходной нефтегазовой эмульсии нефти в камере сепарации ТФС, вычислять расходы воды на выходе из ячеек и суммарные значения расходов воды, эмульсии и влагосодержания эмульсии на выходе камер осаждения и выгрузки в зависимости от изменяющихся входных параметров процесса в статическом и динамическом режимах.

Поскольку была поставлена задача построения общей динамической модели, способной осуществлять в едином цикле решение систем нескольких уравнений, из цикла исключены итерационные процедуры решения систем нелинейных уравнений камеры сепарации газа и уравнений статики обезвоживания. Указанные процедуры заменены на блоки безитерационных вычислений, реализуемых искусственными нейронными сетями (25) и (58), обученными на статистике, собранной в процессе предварительного автономного решения соответствующих систем уравнений. Также для удобства вычислений была построена статическая нейронная сеть (29) для расчета численных значений функции эффективности обезвоживания. Системы дифференциальных уравнений динамики ячеечной модели камеры обезвоживания решались в соответствии с внутренними итерационными алгоритмами, заложенными в программах MATLAB Simulink.

Возможности разработанной модели продемонстрируем путем задания численных значений входным переменным процесса с регистрацией выходных параметров, рассчитанных по модели. Первая серия испытаний, иллюстрируемая табл. 1–3 и рис. 7–10, касается статических исследований объекта моделирования. На рис. 7, 8 представлены графики зависимости выходных параметров ТФС в функции от изменения расхода эмульсии на входе ТФС.

Получены следующие расчетные параметры ТФС: $G_{em\ out} = 97,27$ т/ч; $w_{em\ out} = 20,1$ %; $G_w\ out = 97,02$ т/ч; $G_{oil\ out} = 74,3$ т/ч; $G_{gas\ out} = 5,702$ т/ч.

Согласно графику рис. 7, отражающему количество воды, осаждаемой в каждой ячейке камеры обезвоживания ТФС, эффективность работы отдельных ячеек зависит, в первую очередь, от положения ячейки по длине аппарата. Количество осаждаемой воды по ячейкам также зависит от формы функции эффективности обезвоживания. С максимальной отдачей функционируют ячейки в центральной области камеры осаждения. Это связано с принятым распределением значений функции эффективности обезвоживания по длине камеры осаждения и в каждой ячейке (рис. 4 при температуре эмульсии, равной 20 °С). При увеличении расхода эмульсии на входе ТФС точка максимального роста смещается к концу камеры осаждения, и концевые ячейки начинают функционировать с большей отдачей. Обратная зависимость также имеет место – при уменьшении расхода эмульсии с большей эффективностью функционируют начальные ячейки.

Таблица 1. Компонентный состав входной нефтегазовой смеси, отн. мол. доли

Table 1. Component composition of the input oil and gas mixture, rel. mole fractions

N ₂	CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	iC ₄ H ₁₀	nC ₄ H ₁₀	iC ₅ H ₁₂	n C ₅ H ₁₂	C ₆ H ₁₄	C ₇₊
0,01154	0,00656	0,44431	0,01572	0,03548	0,00960	0,02212	0,00766	0,01010	0,01216	0,42477

Таблица 2. Компонентный состав жидкой фазы на выходе трехфазного сепаратора, отн. мол. доли

Table 2. Component composition of the liquid phase at the three-phase separator outlet, rel. mole fractions

N ₂	CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	iC ₄ H ₁₀	nC ₄ H ₁₀	iC ₅ H ₁₂	n C ₅ H ₁₂	C ₆ H ₁₄	C ₇₊
0,00125	0,0038	0,02467	0,00583	0,03071	0,01463	0,0369	0,01404	0,01871	0,0232	0,8255

Таблица 3. Компонентный состав газовой фазы на выходе трехфазного сепаратора, отн. мол. доли

Table 3. Component composition of the gas phase at the three-phase separator outlet, rel. mole fractions

N ₂	CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	iC ₄ H ₁₀	nC ₄ H ₁₀	iC ₅ H ₁₂	n C ₅ H ₁₂	C ₆ H ₁₄	C ₇₊
0,02233	0,00926	0,8844	0,02609	0,04048	0,00432	0,00662	0,00097	0,00107	0,0005	0,00452

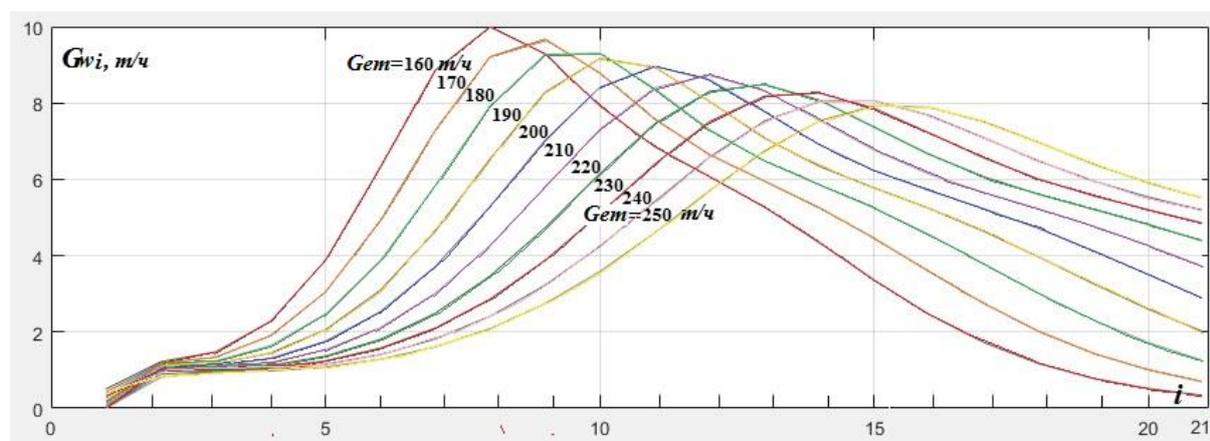


Рис. 7. Зависимости расхода воды на выходе ячеек от расхода эмульсии на входе в трехфазный сепаратор (160...250 м³/ч)

Fig. 7. Dependences of the water flow rate at the outlet of the cells on the emulsion flow rate at the inlet to the three-phase separator (160...250 t/h)

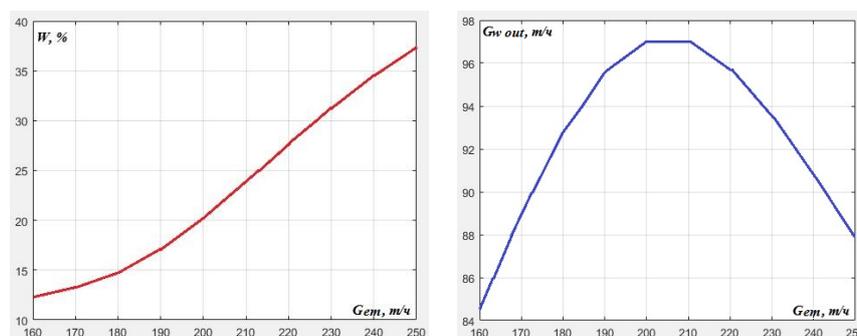


Рис. 8. Зависимости влагосодержания эмульсии нефти (слева) и расхода воды на выходе трехфазного сепаратора (справа) от расхода эмульсии на входе в трехфазный сепаратор (160...250 м³/ч)

Fig. 8. Dependences of the moisture content of the oil emulsion (left) and water flow rate at the three-phase separator outlet (right) on emulsion flow rate at the three-phase separator inlet (160...250 t/h)

Особый интерес представляет собой правый график рис. 8, иллюстрирующий зависимость общего расхода воды, выделившейся из ТФС, от входного расхода эмульсии, имеющий четкий максимум, наличие которого также имеет ясное логическое обоснование. При увеличении расхода эмульсии увеличивается и количество поступающей в ТФС воды, осаждаемой в ТФС, график стремится вверх. Но при этом среднее время

пребывания эмульсии в аппарате сокращается, частицы воды не успевают достичь нижней границы камеры осаждения (межфазового уровня), и скорость роста графика общего количества воды на выходе ТФС начинает уменьшаться. При значении расхода эмульсии на входе ТФС, равном 200–210 т/ч, скорость роста обращается в нуль, график приходит к максимуму, а при дальнейшем увеличении расхода эмульсии начи-

нает демонстрировать крутое падение, свидетельствующее о том, что при данных нагрузках эмульсия нефти в ТФС не успевает разделиться. О том же свидетельствует и левый график рис. 8 – влагосодержание эмульсии на выходе ТФС существенно увеличивается при больших нагрузках.

Рис. 9, 10 демонстрируют зависимости выходных параметров ТФС в функции от межфазового уровня, $h=0,8...1,25$ м. При уменьшении межфазового уровня общая эффективность процессов обезвоживания уве-

личивается, т.к. при этом увеличивается рабочий объем камеры обезвоживания, а, следовательно, и среднее время пребывания в ней частиц эмульсии нефти.

Принятая модель также позволяет рассчитать статические режимы распределения значений выходных параметров ТФС по длине камеры осаждения от иных входных параметров и возмущающих факторов ТФС – от влагосодержания эмульсии нефти, от температуры эмульсии и давления в камере сепарации газа ТФС (графики не приводятся).

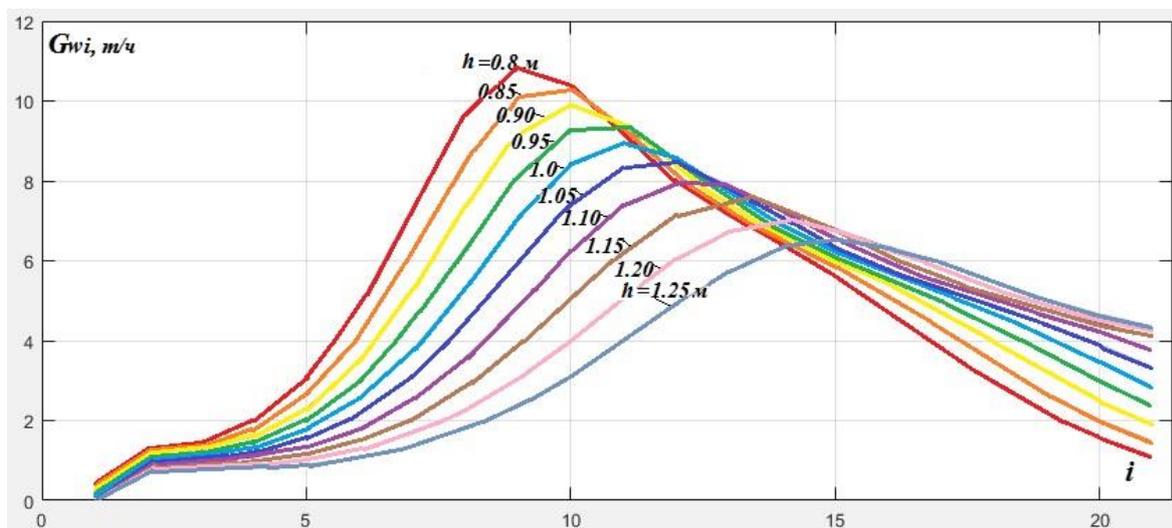


Рис. 9. Зависимости расхода воды на выходе ячеек от межфазового уровня трехфазного сепаратора (0,8...1,25 м)

Fig. 9. Dependences of the water flow rate at the cells outlet on the three-phase separator interphase level (0,8...1,25 m)

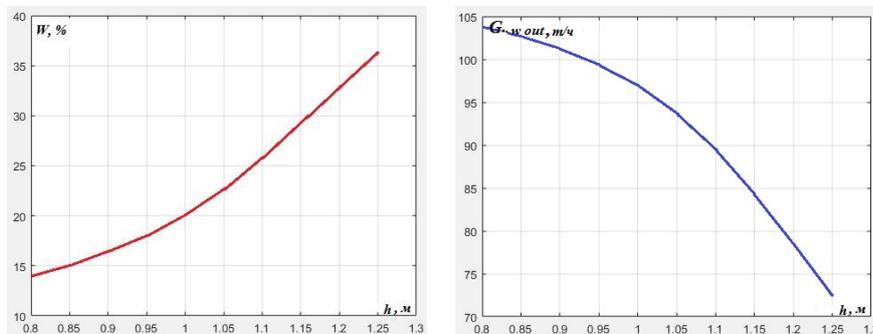


Рис. 10. Зависимости влагосодержания эмульсии (слева) и расхода воды (справа) на выходе трехфазного сепаратора от межфазового уровня (0,8...1,25 м)

Fig. 10. Dependences of the moisture content of the emulsion (left) and water flow (right) at the three-phase separator outlet on the interphase level (0,8...1,25 m)

Следующая серия графиков демонстрирует возможности модели по реализации динамических расчетов, т. е. расчета и построения зависимостей изменения выходных параметров процесса во времени в функции от возмущений, нанесенных по каналам входных переменных. Рис. 11 иллюстрирует вид графиков изменения выходных параметров процесса при ступенчатом изменении нагрузки по расходу эмульсии на входе в ТФС при значениях нагрузки $G_{em\ in}=200\pm30$ т/ч (слева) и $G_{em\ in}=250\pm30$ т/ч (справа). Отмечающаяся колебательность переходных характеристик (левые графики рис. 11) объясняется нелинейным характером принятой модели и наличием экстремума графика статиче-

ской характеристики (рис. 8) в зоне $G_{em\ in}=215\pm15$ т/ч. При удалении динамических характеристик от этой области в линейную зону более высоких нагрузок ($G_{em\ in}=265\pm15$ т/ч, правые графики рис. 11) эффект колебательности исчезает. На рис. 12 показаны переходные характеристики выходных параметров процесса при ступенчатом изменении межфазового уровня в ТФС при различных номинальных значениях нагрузки. На рис. 12 также отмечается колебательность переходных характеристик, более отчетливая в зоне нелинейности статических характеристик ТФС и исчезающая при смещении режима в зону линейности при повышенных нагрузках.

Модель динамики ТФС позволяет также рассчитать переходные процессы при ступенчатом изменении влагосодержания, температуры эмульсии на входе в ТФС и давления в камере сепарации газа (проведены вычисления, но результаты не показаны), что дает основание рассматривать модель в качестве ос-

новы для построения интеллектуальной системы управления, стабилизирующей влагосодержание эмульсии на выходе ТФС воздействием на межфазовый уровень при действии возмущений по нагрузке и качеству входной эмульсии нефти либо иным способом управления.

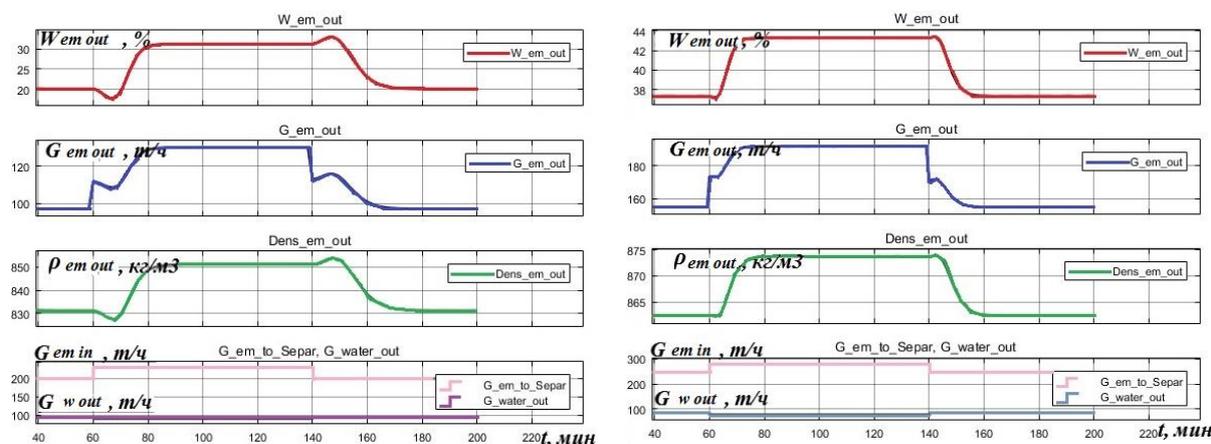


Рис. 11. Зависимости выходных параметров трехфазного сепаратора при ступенчатом изменении расхода эмульсии при различных значениях нагрузки 215 ± 15 м³/ч (слева) и 265 ± 15 м³/ч (справа)

Fig. 11. Dependences of the three-phase separator output parameters for a stepwise change in the emulsion flow rate at various load values 215 ± 15 t/h (left) and 265 ± 15 t/h (right)

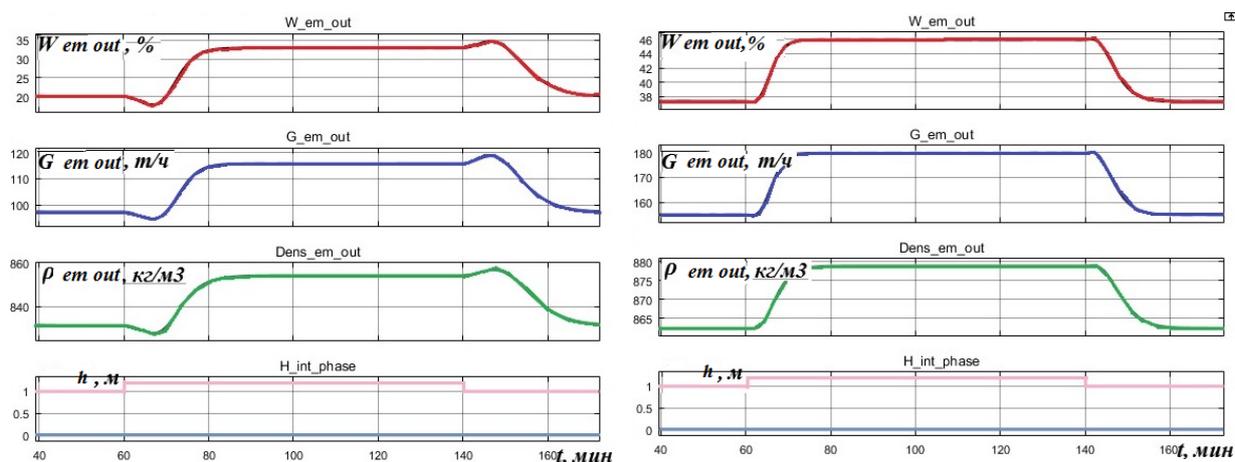


Рис. 12. Зависимости выходных параметров трехфазного сепаратора при ступенчатом изменении межфазового уровня $1,1 \pm 0,1$ м при значениях нагрузки 200 т/ч (слева) и 250 т/ч (справа)

Fig. 12. Dependences of the three-phase separator output parameters at a stepwise change in the interphase level of $1,1 \pm 0,1$ m at load values 200 t/h (left) and 250 t/h (right)

Заключение

В результате проведенных исследований:

1. Разработана комплексная модель трехфазного сепаратора, включающая три составляющие, соответствующие конструкции трехфазного сепаратора и сущности протекающих в нем процессов – модель статики камеры сепарации газа, модель статики и динамики секции обезвоживания и модель динамики секции выгрузки нефтяной эмульсии.
2. Сформулировано математическое описание процессов, присущих каждой секции трехфазного се-

паратора. Для решения в едином цикле общей задачи динамики трехфазного сепаратора, включающей несколько систем нелинейных алгебраических и дифференциальных уравнений, из цикла исключены локальные итерационные процедуры, свойственные численным методам решения систем нелинейных уравнений, и добавлены блоки искусственных нейронных сетей, обученных безитерационному решению нелинейных систем уравнений сепарации газа и обезвоживания нефтяной эмульсии. Произведена конфигурация модельных соотношений программными средствами MATLAB Simulink.

3. Получено решение задач статики и динамики трехфазного сепаратора для исходных данных, соответствующих режиму нормальной эксплуатации и конструкции промышленного трехфазного сепаратора отделения предварительного обезвоживания установки подготовки нефти. Решение проиллюстрировано графиками статических зависимостей выходных параметров трехфазного сепаратора – влагосодержания, расхода нефтяной эмульсии, от входных переменных – влагосодержания, расхода, температуры нефтяной эмуль-

сии – и от управляющей переменной – межфазового уровня, а также графиками переходных характеристик трехфазного сепаратора.

Полученные итоги математического моделирования трехфазного сепаратора, так же как ранее опубликованные автором результаты моделирования подогревателя эмульсии, позволяют рассматривать разработанные модели в качестве основы для построения усовершенствованной системы управления объектами установки подготовки нефти в составе интеллектуального нефтегазового месторождения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Redutskiy Yu. Conceptualization of smart solutions in oil and gas industry // *Procedia. Computer Science.* – 2017. – V. 109. – P. 745–753.
2. HaeOk Choi. «Oil is the new data»: energy technology innovation in digital oil fields // *Energies.* – 2020. – P. 1–13.
3. Hankins D., Salehi S., Fatemeh Karbalaei S. An integrated approach for drilling optimization using advanced drilling optimizer // *Journal of Petroleum Engineering.* – 2015. – V. 2015. – P. 1–12.
4. Analytical solution and simulation of oil deliverability analysis for reorientation hydraulic fracture in low-permeability reservoirs / Xinyu Qiu, Botao Kang, Pengcheng Liu, Shengye Hao, Yanglei Zhou, Ce Shan, Houfeng He, Liang Xu // *Hindawi Geofluids.* – 2021. – V. 2021. – P. 1–11.
5. Dynamic optimization of a continuous gas lift process using a mesh refining sequential method / L.S. Santos, K.M. Ferreira de Souza, M.R. Bandeira, V.R.R. Ahon, F.C. Peixoto, D.M. Prata // *Journal of Petroleum Science and Engineering.* – 2018. – V. 165. – P. 161–170.
6. Optimization of smart wells in the St. Joseph Field / G.M. Van Essen, J.D. Jansen, D.R. Brouwer, S.G. Douma, M.J. Zandvliet, K.I. Rollett, D.P. Harris // *SPE Reservoir Evaluation and Engineering.* – 2010. – V. 13 (04). – P. 588–595.
7. Веревкин А.П., Муртазин Т.М., Насибуллин Ф.Г. Модернизация систем управления и обеспечения безопасности как инструмент повышения эффективности процессов переработки нефти и газа // *Территория «НЕФТЕГАЗ».* – 2019. – № 10. – С. 12–17.
8. Развитие перспективной автоматизации в нефтегазовой отрасли / Е.И. Громаков, Т.Е. Мамонова, А.В. Лиепиниш, А.В. Рымшин // *Нефтяное хозяйство.* – 2019. – № 10. – С. 98–102.
9. The implementation of industry 4.0 in oil and gas // January 13, 2021. URL: <https://www.gep.com/blog/mind/the-implementation-of-industry-4-0-in-oil-and-gas> (дата обращения 05.08.2021).
10. Бэккер В.Ф. Моделирование химико-технологических объектов управления. 2-е изд. перераб. и доп. – М.: РИОР: ИНФРА-М, 2014. – 142 с.
11. Levenspiel O. *Chemical Reaction engineering.* 3rd redaction. – Corvallis: Department of Chemical Engineering Oregon State University, 1999. – 665 p.
12. Faruntsev S. Method for creation of cell models as a universal tool for the development of mathematical models of dynamics used to perform smart control of oil production facilities // *IOP Conf. Series: Journal of Physics.* – 2020. – V. 1546. – P. 1–13.
13. Фарунцев С.Д. Разработка и режимная настройка референсной модели подогревателя нефтяной эмульсии для построения системы интеллектуального управления // *Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства: Материалы 11-й Международной научно-технической конференции.* – Омск: Омский государственный технический университет, 2021. – С. 203–205.
14. Фарунцев С.Д. Разработка комплекса систем управления подогревателями нефтяной эмульсии на основе референсной модели и искусственной нейронной сети // *Автоматизация в промышленности.* – 2021. – № 3. – С. 12–22.
15. Метод Д.Л. Каца в решении нефтепромысловых задач / И.З. Денисламов, Ш.А. Гафаров, К.И. Идрисов, А.И. Денисламова // *Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов.* – 2020. – № 1. – С. 55–71.
16. Технологические основы и моделирование процессов промысловой подготовки нефти и газа / А.В. Кравцов, Н.В. Ушева, Е.В. Бешагина, О.Е. Мойзес, Е.А. Кузьменко, А.А. Гавриков. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 128 с.
17. Математическое моделирование химико-технологических процессов / Н.В. Ушева, О.Е. Мойзес, О.Е. Митянина, Е.А. Кузьменко. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 135 с.
18. Сваровская Н.А. Подготовка, транспорт и хранение скважинной продукции: учебное пособие. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2004. – 268 с.
19. Каталог продукции АО САРПЗ. URL: https://sartz.ru/produkcija/separatory_otstojniki/gazovye_separatory.html (дата обращения 05.08.2021).
20. Грохотова Е.В., Мухина Н.М., Сидоров Г.М. Исследование способов обезвоживания нефти Калининградской области // *Сетевое издание «Нефтегазовое дело».* – 2019. – № 3. – С. 251–267.
21. Особенности формирования и разрушения водонефтяных эмульсий на поздней стадии разработки нефтяных месторождений / Р.З. Сахабутдинов, Ф.Р. Губайдулин, И.Х. Исмагилов, Т.Ф. Космачева. – М.: ОАО ВНИИЦЭНГ, 2005. – 324 с.
22. Beale M.H., Hagan M.T., Demuth H.B. *MatLab Neural Network Toolbox: User's Guide.* R2018a. – Natick, MathWorks Inc. Publ., 2018. – 558 p.

Поступила 13.10.2021 г.

Информация об авторах

Фарунцев С.Д., кандидат технических наук, доцент, Омский государственный технический университет.

UDC 681.5

EXPERIENCE IN APPLICATION OF MATHEMATICAL MODELING METHODS FOR ELABORATION OF INTEGRATED CONTROL MODELS OF FIELD TREATMENT FACILITIES

Sergey D. Faruntsev,
sdfar52@gmail.com

Omsk State Technical University,
11, Mira avenue, Omsk, 644050, Russia.

The relevance of the study is caused by the significantly increased requirements for control systems for surface facilities of oil and gas fields. The control systems should ensure the safe conduct of processes while maintaining the specified quality of commercial oil in the presence of an intense background of disturbances, the ability of long-term autonomous functioning with minimal impact from operating personnel, minimization of the risks of negative impact of production factors on the environment, etc. A prerequisite for meeting the above requirements and a way to increase the level of intellectualization of control systems for oil and gas treatment facilities is the development of improved control systems using methods of mathematical modeling, automatic control theory and information technologies.

The goal of the research is to develop an integrated mathematical model for building an intelligent control system for processes occurring in one of the main devices of an oil treatment plant – a three-phase separator.

The object of the research is a three-phase separator, which includes sections for degassing, dehydration and unloading of oil emulsion.

Methods: Katz's method for calculating the component composition of the gas and liquid phases of a separating oil emulsion, material and molar balances, methods for the numerical solution of nonlinear equation systems, configuration and training of artificial neural networks MATLAB (NFTool, NNTool), principles of cell modeling, block modeling using MATLAB Simulink software.

Results. The author has developed a complex mathematical control model that describes the statics and dynamics of processes occurring in each section of a three-phase separator. To identify the real process of emulsion dehydration, the intensity function – the analogue of the laboratory sedimentation curve, was proposed. The structure of the separator cell model is parametrically related to the intensity function. To solve a general problem of dynamics in a single cycle, which includes several systems of nonlinear equations, local iterative procedures are excluded from the cycle. Blocks of artificial neural networks trained for iterative solution of local nonlinear systems are added. The model was configured using the MATLAB Simulink software. A solution is obtained, illustrated by graphs of static dependencies and transient characteristics of a three-phase separator in terms of its main input parameters.

Conclusion. The obtained results of mathematical modeling of a three-phase separator, as well as the results of modeling an oil emulsion heater previously published by the author, allow us to consider the developed models as a basis for building an improved control system for oil treatment facilities in an intelligent oil and gas field.

Key words:

Intelligent oil and gas field, oil treatment plant, complex mathematical model of statics and dynamics, advanced control system, three-phase separator, artificial neural network, MATLAB Simulink.

REFERENCES

- Redutskiy Yu. Conceptualization of smart solutions in oil and gas industry. *Procedia. Computer Science*, 2017, vol. 109, pp. 745–753.
- Haeok Choi. «Oil is the new data»: energy technology innovation in digital oil fields. *Energies*, 2020, pp. 1–13.
- Hankins D., Salehi S., Fatemeh Karbalaei S. An integrated approach for drilling optimization using advanced drilling optimizer. *Journal of Petroleum Engineering*, 2015, vol. 2015, pp. 1–12.
- Xinyu Qiu, Botao Kang, Pengcheng Liu, Shengye Hao, Yanglei Zhou, Ce Shan, Houfeng He, Liang Xu. Analytical solution and simulation of oil deliverability analysis for reorientation hydraulic fracture in low-permeability reservoirs. *Hindawi Geofluids*, 2021, vol. 2021, pp. 1–11.
- Santos L.S., Ferreira de Souza K.M., Bandeira M.R., Ahon V.R.R., Peyxoto F.C., Prata D.M. Dynamic optimization of a continuous gas lift process using a mesh refining sequential method. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, vol. 165, pp. 161–170.
- Van Essen G.M., Jansen J.D., Brouwer D.R., Douma S.G., Zandvliet M.J., Rollett K.I., Harris D.P. Optimization of smart wells in the St. Joseph Field. *SPE Reservoir Evaluation and Engineering*, 2010, vol. 13 (04), pp. 588–595.
- Verevkin A.P., Murtazin T.M., Nasibullin F.G. Modernizatsiya system upravleniya i obespecheniya bezopasnosti kak instrument povysheniya effektivnosti protsessov pererabotki nefiti i gaza [Modernization of control and safety systems as a tool to increase the efficiency of oil and gas refining processes]. *Territiria «NEFTEGAZ»*, 2019, no. 10, pp. 12–17.
- Gromakov E.I., Mamonova T.E., Liepinish A.V., Rimshin A.V. Razvitie perspektivnoy avtomatizatsii v neftegazovoy otrasli [Development of promising automation in the oil and gas industry]. *Neftyanoe hozyaystvo*, 2019, no. 10, pp. 98–102.
- The implementation of industry 4.0 in oil and gas. January 13, 2021. Available at: <https://www.gep.com/blog/mind/the-implementation-of-industry-4-0-in-oil-and-gas> (accessed 05 August 2021).
- Bekker V.F. *Modelirovanie khimiko-tekhnologicheskikh obektov upravleniya* [Modeling of chemical-technological control objects]. 2nd ed. revised and add. Moscow, RIOR: INFRA-M Publ., 2014. 142 p.
- Levenspiel O. *Chemical reaction engineering*. 3rd redaction. Corvallis, Department of Chemical Engineering Oregon State University, 1999. 665 p.
- Faruntsev S. Method for creation of cell models as a universal tool for the development of mathematical models of dynamics used to perform smart control of oil production facilities. *IOP Conf. Series: Journal of Physics*, 2020, vol. 1546, pp. 1–13.
- Faruntsev S.D. Razrabotka i rezhimnaya nastroyka referensnoy modeli podogrevatelya neftyanoy emulsii dlya postroeniya sistemi intellektualnogo upravleniya [Development and adjustment of a reference model of an oil emulsion heater for building an intelligent control system]. *Tekhnika i tekhnologiya neftekhimicheskogo i neftegazovogo proizvodstva. Materialy 11-y Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Technique and technology of petrochemical and oil and gas production. Materials of the 11th International Scientific and Technical Conference]. Omsk, Omsk State Technical University Publ., 2021. pp. 203–205.

14. Faruntsev S.D. Razrabotka kompleksa sistem upravleniya podogrevatelya neftyanoy emulsii na osnove referentsnoy modeli i iskusstvennoy neyronnoy seti [Development of a complex of control systems for oil emulsion heaters based on a reference model and an artificial neural network]. *Avtomatizatsiya v promishlennosti*, 2021, no. 3, pp. 12–22.
15. Denislamov I.Z., Gafarov Sh.A., Idrisov K.I., Denislamova A.I. Metod D.L. Katza v reshenii neftepromislovykh zadach [D.L. Katz method in solving oilfield problems]. *Problemy sbora, pogotovki i transporta nefi i nefteproduktov*, 2020, no. 1, pp. 55–71.
16. Kravtsov A.V., Usheva N.V., Beshagina E.V., Moyzes O.E., Kuzmenko E.A., Gavrikov A.A. *Tekhnologicheskie osnovy i modelirovanie protsessov promislovy podgotovki nefi i gaza* [Technological foundations and modeling of oil and gas field treatment processes]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ., 2012. 128 p.
17. Usheva N.V., Moyzes O.E., Mityanina O.E., Kuzmenko E.A. *Matematicheskoe modelirovanie khimiko-tehnologicheskikh protsessov* [Mathematical modeling of chemical technological processes]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ., 2014. 135 p.
18. Svarovskaya N.A. *Podgotovka, transport i khranenie skvazhinnoy produktii* [Preparation, transportation and storage of well products]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ., 2004. 268 p.
19. *Product catalog of JSC SARRZ*. Available at: https://sarrz.ru/produkcija/separatory_otstojniki/gazovye_separatory.html (accessed 05 August 2021).
20. Grokhotova E.V., Mukhina N.M., Sidorov G.M. Research of oil dehydration methods in the Kaliningrad region. *Network publication «Oil and Gas Business»* 2019, no. 3, pp. 251–267. In Rus.
21. Sakhabutdinov R.Z., Gubaydulin F.R., Ismagilov I.H., Kosmacheva T.F. *Osobennosti formirovaniya i razrusheniya vodonefityanykh emusiy na pozdney stadii razrabotki nefityanykh mestorozhdeniy* [Features of the formation and destruction of oil-water emulsions at the late stage of oil field development]. Moscow, OJSC VNIISHCHENG Publ., 2005. 324 p.
22. Beale M.H., Hagan M.T., Demuth H.B. *MatLab Neural Network Toolbox. User's Guide*. R2018a. Natick, MathWorks Inc. Publ., 2018. 558 p.

Received: 13 October 2021.

Information about the authors

Sergey D. Faruntsev, Cand. Sc., associate professor, Omsk State Technical University.

УДК 550.42:504.455:551.583.1

СЕЗОННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ СЕДИМЕНТАЦИОННЫХ ПОТОКОВ В СОЛЕНОМ МЕРОМИКТИЧЕСКОМ ОЗЕРЕ ШИРА (ХАКАСИЯ)

Бабич Валерий Васильевич¹,
vbabich@igm.nsc.ru

Дарьин Андрей Викторович¹,
avd@igm.nsc.ru

Калугин Иван Александрович¹,
ikalugin@igm.nsc.ru

Маркович Татьяна Ивановна¹,
mark@igm.nsc.ru

Зыков Виктор Владимирович²,
rogozin@ibp.ru

Рогозин Денис Юрьевич²,
rogozin@ibp.ru

¹ Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН,
Россия, 360090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3.

² Институт биофизики СО РАН,
Россия, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50.

Актуальность работы обусловлена необходимостью изучения сезонных вариаций объема и состава седиментационных потоков в современных озерах и их связи с погодно-климатическими факторами, что может послужить основой для реконструкции климатических изменений в прошлом.

Цель: на основе обобщения и анализа результатов многолетнего ежесезонного мониторинга материала седиментационных ловушек, инкубируемых в озере, оценить сезонные изменения массы, скорости и химического состава поступающего в оз. Шира осадочного материала.

Объектом исследования являлось бессточное слабосоленое меромиктическое озеро Шира, расположенное в степной межгорной впадине на территории республики Хакасия.

Методы: многолетний ежесезонный мониторинг осадочного материала, формирующего донные отложения, с использованием седиментационных ловушек, инкубируемых в озере; исследование полученного материала на широкий спектр параметров (биологические, гидрохимические, литолого-геохимические, гранулометрические и др.) различными общепринятыми методами в том числе методом рентгенофлуоресцентного микроанализа на пучках синхротронного излучения (РФА-СИ), адаптированного для исследования образцов донных отложений; компьютерный статистический анализ полученных данных (метод множественной регрессии, кросскорреляционный анализ и др.) с целью выявления связи массы и химического состава осаждающегося материала от региональных температур.

Результаты. На основе исследования количества и элементного состава осадочного материала сезонных донных ловушек озера Шира, собранного в 2012–2017 гг., сформулирована динамическая модель сезонного поступления седиментационных потоков в озерах подобного ландшафтно-геохимического типа. Установлено, что наиболее интенсивное осаждение материала происходит в летне-осенний период, в меньшей мере – в зимне-весенний. При этом весной преобладает аккумуляция аллохтонного (терригенного) алевроитового материала, поступающего с паводковыми водами, в летне-осенний период одновременно с осаждением кластогенного пелитового материала в осадках накапливаются в больших количествах биогенный и хемогенный материалы. В зимний период кластогенные и биогенные процессы осадконакопления практически прекращаются, наблюдается лишь хемогенное осаждение карбонатов. Установлено, что осаждение основной массы аллохтонного материала, попадающего в водоём, происходит на протяжении двух–трех месяцев, что свидетельствует об определённой инертности седиментационных процессов. Показано наличие устойчивой связи массы и химического состава поступающего в озеро терригенного материала с региональной температурой приповерхностного воздуха, являющегося одним из главных регуляторов водного баланса водоёма.

Ключевые слова:

Донные отложения, седиментационные ловушки, солёные озёра, микро-РФА, синхротронное излучение, регрессионный анализ.

Введение

Изучение динамики климата и состояния природных экосистем в прошлом и настоящем дает фундаментальную основу для прогноза будущих климатических изменений и их влияния на окружающую среду. Многие особенности климатически-обусловленных

процессов не антропогенного характера, необходимые при прогнозировании, могут быть выявлены только с помощью расшифровки природных «архивов», какими являются донные отложения водоёмов.

Озёра, особенно бессточные, чутко реагируют на погодно-климатические вариации в конкретном реги-

оне, а донные отложения являются богатейшим архивом изменений параметров окружающей среды, контролирующих процесс седиментации.

Исследуя озёрные осадки на широкий спектр параметров (биологические, гидрохимические, литолого-геохимические, гранулометрические и др.) можно ставить и решать самые разнообразные задачи: строить палеорекострукции различных климатических факторов, выявлять хронологию вариации уровня водоемов, изменения солёности озера и его стратификации, оценивать степень антропогенного влияния на экосистемы и т. д. [1–6 и др.].

Особую ценность в этом плане представляют солёные меромиктические водоемы, к числу которых относится оз. Шира. В подобных системах сочетание анаэробных условий в придонных горизонтах водной толщи с отсутствием гидроциркуляции (течений, перемешиваний) способствует образованию годичных слоёв (варв) донных отложений в строгой хронологической последовательности [7]. Данное обстоятельство – сохранение ненарушенной тонкой структуры осадка, является ключевым моментом при изучении не только межгодовых, но и межсезонных изменений условий осадконакопления. Таким образом, донные тонко стратифицированные отложения таких озёр являются репрезентативным материалом для палеоклиматических и палеолимнологических реконструкций различных природно-климатических показателей [5, 8–14 и др.].

Однако для интерпретации результатов реконструкций и более глубокого понимания процессов осадкообразования требуется информация о современных сезонных вариациях состава седиментационных потоков, их связи с погодно-климатическими факторами, а также с гидрологическими, физико-химическими и биологическими характеристиками изучаемой экосистемы. Эта информация может быть получена прямыми наблюдениями процессов осадконакопления *in situ* с помощью седиментационных ловушек.

В последние годы меромиктическое озеро Шира является объектом комплексного научного исследо-

вания. Анализ кернов донных отложений на основе биологических и геохимических индикаторов позволил выявить изменения режима циркуляции водной толщи [15]. Построена физико-химическая модель минералообразования в данной системе [16]. По спорово-пыльцевому составу керна выявлены климатически-обусловленные изменения наземного растительного покрова [17]. Проведена реконструкция динамики уровня воды на основе изменения элементного состава донных отложений [18]. Однако до настоящего времени в литературе отсутствует информация о закономерностях процесса осадконакопления при смене сезонов в течение года, остаются неясными факторы окружающей среды, контролирующие качественный и количественный состав осадка.

Цель настоящей работы – на основе обобщения и анализа результатов многолетнего ежесезонного мониторинга материала седиментационных ловушек, инкубируемых в озере, выявить зависимость характерных особенностей (массы, элементного состава и др.) седиментационных потоков в оз. Шира от погодных факторов, в первую очередь от температуры приповерхностного воздуха, и сформулировать сезонную динамическую модель поступления осадочного материала в водоём.

Объект исследования, пробоотбор, пробоподготовка

Объектом исследования являлось бессточное слабосолёное меромиктическое озеро Шира, расположенное в степной межгорной впадине на территории республики Хакасия. Площадь водного зеркала озера составляет 35 км² при максимальной глубине 24 м. Длина озера с северо-запада на юго-восток – 9,5 км, наибольшая ширина – 5,3 км.

Пробоотбор осаждающегося на дно озера материала проводился с помощью донных седиментационных ловушек на базе научно-исследовательского стационара на озере Шира. Ловушки устанавливались в наиболее глубоком месте озера (глубина 24 м) в период с марта 2012 г. по октябрь 2017 г. Информация о длительности экспозиции аккумуляции осадка в ловушках представлена в табл. 1.

Таблица 1. Информация о времени установки и снятия донных ловушек

Table 1. Information on the time of installation and removal of bottom traps

Порядковый номер ловушки Trap serial number	Дата постановки Trap installation date	Дата выемки Trap removal date
1	14 марта/March 2012	26 мая/May 2012
2	27 мая/May 2012	7 июля/July 2012
3	8 июля/July 2012	4 сентября/September 2012
4	4 сентября/September 2012	24 октября/October 2012
5	16 марта/March 2013	31 мая/May 2013
6	31 мая/May 2013	8 июля/July 2013
7	10 июля/July 2013	3 сентября/September 2013
8	4 сентября/September 2013	23 октября/October 2013
9	13 марта/March 2014	26 мая/May 2014
10	28 мая/May 2014	9 июля/July 2014
11	10 марта/March 2016	25 мая/May 2016
12	25 мая/May 2016	3 августа/August 2016
13	6 августа/August 2016	16 октября/October 2016
14	11 марта/March 2017	27 мая/May 2017
15	4 августа/August 2017	24 октября/October 2017

Подготовка полученного с помощью ловушек материала для аналитических исследований проводилась по следующей схеме. Содержимое ловушки тщательно перемешивалось и после полного отстаивания методом декантации свободный объем жидкой фазы отделялся от осадка. Остаток воды из влажного осадка удалялся методом лиофильной сушки с предварительным замораживанием суспензии жидким азотом. Масса испарившейся воды рассчитывалась по разности веса влажного и сухого осадка. Получаемый таким образом сухой остаток включает в себя как терригенный материал, так и солевую компоненту, образующуюся при дистиллировании озерной воды. Для определения соотношения количества соли и терригенного седиментационного материала в сухих остатках проб были проведены дополнительные исследования по определению солености озерной воды в каждой ловушке. Для этой цели в отдельные пробирки были отобраны аликвоты жидкой фазы по 10 мл. Пробы выдерживались в сушильном шкафу при 90 °С до полного высыхания (сутки) и взвешивались. Параллельно проводилось измерение плотности озерной воды во всех пробах.

Содержание спектра химических элементов в твердой фазе материала ловушки и солевой составляющей озерной воды определялось методом рентгенофлуоресцентного микроанализа на пучках синхротронного излучения (РФА-СИ), адаптированного для исследования образцов донных осадков. Проведён-

ные исследования послужили исходной информационной базой для всех последующих расчётов.

Оценка массы сезонных седиментационных потоков

Донные ловушки по временной привязке их экспозиций были разделены на три группы: «весна» (март–май, №№ 1, 5, 9, 11, 14), «лето» (июнь–август, №№ 2, 3, 6, 7, 10, 12) и «осень» (сентябрь–ноябрь, №№ 4, 8, 13, 15). Поскольку установка и снятие ловушек в период с января по февраль сопряжены с большими техническими трудностями, зимний сезон в рамках выбранной схемы мониторинга не рассматривался. Информация о динамике осадконакопления в этот период реконструировалась по косвенным и литературным данным.

Предварительно для каждой ловушки рассчитывалось количество твёрдого вещества (солевой и коллоидной составляющих), образующегося при испарении 1 г воды:

$$K = m_{\text{соль}} / (10 \times \rho - m_{\text{соль}}),$$

где $m_{\text{соль}}$ – масса сухого остатка после высушивания 10 мл аликвоты (г); ρ – плотность озерной воды из ловушки (г/л). Окончательный расчёт массы осадка бессолевой фазы, попавшего в ловушку за период её экспозиции, производился по формуле:

$$m_{\text{осадка}} = m_{\text{сух}} - K \times (m_{\text{сух}} - m_{\text{сух}}),$$

где $m_{\text{сух}}$ – вес суспензии (г); $m_{\text{сух}}$ – вес сухого остатка после лиофильной сушки (г). Результаты произведённых расчётов сведены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты расчёта массы осаждающегося материала с указанием исходных расчётных параметров
Table 2. Results of calculating the mass of the deposited material, indicating the initial design parameters

Порядковый номер ловушки Trap serial number	Сезон Season	Экспозиция (сутки) Exposition (day)	$m_{\text{сух}}$, г $m_{\text{сух}}$, g	$m_{\text{сух}}$, г $m_{\text{сух}}$, g	K	$m_{\text{осадка}}$, г $m_{\text{осадка}}$, g
1	Весна/Spring	74	5,703	0,205	0,01626	0,1168
2	Лето/Summer	41	9,085	0,308	0,02062	0,1296
3	Лето/Summer	58	9,669	0,290	0,01678	0,1349
4	Осень/Autumn	50	7,616	0,384	0,01636	0,2674
5	Весна/Spring	76	3,369	0,120	0,01958	0,0573
6	Лето/Summer	39	5,602	0,194	0,01926	0,0914
7	Лето/Summer	55	6,448	0,271	0,01843	0,1588
8	Осень/Autumn	49	10,261	0,309	0,01937	0,1192
9	Весна/Spring	74	6,136	0,247	0,01864	0,1385
10	Лето/Summer	41	6,658	0,268	0,01771	0,1563
11	Весна/Spring	76	4,347	0,175	0,01823	0,0100
12	Лето/Summer	70	11,502	0,463	0,01678	0,2610
13	Осень/Autumn	71	8,148	0,328	0,01440	0,2168
14	Весна/Spring	77	5,514	0,222	0,01771	0,1295
15	Осень/Autumn	81	11,654	0,469	0,01471	0,3066

Средняя масса осадка, накопившегося в ловушках за время их экспозиции (три месяца), составляет: в весенний период – 0,1294 г, в летний период – 0,2759 г, в осенний период – 0,3263 г. Скорости накопления осадка, рассчитанные с учётом площади дна ловушки (115 см²), составляют: в весенний период – 0,0011 г/см², в летний – 0,0024 г/см², в осенний – 0,0028 г/см².

Таким образом, выявляются очевидные межсезонные отличия в скоростях седиментационных потоков. Наиболее интенсивно процесс осадконакопления происходит в летне-осенний период, в меньшей мере – весной. По указанной ранее причине подобных данных по зимнему периоду мы не имеем, однако, поскольку с ноября по март оз. Шира находится подо-

льдом и поступление терригенного материала в него крайне ограничено, можно предположить, что зимой процесс седиментации существенно замедляется, и масса выпадающего осадка в этот период минимальна.

Сезонные вариации химического состава осаждающегося материала

Согласно методике пробоподготовки сухой остаток из донной ловушки кроме твёрдого терригенного материала содержит также солевую компоненту, искажающую результаты аналитических исследований. Для вычета вклада солевой составляющей в содержание химических элементов в твердой фазе материала были проанализированы сухие остатки выпаривания

озёрной воды из каждой ловушки. Химический состав твёрдого осадка бессолевой фазы определялся по формуле:

$$C_{\text{эл,ос}} = [C_{\text{эл,сух}} \times m_{\text{сух}} - C_{\text{эл,солев}} \times K \times (m_{\text{суе}} - m_{\text{сух}})] / [m_{\text{сух}} - K \times (m_{\text{суе}} - m_{\text{сух}})],$$

где $m_{\text{суе}}$ – вес суспензии; $m_{\text{сух}}$ – вес сухого остатка; $C_{\text{эл,сух}}$ – концентрация элемента в сухом остатке; K – количество твёрдой солевой фазы, образующейся при испарении 1 г озёрной воды; $C_{\text{эл,солев}}$ – концентрация элемента в растворимой и коллоидной фазах (табл. 3).

Таблица 3. Химический состав осадка донных ловушек оз. Ши́ра без солевой и коллоидной фаз (в ppm)

Table 3. Chemical composition of the sediment of bottom traps of the lake Shira of saltless and colloidal phases (in ppm)

Порядковый номер ловушки Trap serial number	S	Cl	K	Ca	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu
1	175903	137217	27998,9	146296	6696,4	273,8	128,4	1117,5	71420,4	55,2	127,1
2	254797	170953	28486,7	126807	7523,3	438,1	96,4	1202,8	67386,0	73,3	192,6
3	443146	317009	48134,6	235788	7969,5	211,2	90,1	1246,8	56733,0	41,2	61,9
4	119316	92934	42266,0	433883	6636,7	394,1	86,9	1895,6	68946,3	58,5	57,6
5	181761	142049	33609,8	180327	7892,6	432,6	118,9	1487,4	82526,1	79,7	151,2
6	201687	129137	35633,1	172950	7732,3	350,4	61,0	1572,3	80156,5	54,4	113,6
7	226105	155439	41598,0	197945	6998,2	283,7	91,7	1254,4	59437,6	25,7	69,7
8	120345	86890	18654,2	138715	4192,5	185,7	77,3	1224,1	51977,0	27,2	46,0
9	137225	100511	22374,9	131418	6173,1	204,9	95,7	1099,1	61427,8	45,0	78,3
10	157166	107439	24053,8	115192	5092,7	272,5	27,2	959,9	53908,1	52,2	89,7
11	156364	106216	17745,1	86940	4302,9	240,4	116,3	722,5	55138,7	43,3	100,8
12	196025	127199	18257,8	87015	4074,9	266,5	19,6	689,2	40554,8	36,2	61,5
13	254678	168846	22988,6	127375	3992,3	314,5	46,9	706,2	36522,1	31,1	44,9
14	176167	117411	21416,3	121536	4921,7	170,7	102,8	958,8	67438,6	56,0	79,8
15	272636	124723	20486,5	123102	3613,6	157,6	20,6	789,5	40233,6	23,2	29,7
Порядковый номер ловушки Trap serial number	Zn	Ga	As	Br	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	
1	428,1	12,4	48,5	882,5	49,9	1029,1	17,5	104,1	7,7	10,6	
2	696,1	18,8	40,9	1199,6	52,7	1254,3	12,6	113,9	5,6	7,9	
3	219,2	6,8	39,7	981,7	23,2	1137,6	8,1	54,0	2,2	5,1	
4	172,3	18,3	17,6	535,0	52,7	2169,6	13,9	82,4	5,2	2,9	
5	290,1	16,7	51,3	869,1	57,6	1277,8	18,8	100,5	6,7	7,2	
6	221,9	24,8	45,8	1049,1	71,9	1475,3	19,4	118,0	8,3	5,7	
7	141,2	9,8	21,7	584,8	29,0	999,8	7,8	54,3	3,3	10,0	
8	159,8	15,7	33,7	1373,7	40,3	1906,9	11,2	72,5	4,4	15,0	
9	224,0	15,1	44,2	845,1	45,2	1122,1	17,0	139,2	5,5	3,2	
10	801,1	12,2	30,7	921,2	53,7	1211,5	11,3	77,0	5,2	12,8	
11	347,1	15,1	49,0	1274,4	37,4	1226,1	13,7	102,0	4,1	3,8	
12	133,8	12,0	26,5	1005,2	34,2	1100,1	7,1	55,7	3,6	4,0	
13	100,7	8,1	24,5	852,0	22,6	1014,3	5,6	35,1	1,6	6,8	
14	211,0	13,8	43,0	1140,8	46,6	1069,3	12,4	101,7	6,1	4,2	
15	105,8	10,9	32,7	881,0	25,7	1169,7	5,8	44,4	2,5	9,0	

Сравнительный анализ усредненных нормализованных по минимаксной методике концентраций элементов в донных осадках озера Ши́ра показал, что седиментационный материал разных сезонов отличается по своему химическому составу (табл. 4). Весенние порции осаждающегося материала обладают повышенными концентрациями As, Cr, Y, Zr, Fe, Nb, Ni,

Rb, Cu; летние обогащены Ti, V, K; S, Zn, Cl; осенние – Sr, Mo и Ca (рис. 1).

Таким образом, проведенные исследования позволили выявить сезонные особенности процесса осадконакопления, выражающиеся в различии массы осаждающегося седиментационного материала, а также его химического состава.

Таблица 4. Усреднённые нормализованные по минимаксной методике сезонные концентрации элементов в донных осадках оз. Ши́ра

Table 4. Average seasonal concentrations of elements in bottom sediments of Lake Shira

Сезон Season	Элементы Elements										
	S	Cl	K	Ca	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu
Весна/Spring	0,142	0,147	0,226	0,133	0,547	0,381	0,877	0,322	0,675	0,577	0,477
Лето/Summer	0,393	0,352	0,492	0,199	0,678	0,521	0,508	0,385	0,504	0,424	0,420
Осень/Autumn	0,224	0,137	0,275	0,343	0,228	0,376	0,306	0,385	0,280	0,207	0,091
	Zn	Ga	As	Br	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	
Весна/Spring	0,285	0,435	0,878	0,557	0,502	0,124	0,743	0,715	0,664	0,241	
Лето/Summer	0,383	0,407	0,493	0,503	0,437	0,168	0,395	0,420	0,467	0,387	
Осень/Autumn	0,048	0,359	0,282	0,448	0,259	0,483	0,255	0,226	0,275	0,455	

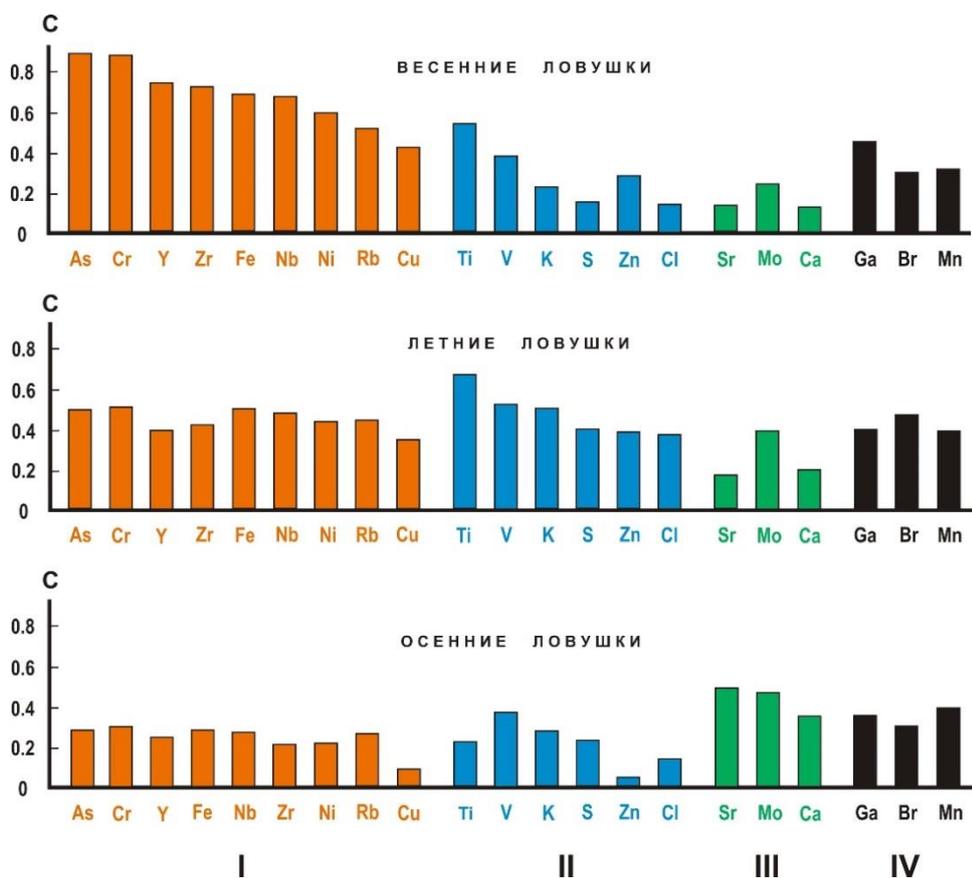


Рис. 1. Типизация химических элементов по особенностям сезонной концентрации в донных ловушках оз. Шира: I – элементы, концентрация которых достигает максимума в весенний период; II – элементы, концентрация которых достигает максимума в летний период; III – элементы, концентрация которых достигает максимума в осенний период; IV – элементы, не имеющие очевидно сезонной привязки. По вертикальной оси указаны концентрации элементов, преобразованные по процедуре минимаксной нормализации (C)

Fig. 1. Typification of chemical elements according to the characteristics of seasonal concentration in bottom traps of Lake Shira: I – elements, which concentration reaches maximum in spring; II – elements, which concentration reaches maximum in summer; III – elements, which concentration reaches maximum in autumn; IV – elements that have no obvious seasonal reference. The vertical axis shows the concentrations of elements converted by the minimax normalization procedure (C)

Связь сезонных седиментационных потоков с региональными температурами

Одним из важнейших метеопараметров, влияющих на процесс осадконакопления, является температура приповерхностного воздуха, которая опосредованно регулирует поступление в водоём аллохтонного материала, образование хемогенных и биогенных осадков.

Для проверки предположения о связи массы и химического состава поступающего в водоём материала не только с календарными сезонами на качественном уровне, но и с непрерывным внутригодовым температурным рядом была использована информация о среднемесячных температурах приповерхностного воздуха по результатам инструментальных наблюдений на метеостанции Шира [19] за период 2012–2017 гг.

Поскольку средняя экспозиция сезонных ловушек составляет два месяца, т. е. накопленный в них материал есть результат седиментационного процесса в течение двух предыдущих месяцев до момента снятия ловушки, температурные показатели также были приведены к средним двухмесячным значениям.

Сопоставление средних двухмесячных температур с интерполированными на месячную временную шкалу значениями масс выпадающего осадочного материала показало наличие между этими величинами незначительной положительной корреляционной зависимости ($r=0,13$). Однако при сдвиге кривой массонакопления вниз по временной шкале коэффициент корреляции резко возрастает, достигая максимума (0,66) при смещении на два месяца (рис. 2–4).

Таким образом, устанавливается достаточно высокая статистически достоверная ($n=44$, $p=0,99$) зависимость массы седиментационного потока от регионального температурного режима, при этом наблюдается двухмесячное временное запаздывание процесса осадконакопления от благоприятных погодных-климатических условий.

С привлечением метода множественной регрессии была также проанализирована связь региональных температур с химическим составом осаждающегося материала. В результате была получена регрессионная модель, позволяющая с достаточно высокой точностью восстанавливать значения средних двухмесячных температур приповерхностного воздуха:

$$\text{Темп.} = -0,085 \text{ Cr} - 0,143 \text{ Ni} - 0,511 \text{ As} + 0,0158 \text{ Sr} - 0,619 \text{ Y} - 0,082 \text{ Zr} - 1,204 \text{ Nb} + 24,853.$$

При этом кросскорреляционным анализом установлено, что максимальная корреляция ($r=+0,94$, $n=44$, $P=0,999$) между температурной кривой и её реконструкцией достигается при сдвиге последней

вниз по временной шкале на три месяца (рис. 5–7). Данный факт позволяет предполагать, что время осаждения основной массы аллохтонного вещества, попадающего в водоём, составляет в среднем около трёх месяцев.

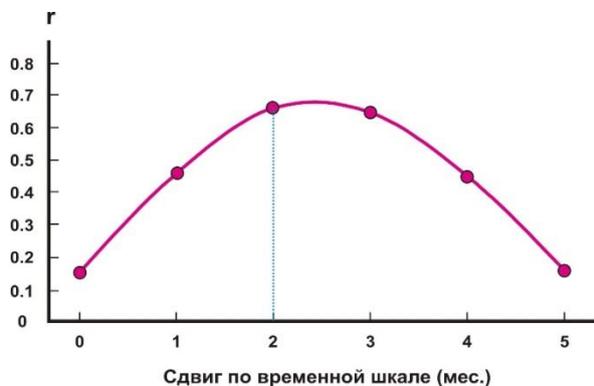


Рис. 2. Correlogram, отображающая изменение корреляции между средними двухмесячными температурами и массой выпадающего осадка при сдвиге вниз по временной шкале

Fig. 2. Correlogram showing the change in the correlation between the average two-month temperatures and the mass of precipitation when shifted down the time scale

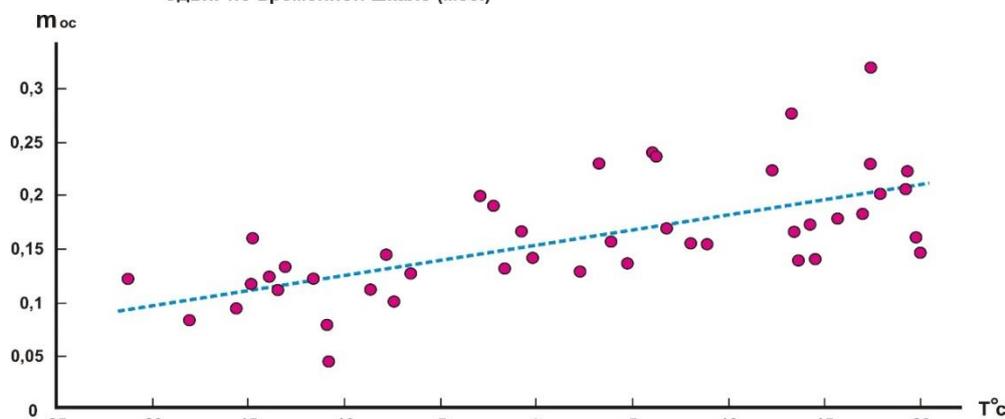


Рис. 3. График корреляционной зависимости средних двухмесячных температур приповерхностного воздуха (T °C) и массы осаждающегося материала ($m_{ос}$) с учётом двухмесячного запаздывания

Fig. 3. Graph of the correlation dependence of the average two-month temperatures of the near-surface air (T °C) and the mass of the deposited material ($m_{ос}$), taking into account a two-month delay

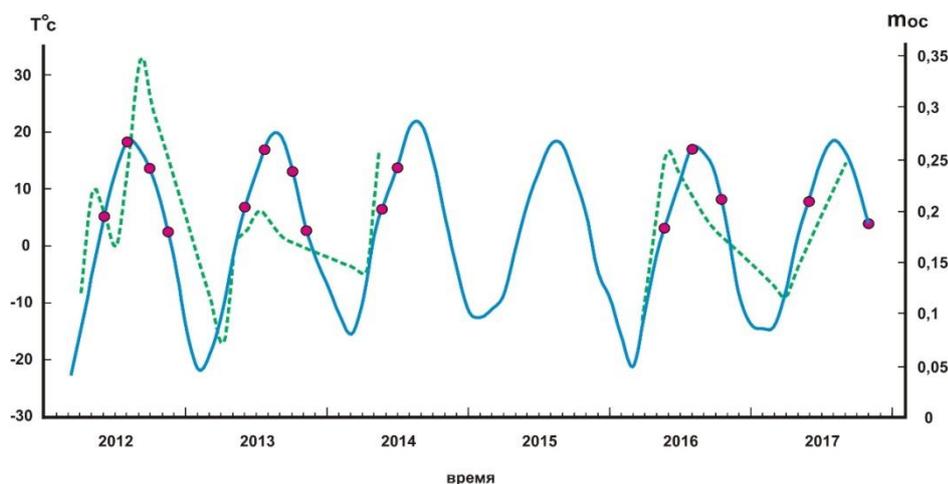


Рис. 4. Сопоставление средних двухмесячных значений инструментально измеренных температур приповерхностного воздуха T °C (сплошная линия) и массы выпадающего осадка $m_{ос}$ (штриховые линии). Точками обозначена временная привязка снятия ловушек. Линии масс выпадающих осадков сдвинуты влево по временной шкале на два месяца

Fig. 4. Comparison of the two-month average values of the instrumentally measured temperatures of the near-surface air T °C (solid line) and the mass of precipitation $m_{ос}$ (dashed lines). The dots indicate the timing of the removal of traps. The mass lines of precipitation are shifted to the left on the time scale by two months

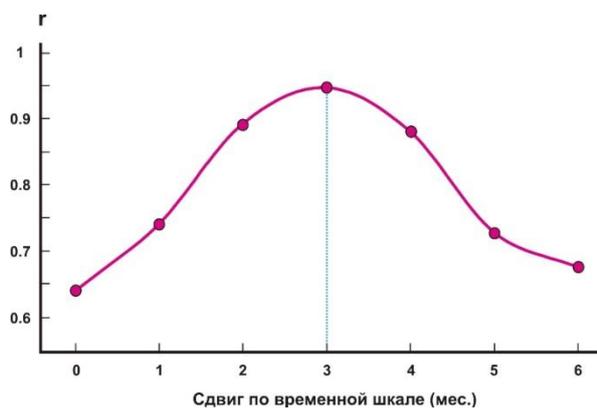


Рис. 5. Correlogramma, отображающая изменение корреляции между средними двухмесячными температурами и их реконструкцией по уравнению регрессии при сдвиге реконструкции вниз по временной шкале

Fig. 5. Correlogram showing the change in the correlation between the average two-month temperatures and their reconstruction according to the regression equation when the reconstruction is shifted down the time scale

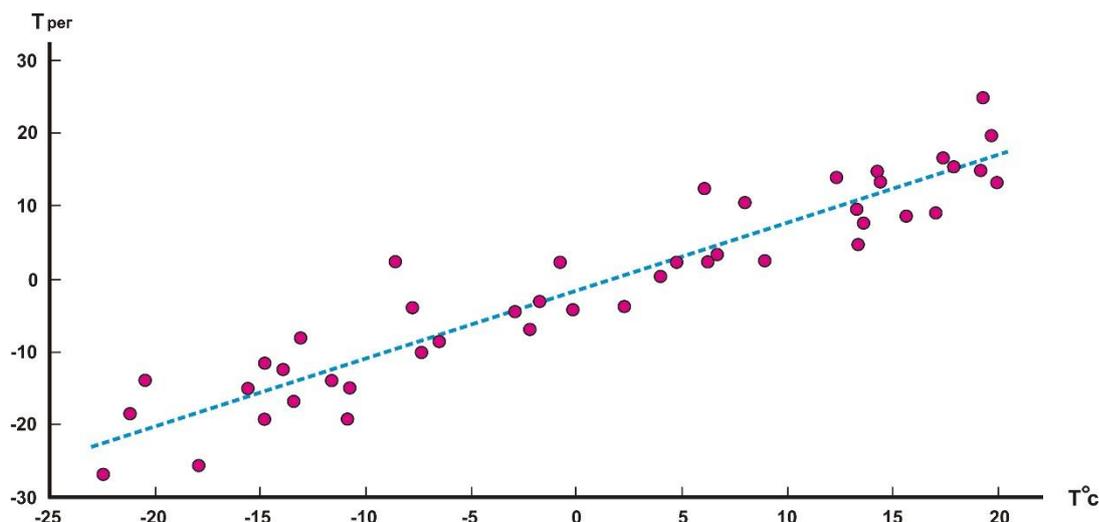


Рис. 6. График корреляционной зависимости средних двухмесячных температур приповерхностного воздуха ($T^{\circ}\text{C}$) и её реконструкции по регрессионной функции, построенной по химическому составу осадочного материала ($T_{\text{рег}}$)

Fig. 6. Graph of the correlation dependence of the average two-month temperatures of the near-surface air ($T^{\circ}\text{C}$) and its reconstruction according to the regression function constructed from the chemical composition of sedimentary material ($T_{\text{рег}}$)

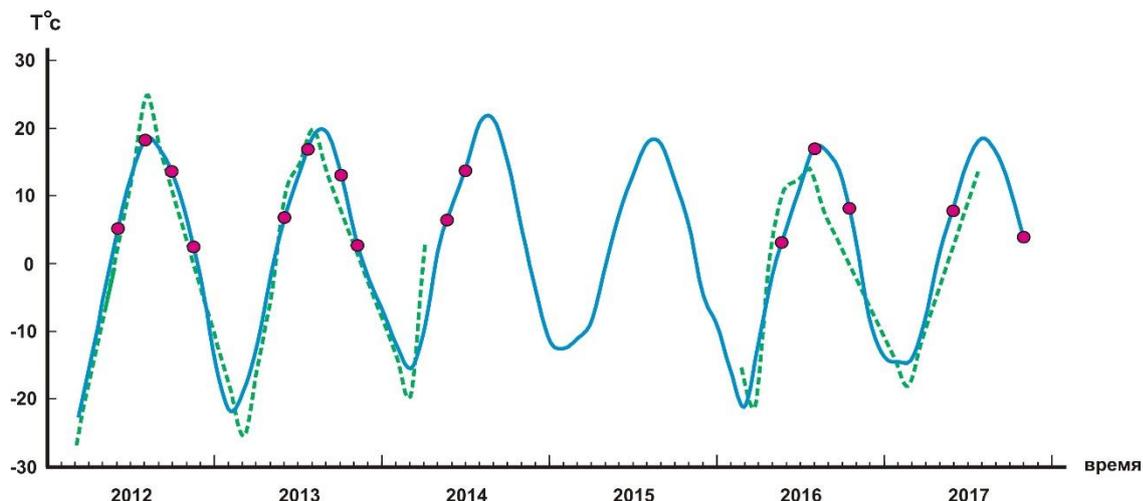


Рис. 7. Сопоставление инструментально измеренных средних двухмесячных температур приповерхностного воздуха (сплошная линия) с их реконструкцией по химическому составу проб (штриховые линии). Точками обозначена временная привязка снятия ловушек. Линии реконструкций сдвинуты вниз по временной шкале на три месяца

Fig. 7. Comparison of instrumentally measured average two-month temperatures of near-surface air (solid line) with their reconstruction according to the chemical composition of samples (dashed lines). The dots indicate the timing of the removal of traps. Reconstruction lines were shifted down the timeline by three months

Динамическая модель сезонного осадконакопления оз. Ши́ра

Типичные варвы представляют собой чередование светлых и тёмных слоёв осадка, обусловленных гидрологическим режимом озера, который, в свою очередь, связан с сезонностью процесса осадкообразования. Светлый, более мощный слой состоит из частиц крупного (песчано-алевритистого) размера, которые осаждаются в период активного стока воды в весенне-летний и частично осенний период и условно называется «летним». Тёмный, значительно более тонкий слой сложен глинистым материалом, отлагающимся в осенне-зимний период и называется «зимним» [20–24].

Керны современных донных илов оз. Ши́ра имеют хорошо выраженную субмиллиметровую ритмичную слоистость из светло-серых, темных и черных слоев. Толщина светлых слоев в сравнении с темными имеет кратное превышение. Таким образом, оз. Ши́ра является типичным представителем водоёмов с ярко выраженным ритмичным осадконакоплением, отображающим сезонные колебания гидрометеорологических условий [25]. С учётом полученных данных о сезонных вариациях массы и состава седиментационного потока и его связи с региональными температурами приповерхностного воздуха динамическая модель осадконакопления представляется следующим образом.

В весенний период за счёт эрозионной деятельности паводковых вод в озеро сносится достаточно большой объём терригенного материала, при этом наблюдается его неравномерное осаждение. Наиболее крупные алевритовые частицы достаточно быстро оседают на дно водоёма, о чём свидетельствуют повышенные концентрации «терригенных» элементов в весенних ловушках – Fe, Ni, Rb, Y, Zr, Cr, Nb и др. [16, 20]. Более мелкие глинистые частицы достаточно долго остаются во взвешенном состоянии и осаждаются на протяжении двух–трех месяцев, захватывая и летний сезон. Этим объясняется сравнительно небольшие массы осадочного материала, выпадающего в весенний период. По результатам электронной микроскопии в материале весенних ловушек установлены: кварц, полевой шпат, плагиоклаз, алюмосиликаты, слюдяные частицы, ильменит, титаномагнетит, рутил, циркон, пироксен, амфибол апатит, монацит, гидроокислы железа, барит.

За летний сезон в озере накапливается материала практически в два раза больше, чем весной. Это обусловлено продолжающимся осаждением частиц, вброшенных весенними тальми водами, сносом терригенного материала летними водотоками, а также биопродукцией. Осадки данного сезона характеризуются более низкими, чем весенние, концентрациями «терригенных» элементов, при этом в них наблюдается повышение содержания K, Cl, S. В летних ловушках кроме упомянутых выше минералов наблюдается большое количество диатомовых, органических пеллет, травинок, окисленных сульфидов железа, цинка, а также солевой агрегат – пластинки галита, сульфатные кристаллические пакеты, кальцит, мирабилит. Это говорит о том, что в этот период при про-

гревании водной толщи процесс осадконакопления контролируется как физико-химическими, так и биогенными факторами.

Накопление материала в осенний период незначительно превышает по массе летний привнос. Продолжается осаждение аллохтонного терригенного материала летнего сноса при более ограниченном объёме поставки алюмосиликатов осенними водотоками. В осенних ловушках, кроме обычного набора аллохтонных частиц породообразующих минералов, возрастает доля химически осажденных микрокристаллов: кальцита (3–8 мкм), Mg-кальцита, доломита, арагонита, пирита (фрамбоиды), сфалерита, а также органических остатков – кремнистых скелетов диатомовых, травинок, растительных волокон и частиц фитопланктона. Последние, как правило, содержат еще и Vg. В целом количество водорастворимых солей, по сравнению с летними ловушками, существенно уменьшается, а преобладают в основном карбонаты. Только в осенних ловушках обнаруживаются частицы Sr-содержащего кальцита величиной до 50 мкм, имеющего структуру карбонатного микростроматолита. Этим объясняются наиболее высокие, по сравнению с другими сезонами, концентрации в седиментационном материале Ca, Mo и особенно Sr. По термодинамическим расчётам повышение растворимости Sr происходит в тёплой среде [16, 26] в противоположность кальциту. Этот факт позволяет предполагать наличие временного запаздывания процесса прогревания большого водного бассейна от высоких летних температур.

В зимний период, в условиях ледостава, поступление аллохтонного материала и выпадение продуктов биопродуцирования резко сокращается [27, 28]. Процесс осадкообразования сводится к осаждению мелких глинистых частиц, попавших в озеро осенью, образованию карбоната в результате окисления органического вещества, накопленного в предыдущие сезоны, а также выпадению его из раствора за счет понижения температуры воды и повышения её солёности [16]. В силу этих обстоятельств накопление осадочного материала в озере в зимний сезон минимально.

Основные выводы

Изучение материала из донных ловушек, собранного в 2012–2017 гг., показало, что наиболее интенсивное осаждение материала происходит в летне-осенний период, в меньшей мере – в зимне-весенний. При этом весной преобладает аккумуляция аллохтонного (терригенного) алевритового материала, поступающего с паводковыми водами, что отражается и в его химическом составе: осадки, выпадающие в весенний период, характеризуются повышенными концентрациями «терригенных» элементов – As, Cr, Y, Zr, Fe, Nb, Ni, Rb, Cu. В летне-осенний период одновременно с осаждением кластогенного пелитового материала в осадках накапливаются в больших количествах биогенный и хемогенный материалы. При этом если в летних осадках соли представлены галитом, мирабилитом, кальцитом, то в осенних преобладают карбонаты – кальцит, доломит, стронцианит. Соот-

ветственно, летние отложения отличаются повышенными содержаниями К, Cl, S, осенние – Sr, Ca, Mo. В зимний период кластогенные и биогенные процессы осадконакопления практически прекращаются, наблюдается лишь хемогенное осаждение карбонатов. Таким образом, по классификации Ю.А. Жемчужникова [21], оз. Шира может быть отнесено к солёным озёрам смешанного осадконакопления, в которых осаждается материал разного генезиса – кластогенного, биогенного и хемогенного.

Известно, что мощность годовых слоёв в варвных отложениях коррелирует с годовыми региональными температурами [21, 29]. Однако наши исследования показали, что седиментационные потоки, формирующие донные озёрные отложения, намного более чувствительны к температурным вариациям. Устанавливается не только зависимость массы и химического состава накапливающегося осадочного материала от календарного сезона его накопления, но и высокая статистически достоверная линейная связь с непрерывным внутrigодовым временным рядом средних двухмесячных температур на достаточно протяжённом временном интервале. Кроме того, кросскорреляционным анализом установлен также факт временного запаздывания процесса выпадения осадка на дно водоёма от температуры приповерхностного воздуха, т. е. осаждение основной массы аллохтонного материала, попавшего в водоём, происходит в течение двух–трех месяцев. Такое же временное запаздывание отклика на температурные флуктуации проявляется и при выпадении хемогенных осадков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Palaeoenvironmental changes during the last 1600 years inferred from the sediment record of a cirque lake in southern Patagonia (Laguna Las Vizcachas, Argentina) / M. Fey, C. Korr, C. Ohlendorf, B. Zolitschka, N.I. Maidana, M.L. Carrevedo, H. Corbella, S. Dietrich, F. Schäbitz, A. Lücke, T. Haberzettl, G. Kuhn, C. Mayr, M.M. Paez, F.A. Quintana // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. – 2009. – V. 281. – P. 363–375.
2. Late Quaternary hydrological changes inferred from lake level fluctuations of Nam Co (Tibetan Plateau, China) / G. Daut, R. Mäusbacher, J. Baade, G. Gleixner, E. Kroemer, I. Mügler, J. Wallner, J. Wang, L. Zhu // *Quaternary International*. – 2010. – V. 218. – Iss. 1–2. – P. 86–93.
3. A multi-proxy approach to reconstruct hydrological changes and Holocene climate development of Nam Co, Central Tibet / I. Mügler, G. Gleixner, F. Günther, R. Mäusbacher, G. Daut, B. Schütt, J. Berking, A. Schwalb, L. Schwark, B. Xu, T. Yao, L. Zhu, C. Yi // *Journal of Paleolimnology*. – 2010. – V. 43. – P. 625–648.
4. A reconstruction of the thawing of the permafrost during the last 170 years on the Taimyr Peninsula (East Siberia, Russia) / A.P. Fedotov, M.A. Phedorin, I.V. Enushchenko, K.E. Vershinin, M.S. Melgunov, T.V. Khodzher // *Global and Planetary Change*. – 2012. – V. 98–99. – P. 139–152.
5. Indian ocean summer monsoon (IOSM)-dynamics within the past 4 ka recorded in the sediments of lake Nam Co, central Tibetan plateau (China) / T. Kasper, T. Haberzettl, S. Doberschütz, G. Daut, J. Wang, L. Zhu, N. Nowaczyk, R. Mäusbacher // *Quaternary Science Reviews*. – 2012. – V. 39. – P. 73–85.
6. Лозовик П.А., Кулик Н.В., Ефременко Н.А. Литофильные элементы и тяжелые металлы в Онежском озере: источники поступления, содержание и трансформация // Труды КарНЦ РАН. Сер. Лимнология. – Петрозаводск: ФИЦ «Карельский научный центр РАН», 2020. – № 4. – С. 62–74.
7. Hakanson L., Jansson M. Principles of lake sedimentology. – New Jersey, USA: The Blackburn Press. Caldwell, 1983. – 316 p.
8. Environmental changes since 8.4 ka reflected in the lacustrine core sediments from Nam Co, central Tibetan Plateau, China / L. Zhu, Y. Wu, J. Wang, X. Lin, J. Ju, M. Xie, M. Li, R. Mäusbacher, A. Schwalb, G. Daut // *The Holocene*. – 2008. – V. 18 (5). – P. 831–839. DOI: 10.1177/0959683608091801
9. Lateglacial and Holocene variation in Aeolian sediment flux over the northeastern Tibetan Plateau recorded by laminated sediments of a saline meromictic lake / S. Mischke, C. Zhang, A. Börner, U. Herzschuh // *Journal of Quaternary Science*. – 2010. – V. 25. – P. 162–177. DOI: org/10.1002/jqs.1288
10. Conditions for deposition of annually laminated sediments in small meromictic lakes: a case study of Lake Suminko (northern Poland) / W. Tylmann, K. Szpakowska, C. Ohlendorf, M. Woszczyk, B. Zolitschka // *Journal of Paleolimnology*. – 2012. – V. 47. – P. 55–70.
11. Laminated lake sediments in northeast Poland: distribution, preconditions for formation and potential for paleoenvironmental investigation / W. Tylmann, B. Zolitschka, D. Enters, C. Ohlendorf // *Journal of Paleolimnology*. – 2013. – V. 50. – P. 487–503.
12. Varves in lake sediments – a review / B. Zolitschka, P. Francus, A.E.K. Ojala, A. Schimmelmann // *Quaternary Science Reviews*. – 2015. – V. 117. – P. 1–41.
13. Tylmann W., Zolitschka B. Annually laminated lake sediments – recent progress // *Quaternary*. – 2020. – V. 5. – P. 1–3. DOI: 10.3390/quat3010005
14. A local clay-varve chronology of Onega Ice Lake, NW Russia / T. Hang, V. Gurbich, D. Subetto, V. Strakhovenko, M. Potakhin, N. Belkina, M.A. Zobkov // *Quaternary International*. – 2019. – V. 524. – P. 13–23. DOI: 10.1016/j.quaint.2019.03.021
15. Показатели окисных и аноксидных обстановок современного осадконакопления в соленом озере Шира (Хакасия) по данным высокоразрешающего РФА-СИ замороженных in situ образцов донных осадков / И.А. Калугин, А.В. Дарьин, В.В. Ба-

- бич, Т.И. Маркович, Я. В. Ракшун, Ф. А. Дарьин, Д. С. Сороколетов, Д. Ю. Rogozin // Известия Российской Академии Наук. Серия физическая. – 2019 – Т. 83. – № 2. – С. 247–252.
16. Физико-химические условия сезонного осаждения карбонатов в озере Шира (Хакасия) / Г.А. Третьяков, И.А. Калугин, А.В. Дарьин, Д.Ю. Rogozin, А.Г. Дегерменджи // Доклады Академии Наук. – 2012. – Т. 446. – № 2. – С. 197–200.
17. Tracing the North Atlantic decadal-scale climate variability in a late Holocene pollen record from southern Siberia / S. Hildebrandt, S. Müller, I.A. Kalugin, A.V. Dar'in, M. Wagner, D.Yu. Rogozin, P.E. Tarasov // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. – 2015. – V. 426. – P. 75–84.
18. Реконструкция уровня оз. Шира за последние 1500 лет на годовой временной шкале (по данным рентгенофлуоресцентного микроанализа на пучках синхротронного излучения) / А.В. Дарьин, И.А. Калугин, М.А. Максимов, Д.Ю. Rogozin, Я.В. Ракшун, Ф.А. Дарьин, Д.С. Сороколетов // Известия Российской Академии Наук. Серия физическая. – 2015. – Т. 79. – № 1. – С. 141–145.
19. Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Александрова Т.М. Описание массива данных суточной температуры воздуха и количества осадков на метеорологических станциях России и бывшего СССР (ТТТ) // Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014620942. 2008 URL: <http://meteo.ru/data/162-temperature-precipitation#описание-массива-данных> (дата обращения 15.05.2021).
20. Александрин М.Ю. Отложения приледниковых озёр – основа для создания непрерывных летописей истории голоценового оледенения // Палеогляциология. Лёд и Снег. – 2015. – № 1 (129). – С. 89–102. DOI: 10.15356/IS.2015.01.08.
21. Жемчужников Ю.А. Сезонная слоистость и периодичность осадконакопления // Труды ГИН АН СССР. – М.: Изд-во АН СССР, 1963. – Вып. 86. – С. 69.
22. Иванов М.Н. Метод отбора озёрных отложений для палеогляциологических реконструкций // Водные ресурсы, экология и гидрогеологическая безопасность: Шестая международная научная конференция. – М.: ИВП РАН, 2012. – С. 206–210.
23. Микроаналитические исследования замороженных образцов современных донных осадков оз. Шира / А.В. Дарьин, Д.Ю. Rogozin, И.А. Калугин, В.В. Бабич, Т.И. Маркович, Ф.А. Дарьин, Я.В. Ракшун // Геология морей и океанов: материалы XXIII международной научной конференции по морской геологии. – М., 18–22 ноября 2019. – Т. 1. – С. 79–84.
24. The first Holocene varve chronology for the UK: based on the integration of varve counting, radiocarbon dating and tephrostratigraphy from Diss Mere (UK) / C.M. Puertas, A.A. Walsh, S.P.E. Blockley, P. Harding, G.E. Biddulph, A. Palmer, A. Ramisch, A. Brauer // Quaternary Geochronology. – 2021. – V. 61. – P. 101–134.
25. Rogozin D.Yu. Меромиктические озера Северо-Минусинской котловины: закономерности стратификации и экология фототрофных серных бактерий. – Красноярск: Изд-во ИФ СО РАН, 2019. – 242 с.
26. Гаррелс Р.М., Крайст Ч.Л. Растворы, минералы, равновесия / пер. с англ. – М.: Изд-во «Мир», 1968. – 371 с.
27. Распределение и состав взвешенных веществ в воде и снежном покрове в Калининградском заливе / В.А. Чечко, В.Ю. Топчая, Б.В. Чубаренко, В.А. Пилипчук // Водные ресурсы. – 2016. – Т. 43. – № 1. – С. 37–46. DOI: 10.7868/S0321059616010053.
28. A seasonal cycle of terrestrial inputs in Lake Van, Turkey / C. Huguet, S. Fietz, N. Moraleda, T. Heumann, G. Litt, M. Stockhecke, F.S. Anselmetti, M. Sturm // Environmental Science and Pollution Research International. – 2012. – V. 19 (8). – P. 3628–3635. DOI: 10.1007/s11356-012-0948-3.
29. Leonard E.M. Varve studies at Hector Lake, Alberta, Canada and the relationship between glacial activity and sedimentation // Quaternary Research. – 1986. – V. 25. – Iss. 2. – P. 199–214.

Поступила 28.10.2021 г.

Информация об авторах

Бабич В.В., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН.

Дарьин А.В., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН.

Калугин И.А., доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН.

Маркович Т.И., кандидат химических наук, научный сотрудник Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН.

Зыков В.В., кандидат биологических наук, младший научный сотрудник Института биофизики СО РАН.

Рогозин Д.Ю., доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник Института биофизики СО РАН.

UDC 550.42: 504.455: 551.583.1

SEASONAL VARIABILITY OF SEDIMENTATION FLOWS IN SALT MEROMICTIC LAKE SHIRA (KHAKASSIA)

Valery V. Babich¹,
vbabich@igm.nsc.ru

Andrey V. Darin¹,
avd@igm.nsc.ru

Ivan A. Kalugin¹,
ikalugin@igm.nsc.ru

Tatyana I. Markovich¹,
mark@igm.nsc.ru

Viktor V. Zykov²,
rogozin@ibp.ru

Denis Yu. Rogozin²,
rogozin@ibp.ru

¹ Sobolev Institute of Geology and Mineralogy Siberian Branch Russian Academy of Sciences,
3, Academician Koptyug avenue, Novosibirsk, 360090, Russia.

² Institute of Biophysics SB RAS,
50, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russia.

The relevance of the work is caused by the need to study seasonal variations in the volume and composition of sedimentation flows in modern lakes and their relationship with weather and climatic factors, which can serve as a basis for reconstructing climatic changes in the past.

The main aim: to assess seasonal changes in the mass, velocity and chemical composition of sedimentary material entering Lake Shira on the basis of generalization and analysis of the results of multiyear annual monitoring of the material of sedimentation traps incubated in the lake.

Object of the study was the drainless, slightly saline meromictic lake Shira, located in the steppe intermontane depression on the territory of the Republic of Khakassia.

Methods: long-term seasonal monitoring of sedimentary material forming bottom sediments using sedimentation traps incubated in the lake; study of the obtained material for a wide range of parameters (biological, hydrochemical, lithological-geochemical, granulometric, etc.) by various conventional methods, including the method of X-ray fluorescence microanalysis on synchrotron radiation beams (XRF-SI), adapted for the study of bottom samples; computer statistical analysis of the data obtained (multiple regression method, cross-correlation analysis, etc.) in order to identify the relationship between regional temperatures and the chemical composition of the deposited material with the construction of a regression model.

Results. Based on the study of the amount and elemental composition of the sedimentary material of the seasonal bottom traps of Lake Shira, collected for 2012–2017, a dynamic model of the seasonal influx of sedimentary flows in lakes of this landscape-geochemical type was formulated. It has been established that the most intensive sedimentation of the material occurs in the summer-autumn period, less – in the winter-spring period. At the same time, in spring, the accumulation of allochthonous (terrigenous) aleurite material, supplied with flood waters, predominates; in the summer-autumn period, simultaneously with the deposition of clastogenic pelitic material, biogenic and chemogenic materials are accumulated in sediments in large quantities. In winter, clastogenic and biogenic processes of sedimentation practically stop, only chemogenic sedimentation of carbonates is observed. It was established that the sedimentation of allochthonous material entering the reservoir occurs during two–three months, which indicates a certain inertness of sedimentation. The presence of a stable relationship between the mass and chemical composition of terrigenous material entering the lake with the regional temperature of the near-surface air, which is one of the main regulators of the water balance of the reservoir, is shown.

Key words:

Bottom sediments, sedimentation traps, salt lakes, micro-XRF, synchrotron radiation, regression analysis.

The work was carried out on state assignment of IGM SB RAS, supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, with partial support of the RFBR - grant 21-54-52001 (setting of traps, sampling) and grant 19-05-50046 (micro-XRF-SR).

REFERENCES

1. Fey M., Korr C., Maidana N.I., Carrevedo M.L., Corbella H., Dietrich S., Haberzettl T., Kuhn G., Lücke A., Mayr C., Ohlendorf C., Paez M.M., Quintana F.A., Schäbitz F., Zolitschka B. Palaeoenvironmental changes during the last 1600 years inferred from the sediment record of a cirque lake in southern Patagonia (Laguna Las Vizcachas, Argentina). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2009, vol. 281, pp. 363–375. DOI: 10.1016/j.palaeo.2009.01.012
2. Daut G., Mäusbacher R., Baade J., Gleixner G., Kroemer E., Mügler I., Wallner J., Wang J., Zhu L. Late Quaternary hydrological changes inferred from lake level fluctuations of Nam Co (Tibetan Plateau, China). *Quaternary International*, 2010, vol. 218, Iss. 1–2, pp. 86–93. Available at:

- <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2010.01.001> (accessed 15 September 2021).
3. Mügler I., Gleixner G., Günther F., Mäusbacher R., Daut G., Schütt B., Berking J., Schwalb A., Schwark L., Xu B., Yao T., Zhu L., Yi C. A multi-proxy approach to reconstruct hydrological changes and Holocene climate development of Nam Co, Central Tibet. *Journal of Paleolimnology*, 2010, vol. 43, pp. 625–648.
 4. Fedotov A.P., Phedorin M.A., Enushchenko I.V., Vershinin K.E., Melgunov M.S., Khodzher T.V. A reconstruction of the thawing of the permafrost during the last 170 years on the Taimyr Peninsula (East Siberia, Russia). *Global and Planetary Change*, 2012, vol. 98–99, pp. 139–152. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2012.09.002> (accessed 15 September 2021).
 5. Kasper T., Haberzettl T., Doberschütz S., Daut G., Wang J., Zhu L., Nowaczyk N., Mäusbacher R. Indian ocean summer monsoon (IOSM)-dynamics within the past 4 ka recorded in the sediments of lake Nam Co, central Tibetan plateau (China). *Quaternary Science Reviews*, 2012, vol. 39, pp. 73–85. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2012.02.11> (accessed 15 September 2021).
 6. Lozovik P.A., Kulik N.V., Efremenko N.A. Litofilnye element i tyazhelye metally v Onezhskom ozere: istochniki postupleniya, sodержanie i transformatsiya [Lithophilic elements and heavy metals in Lake Onega: sources of input, content and transformation]. *Trudy Karelskogo Nauchnogo Tsentra Rossiyskoy Akademii Nauk. Seriya Limnologiya* [Labors of Karelian Research Center of Russian Academy of Science. Ser. Limnology]. Petrozavodsk, Federal Research Center «Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences» Publ., 2020. No. 4, pp. 62–74. DOI: 10.17076/lim1189
 7. Hakanson L., Jansson M. *Principles of Lake Sedimentology*. New Jersey, USA, The Blackburn Press. Caldwell, 1983. 316 p.
 8. Zhu L., Wu Y., Wang J., Lin X., Ju J., Xie M., Li M., Mäusbacher R., Schwalb A., Daut G. Environmental changes since 8.4 ka reflected in the lacustrine core sediments from Nam Co, central Tibetan Plateau, China. *The Holocene*, 2008, vol. 18 (5), pp. 831–839. DOI: 10.1177/0959683608091801
 9. Mischke S., Zhang C., Börner A., Herzschuh U. Late glacial and Holocene variation in Aeolian sediment flux over the northeastern Tibetan Plateau recorded by laminated sediments of a saline meromictic lake. *Journal of Quaternary Science*, 2010, vol. 25, pp. 162–177. DOI: 10.1002/jqs.1288
 10. Tylmann W., Szpakowska K., Ohlendorf C., Woszczyk M., Zolitschka B. Conditions for deposition of annually laminated sediments in small meromictic lakes: a case study of Lake Suminko (northern Poland). *Journal of Paleolimnology*, 2012, vol. 47, pp. 55–70.
 11. Tylmann W., Zolitschka B., Enters D., Ohlendorf C. Laminated lake sediments in northeast Poland: distribution, preconditions for formation and potential for paleoenvironmental investigation. *Journal of Paleolimnology*, 2013, vol. 50, pp. 487–503.
 12. Zolitschka B., Francus P., Ojala A.E.K., Schimmelmann A. Varves in lake sediments – a review. *Quaternary Science Reviews*, 2015, vol. 117, pp. 1–41.
 13. Tylmann W., Zolitschka B. Annually laminated lake sediments – recent progress. *Quaternary*, 2020, vol. 5, pp. 1–3. DOI: 10.3390/quat3010005
 14. Hang T., Gurbich V., Subetto D., Strakhovenko V., Potakhin M., Belkina N., Zobkov M. A local clay-varve chronology of Onega Ice Lake, NW Russia. *Quaternary International*, 2019, vol. 524, pp. 13–23. DOI: 10.1016/j.quaint.2019.03.021
 15. Kalugin I.A., Dar'in A.V., Babich V.V., Markovich T.I., Rakshun Ya.V., Dar'in F.A., Sorokoletov D.S., Rogozin D.Yu. Indicators of oxide and anoxide environments of modern sedimentation in the salt lake Shira (Khakasia) according to the data of high-resolution XRF-SR frozen in situ samples of bottom sediments. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physical series*, 2019, vol. 83, no. 2, pp. 247–252. In Rus.
 16. Tretyakov G.A., Kalugin I.A., Dar'in A.V., Rogozin D.Yu., Degermendzhi A.G. Physicochemical conditions of seasonal sedimentation of carbonates in Lake Shira (Khakasia). *Reports of the Academy of Sciences*, 2012, vol. 446, no. 2, pp. 197–200. In Rus.
 17. Hildebrandt S., Müller S., Kalugin I.A., Dar'in A.V., Wagner M., Rogozin D.Yu., Tarasov P.E. Tracing the North Atlantic decadal-scale climate variability in a late Holocene pollen record from southern Siberia. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2015, vol. 426, pp. 75–84.
 18. Dar'in A.V., Kalugin I.A., Maximov M.A., Rogozin D.Yu., Rakshun Ya.V., Dar'in F.A., Sorokaletov D.S. Reconstruction of the level of the lake. Shira over the past 1500 years on an annual time scale (according to X-ray fluorescence microanalysis data using synchrotron radiation beams). *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physical series*, 2015, vol. 79, no. 1, pp. 141–145. In Rus.
 19. Bulygina O.N., Razuvaev V.N., Aleksandrova T.M. Opisaniye massiva dannykh sutochnoy temperatury vozdukh i kolichestva osadkov na meteorologicheskikh stantsiyakh Rossii i byvshego SSSR (TTTR). Svidetelstvo o gosudarstvennoy registratsii bazy dannykh № 2014620942. 2008 [Description of the data array of daily air temperature and precipitation at meteorological stations in Russia and the former USSR (TTTR). Certificate of state registration of the database No. 2014620942. 2008] Available at: <http://meteo.ru/data/162-temperature-precipitation#description-data-mass> (accessed 15 May 2021).
 20. Alexandrin M.Yu. Periglacial lake deposits – the basis for the creation of continuous chronicles of the history of the Holocene glaciation. *Paleoglaciology. Ice and Snow*, 2015, no. 1, vol. 129, pp. 89–102. DOI: 10.15356 / IS.2015.01.08.
 21. Zhemchuzhnikov Yu.A. Sezonnaya sloistost i periodichnost osadkonakopleniya [Seasonal layering and periodicity of sedimentation]. *Proceedings of the GIN AN SSSR*. Moscow, USSR Academy of Sciences Publ., 1963. Iss. 86, pp. 69.
 22. Ivanov M.N. Metod otbora ozernykh otlozheniy dlya paleoglyatsiologicheskikh rekonstruktsii [Method of selection of lake sediments for paleoglaciological reconstructions]. *Shestaya mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya. Vodnye resursy, ekologiya i gidrogeologicheskaya bezopasnost* [Sixth international scientific conference. Water resources, ecology and hydrogeological safety]. Moscow, IVP RAS Publ., 2012. pp. 206–210.
 23. Dar'in A.V., Rogozin D.Yu., Kalugin I.A., Babich V.V., Markovich T.I., Dar'in F.A., Rakshun Ya.V. Mikroanaliticheskie issledovaniya zamorozhennykh obraztsov sovremennykh donnykh osadkov ozera Shira [Microanalytical studies of frozen samples of modern bottom sediments of the lake Shira]. *Geologiya morey i okeanov. Materialy XXIII mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii po morskoy geologii* [Geology of seas and oceans. Materials of the XXIII international scientific conference on marine geology]. Moscow, 18–22 November 2019. Vol. 1, pp. 79–84.
 24. Puertas C.M., Walsh A.A., Blockley S.P.E., Harding P., Biddulph G.E., Palmer A., Ramisch A., Brauer A. The first Holocene varve chronology for the UK: based on the integration of varve counting, radiocarbon dating and tephrostratigraphy from Diss Mere (UK). *Quaternary Geochronology*, 2021, vol. 61, pp. 101–134.
 25. Rogozin D.Yu. Meromekticheskie ozera Severo-Minusinskoj kotloviny: zakonomernosti stratifikatsii i ekologiya fototrofnyykh sernykh bakteriy [Meromictic lakes of the Severo-Minusinsk depression: regularities of stratification and ecology of phototrophic sulfur bacteria]. Krasnoyarsk, Institute of Philosophy SB RAS Publ. house, 2019. 242 p.
 26. Garrels R.M., Christ Ch.L. *Rastvory, mineraly, ravnovesiya* [Solutions, minerals, equilibria]. Translated from English. Moscow, Mir Publ., 1968. 371 p.
 27. Chechko V.A., Topchaya V.Yu., Chubarenko B.V., Pilipchuk V.A. Distribution and composition of suspended solids in water and snow cover in the Kaliningrad Bay. *Water Resources*, 2016, vol. 43, no. 1, pp. 37–46. In Rus. DOI: 10.7868 / S0321059616010053.
 28. Huguet C., Fietz S., Moraleda N., Heumann T., Litt G., Stockhecke M., Anselmetti F.S., Sturm M. A seasonal cycle of terrestrial inputs in Lake Van, Turkey. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2012, vol. 19 (8), pp. 3628–3635. DOI: 10.1007/s11356-012-0948-3.
 29. Leonard E.M. Varve studies at Hector Lake, Alberta, Canada and the relationship between glacial activity and sedimentation. *Quaternary Research*, 1986, vol. 25, Iss. 2, pp. 199–214.

Received: 28 October 2021.

Information about the authors

Valery V. Babich, Cand. Sc., senior researcher, Sobolev Institute of Geology and Mineralogy Siberian Branch Russian Academy of Sciences.

Andrey V. Darin, Cand. Sc., senior researcher, Sobolev Institute of Geology and Mineralogy Siberian Branch Russian Academy of Sciences.

Ivan A. Kalugin, Dr. Sc., leading researcher, Sobolev Institute of Geology and Mineralogy Siberian Branch Russian Academy of Sciences.

Tatyana I. Markovich, Cand. Sc., researcher, Sobolev Institute of Geology and Mineralogy Siberian Branch Russian Academy of Sciences.

Viktor V. Zykov, Cand. Sc., junior researcher, Institute of Biophysics SB RAS.

Denis Yu. Rogozin, Dr. Sc., leading researcher, Institute of Biophysics SB RAS.

УДК 622.831.322:622.831.1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ КРАЕВОЙ ЧАСТИ ПЛАСТА С ПОМОЩЬЮ МЕТОДОВ ТЕКУЩЕГО ПРОГНОЗА ВЫБРОСООПАСНОСТИ

Шадрин Александр Васильевич¹,
avsh-357@mail.ru

Телегуз Александр Сергеевич¹,
alexanderteleгуз@ Rambler.ru

¹ Институт угля Федерального исследовательского центра угля и углехимии СО РАН,
Россия, 650065, г. Кемерово, пр. Ленинградский, 10.

Актуальность исследования обусловлена потребностью в оперативном методе экспериментальной оценки напряженного состояния пласта впереди проводимой выработки, определяемого совокупностью основных факторов выбросоопасности: горным и газовым давлением, а также прочностью угля.

Цель: обосновать метод оценки напряженного состояния краевой части пласта в форме отношения текущего и критического значений показателя выбросоопасности с помощью одновременно выполняемых спектрально-акустического и инструментального метода текущего прогноза выбросоопасности.

Объекты: склонные к динамическим явлениям угольные пласты подземных шахт.

Методы: анализ инструментальных и геофизических методов контроля напряженного состояния призабойного пространства; оценка напряженного состояния с позиций геомеханики твердого тела; инструментальный метод контроля выбросоопасности – по начальной скорости газовой выделению и выхода штыба при поинтервальном бурении скважины; геометрическая акустика; геофизический метод контроля выбросоопасности, основанный на спектральном анализе «шума» рабочего органа буровой установки; оценка напряженного состояния краевой части пласта по результатам одновременного контроля инструментальным и геофизическим методом.

Результаты. Дана характеристика инструментальных и геофизических методов контроля горного давления и в целом напряженного состояния призабойного пространства подземных выработок. Показано, что для оценки степени выбросоопасности важны не величины горного и/или газового давления, а отношение текущего и критического значений напряженного состояния, которое приблизительно определяется тремя основными факторами: давлением вышележащих пород, внутрипластовым давлением газа и прочностью наиболее нарушенной угольной пачки пласта. Обоснована технология такого определения напряженного состояния пласта, включающая поинтервальное бурение скважины в борт выработки на необходимую глубину с длиной интервала в 1 м, на каждом интервале измерение показателя выбросоопасности инструментальным и геофизическим методом. По результатам измерения определяют отношение средних значений текущего и предельного напряжений на участке между фрезой буровой штанги в конце текущего интервала бурения контрольной скважины и геофоном, установленным в борт выработки.

Ключевые слова:

Угольный пласт, призабойное пространство, напряженное состояние, текущее и критическое значение средних напряжений, методы текущего прогноза выбросоопасности.

Введение

Горное давление в значительной мере определяет устойчивость подземных выработок, в том числе на пластах, склонных к проявлению динамических явлений (ДЯ) [1–6]. Для его измерения применяется широкий круг экспериментальных методов, основными из которых являются геомеханические и геофизические [7]. Из геомеханических наибольшее распространение получили методы разгрузки, основанные на использовании свойства упругого восстановления формы элемента массива при искусственном нарушении его связи с основным массивом. Но этот метод и его разновидности достаточно трудоемки и могут применяться только для пород достаточной прочности, исследуемые элементы которых обладают упругими свойствами и сохраняют форму после нарушения их связи с массивом. Выбросоопасные же пласты, содержащие пачку непрочного угля, такой способностью не обладают [8, 9]. Другим недостатком разновидностей этого метода является большой разброс оценок измеряемых величин [10].

Менее трудоемкими являются геофизические методы, основанные на зависимости контролируемых параметров, например скорости распространения звука, от горного давления. Но необходимой точностью эти методы часто тоже не обладают, так как на измеряемый параметр одновременно с горным давлением оказывают влияние еще несколько параметров, таких как влажность, неоднородный состав контролируемого массива, наличие нарушений и др.

Известно использование для оценки горного давления акустико-эмиссионного метода, основанного на использовании эффекта Кайзера, при установке в пробуренные скважины композиционных материалов с известными и стабильными прочностными свойствами [10–12]. Недостатком этого метода, помимо сложности и большой продолжительности осуществления, является дискретность измерения горного давления, шаг между измеряемыми величинами которого определяется настройкой чувствительности применяемых композиционных материалов.

Общим недостатком указанных геомеханических и геофизических методов контроля горного давления

при осуществлении текущего прогноза динамических явлений, и внезапных выбросов угля и газа в том числе, является дискретность измерений во времени и пространстве, что часто требует остановки ведения горных работ. Однако максимумы действующих напряжений достигаются именно в процессе ведения горных работ [13, 14]. Поэтому для текущего прогноза выбросоопасности в процессе ведения выработок необходим неразрушающий (без применения контрольных скважин и установки в них чувствительных элементов) геофизический метод контроля напряженного состояния непрерывного действия. Причем поскольку на опасность проявления ДЯ, особенно внезапных выбросов угля и газа и сходных с ними явлений, влияет не только горное давление, но и внутрипластовое давление газа и прочность угля, метод прогноза должен быть комплексным и учитывать все эти параметры. Одновременное влияние на устойчивость массива изменяющихся в пространстве и времени горного и газового давления при изменчивости прочности угля обуславливает непрерывно изменяющееся критическое значение выбросоопасности, которое может быть определено только комплексным методом прогноза.

Из сказанного следует, что при прогнозе выбросоопасности важно знать не столько абсолютную величину горного давления, сколько распределение в окрестности выработки отношения его текущего значения и критического, определяемого всем комплексом влияющих параметров. Между тем именно это отношение определяет текущее значение показателя выбросоопасности спектрально-акустического метода прогноза. Поэтому возникла идея разработать метод оперативного экспериментального определения (контроля) отношения текущего и предельного значений напряжений с помощью спектрально-акустического метода прогноза выбросоопасности. Основанием для решения этой задачи явились результаты исследований по разработке методики определения критерия выбросоопасности усовершенствованного спектрально-акустического метода текущего прогноза выбросоопасности [15].

Связь показателя выбросоопасности усовершенствованного спектрально-акустического метода прогноза выбросоопасности с отношением текущего и критического значений показателя выбросоопасности

Известны две основные модификации спектрально-акустического метода прогноза выбросоопасности. Первая основана на определении показателя выбросоопасности в форме отношения амплитуд высокочастотной и низкочастотной частей спектра шума работающего горного оборудования, а вторая – в форме отношения текущего и критического значений медианы амплитудно-частотной характеристики этого «шума» [16]. В данной работе будем рассматривать наиболее широко применяемую на практике первую модификацию метода. Для нее текущее значение показателя выбросоопасности K_c определяется выражением [15]:

$$K_c = \frac{A_h}{A_l} = \exp\left(-C \frac{\sigma_l}{\sigma_c} d\right), \quad (1)$$

где A_h и A_l – амплитуды акустических шумов работающего горного оборудования, замеренные соответственно на высоких и низких частотах, В; σ_l и σ_c – соответственно среднее критическое и среднее текущее напряжения в данном месте в настоящий момент, Па; d – расстояние между источником шума, воздействующим на забой, и приемником (геофоном), установленным в борт выработки, м.

При этом

$$C = \frac{\alpha_0 \beta (f_h - f_l)}{f_0}, \quad (2)$$

где α_0 – затухание на некоторой частоте f_0 , принадлежащей диапазону регистрируемых частот, m^{-1} ; β – безразмерный коэффициент пропорциональности, определяемый свойствами массива; f_h и f_l – характерные частоты из диапазонов соответственно высоких и низких рабочих частот источника акустического сигнала, Гц.

Из (1) видно, что показатель выбросоопасности зависит от отношения критического и текущего значения средних напряжений на участке между источником и приемником звука. Однако критическое значение напряжения зависит помимо горного давления от большого числа параметров массива, основные из которых могут быть объединены в интегральные показатели – факторы выбросоопасности, наиболее влияющими на выбросоопасность из которых кроме горного давления являются газовый фактор (определяемый газоносностью, фильтрационными свойствами угля и внутрипластовым давлением газа), а также мощность и прочность наименее крепкой пачки угольного пласта [2, 8, 13, 17–21].

Можно предположить, что процесс подготовки внезапного выброса во времени протекает между двумя этапами: начальным – когда начинается рост трещин в угле и формирование в призабойном пространстве блочной структуры, и конечным – когда из груди забоя выдавливается слой блоков (кусков) угля, образуя устье полости начинающегося выброса [15, 16].

Объединенное для этапа развития трещин и выдавливания слоя блоков предельное значение показателя выбросоопасности K_{lc} , которое достигается при $\sigma_l = \sigma_c$, определяется выражением:

$$K_{lc} = \exp\left\{-Cd \left[\frac{P_1}{0,1 \left(\frac{q}{110-q} \right) P_1 - D_1 \sqrt{Q\Omega}} \right] \right\},$$

где P_1 – нормирующий множитель, обусловленный определением пределов прочности угля через безразмерный показатель прочности угля q прочностным номером П-1 конструкции ИГД им. А.А. Скочинского, $P_1=1$ МПа; Q – расход воздуха вентилятора местного проветривания (ВМП), подающего воздух в выработку

ку, $\text{м}^3/\text{с}$; Ω – текущее значение концентрации метана у забоя выработки, измеренное датчиком метана аппаратуры газового контроля, %; параметр D_1 определяются фильтрационно-коллекторскими свойствами массива [11], $\text{Па} \cdot \text{с}^{1/2} \cdot \text{м}^{-3/2}$.

Поскольку оперативно измерить величины, определяющие параметры C и D_1 , и рассчитать по ним показатель K_{lc} практически невозможно, предлагается следующий метод его определения путем сравнения результатов прогноза выбросоопасности спектрально-акустическим и применяемым на шахтах России инструментальным методом прогноза по начальной скорости газовой выделению и выходу буровой мелочи из скважины.

Метод определения K_{lc} путем сравнения результатов прогноза выбросоопасности спектрально-акустическим и инструментальным методом

Метод основан на сравнении показателей выбросоопасности по результатам прогноза спектрально-акустического и инструментального метода. Методы должны быть выполнены одновременно в одной и той же выработке. При этом инструментальный метод используется как эталонный, подтвердивший высокую достоверность прогноза в течение длительного времени.

Выбор эталонного метода должен удовлетворять условиям подобия. В нашем случае эти условия сводятся к следующему. Оба метода должны учитывать основные факторы выбросоопасности. Показатели и критерии выбросоопасности должны быть обоснованы на основании единой модели подготовки внезапного выброса, в данном случае – силовой. Показатели выбросоопасности должны иметь положительные значения, возрастающие по мере увеличения опасности. Этим условиям удовлетворяет вариант исполнения инструментального метода прогноза по начальной скорости газовой выделению и выходу буровой мелочи из скважины, изложенный в работе [2]. Показатель выбросоопасности для этого метода, в случае использования его в подготовительной выработке, обозначим B_p . Алгоритм его определения следующий [2]:

В забое выработки измеряют мощность перематой пачки m , ее ширину a и прочностнономером П-1 прочность q . По этим данным рассчитывают периметр Π_B (м), площадь S_B (м^2) и коэффициент крепости угля по М.М. Протодакяконову f_B (б.е.) перематой пачки по формулам:

$$\Pi_B = 2(a + m); S_B = a \cdot m; f_B = \frac{0,4q}{110 - q}. \quad (3)$$

По результатам поинтервальных (длительность интервала измерения – 1м, длина шпура в зависимости от мощности пласта составляет 5 или 6,5 м) измерений начальной скорости газовой выделению и выхода штыба с интервала контроля определяют номер интервала i_m , в котором измерено максимальное значение начальной скорости газовой выделению $g_{н.маx}$ (оно обозначено как $G_{н.маx}$) и для него находят:

- выход штыба, он обозначен как $Z_{G.н.маx}$, л/м;

- расстояние $l_{g.маx}$ от забоя до середины интервала скважины, для которого установлено значение $G_{н.маx}$, по формуле $l_{g.маx} = 0,5 + i_m$, м.

Для первого от забоя интервала находят максимальное значение начальной скорости газовой выделению $g_{н.маx,3}$ (л/мин·м) и выход штыба Z_3 (л/м).

Далее рассчитывают: приведенное к проектному значению объема штыба без учета деформации стенки шпура, вызванной горным давлением, значение начальной скорости газовой выделению с интервала скважины, в котором измерено $G_{н.маx}$, и с ближайшего к забоя интервала по формулам [2]:

$$G_{н.маx}^* = G_{н.маx} \sqrt{\frac{Z_{н.маx}}{Z_{G.н.маx}}}, \quad (4)$$

$$g_{н.маx,3}^* = g_{н.маx,3} \sqrt{\frac{Z_{н.маx}}{Z_3}}. \quad (5)$$

Здесь $Z_{н.маx} = 2$ л/м – выход бурового штыба, соответствующий проектному диаметру шпура 42 мм.

Затем рассчитывают показатель выбросоопасности в окрестности подготовительной выработки B по формуле [2]:

$$B = \frac{\eta(G_{н.маx}^* - g_{н.маx,3}^*)S_B}{f_B \Pi_B l_{g.маx}}, \quad (6)$$

где $\eta = 1,25$ мин/л – постоянный коэффициент.

Критическое значение этого показателя обозначим B_l .

Определим коэффициент относительной выбросоопасности B_{rd} инструментального метода как отношение экспериментально измеренного B_e и критического значений показателя выбросоопасности:

$$B_{rd} = B_e / B_l.$$

Определим экспериментальное текущее значение показателя выбросоопасности спектрально-акустического метода K_{ce} , когда рабочий орган горного механизма является источником зондирующего акустического излучения. Для этого метода коэффициент относительной выбросоопасности K_{rd} запишется как отношение текущего экспериментального K_{ce} и текущего предельного (для данного момента времени и данного положения забоя выработки) K_{lce} значений показателя выбросоопасности:

$$K_{rd} = K_{ce} / K_{lce}.$$

Предполагая, что коэффициенты относительной выбросоопасности инструментального и спектрально-акустического метода примерно равны, т. е. $B_{rd} \approx K_{rd}$, и учитывая, что $B_l = 1,0$ [2], найдем экспериментально установленное на данном участке выработки текущее предельное значение показателя выбросоопасности спектрально-акустического метода K_{lce} :

$$K_{lce} = \frac{K_{ce}}{B_e}. \quad (7)$$

Тогда значение параметра C (назовем его C_e) определяется из (1) при условии $\sigma_c = \sigma_l$ и с учетом (7) следующим образом:

$$C_e = -\frac{\ln\left(\frac{K_{ce}}{B_e}\right)}{d_e}, \quad (8)$$

где d_e – расстояние между коронкой буровой штанги (источник излучения) и геофоном, определенное путем построения средней линии гипотетической траектории движения акустической волны вдоль борта выработки.

Покажем, что полученное выражение для расчета величины C_e можно использовать для определения отношения текущих и предельных средних напряжений в призабойном пространстве.

Обоснование метода контроля напряженного состояния путем одновременного применения инструментального и спектрально-акустического методов прогноза выбросоопасности

На рис. 1 представлена возможная схема расположения контрольной скважины – 2 для прогноза выбросоопасности, и шпура – 3, пробуренного в борт выработки – 1, в котором установлен геофон Г.

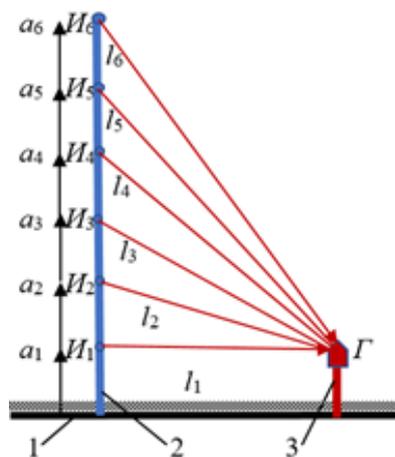


Рис. 1. Схема расположения контрольного шпура и шпура с геофоном относительно борта выработки

Fig. 1. Layout of the control hole and the hole with the geophone relative to mine working side

Подготовку к процедуре оценки напряженного состояния осуществляют следующим образом. Контрольный шпур бурят поинтервально на глубину, например, 6 м. Интервал соизмерим с длиной буровой штанги и выбирается равным 1 м. Геофон устанавливают также на глубине в 1 м в шпуре, пробуренном параллельно контрольной скважине на расстоянии 3–7 м от нее. (Равенство глубины установки геофона длине первого интервала бурения контрольной скважины принципиально, т. к. упрощает расчет расстояния между геофоном и последующими интервалами бурения контрольной скважины). Расстояния от устья контрольного шпура до концов интервалов бурения обозначим a_j , $j \in (1-6)$. Расстояние между концами интервалов бурения контрольной скважины и геофоном обозначим l_j , где $j \in (1-6)$. Не доходя до конца очередного интервала контроля примерно на 0,05–0,1 м,

начинают регистрировать акустическое излучение от резца буровой штанги и разрушаемого угля. Концы интервалов контроля обозначены как положения источников акустического излучения I_j , где $j \in (1-6)$.

Определив спектральный состав излучения от очередного источника I_j , рассчитывают по формуле (1) текущее значение показателя выбросоопасности $K_{c,e,j}$ как отношение высокочастотной и низкочастотной составляющих «шумов», излучаемых разрушаемым резцом углем. Закончив бурение j -го интервала контроля, измеряют $g_{\max,j}$ и $S_{\max,j}$. По этим данным рассчитывают по формулам (3)–(6) текущее значение показателя выбросоопасности инструментального метода $V_{c,e,j}$, а по формуле (7) – предельное значение показателя выбросоопасности спектрально-акустического метода $K_{l,c,e,j}$. Зная расстояние l_j между геофоном и положением буровой коронки, рассчитывают по формуле (8) параметр $C_{e,j}$:

$$C_{e,i} = \frac{\ln\left(\frac{K_{c,e,i}}{B_{e,i}}\right)}{l_i}. \quad (9)$$

Зная $C_{e,j}$, из (2) находят:

$$\alpha_{j,0}\beta = \frac{C_{e,j}f_0}{f_h - f_l}, \quad (10)$$

где $\alpha_{j,0}$ – усредненный коэффициент затухания на трассе между j -м источником излучения и геофоном.

Выражение (10) определяет результирующее затухание гармоник на частоте f_0 с учетом особенностей пласта (параметр β) на экспериментальном участке. Но это же затухание можно измерить экспериментально. Разность хода акустического излучения от ($j-1$)-го и j -го положения буровой коронки до геофона Г обозначим $r_{j1,j}$.

Амплитуду i -й гармоники $A_i(r)$ на расстоянии r от источника можно записать в виде [11]:

$$A_i(r) = A_{i0}(r)F(r)\exp(-\alpha_i r), \quad (11)$$

где A_{i0} – амплитуда i -й гармоники у источника; $F(r)$ – коэффициент, учитывающий диаграмму направленности излучателя; α_i – коэффициент затухания i -й гармоники.

Тогда, согласно (11), связь между амплитудами гармоник на частоте f_0 , излученных из точек I_j и I_{j-1} и принятых геофоном, при допущении о постоянстве затухания на этом участке, выразится следующим образом:

$$A_{j,0} = A_{j-1,0}F(r)\exp(-\alpha_{j,0}\beta r_{j-1,j}), \quad (12)$$

где $A_{j,0}$, $A_{j-1,0}$ – амплитуды гармоники на частоте f_0 в точках I_j и I_{j-1} соответственно; $\alpha_{j,0}$ – затухание на участке между точками I_j и I_{j-1} .

Введем следующие два допущения. Во-первых, будем полагать, что в треугольнике Г I_{j-1} I_j (рис. 1; рассматривается плоская задача) результирующее среднее затухание на частоте f_0 постоянное и равно $\alpha_{j,0}\beta \equiv \alpha_{j,0,r}$. Во-вторых, предположим, что акустическая волна, излучаемая резцом буровой штанги, сферическая, т. е. $F(r) = 1/r$. Тогда из (12) имеем:

$$\alpha_{j,0,r} \equiv \alpha_{j,0}\beta = \frac{\ln\left(\frac{A_{j-1,0}}{A_{j,0}r_{j-1,j}}\right)}{r_{j-1,j}}$$

Коэффициент затухания i -й гармоники α_i на частоте f_i можно записать следующим образом [11]:

$$\alpha_i = \alpha_0 \frac{f_i}{f_0} \beta \frac{\sigma_l}{\sigma_c}$$

Тогда для частоты $f=f_0$ имеем:

$$\alpha_{j,0,r} = \alpha_{j,0}\beta \frac{\sigma_l}{\sigma_c} \quad (13)$$

Из (13) для участка от геофона до конца j -го интервала контроля имеем:

$$\left(\frac{\sigma_c}{\sigma_l}\right)_j = \frac{\alpha_{j,0}\beta}{\alpha_{j,0,r}} \quad (14)$$

Подставив в правую часть (14) в числитель его значение из (10), а в знаменатель его значение из (13), будем иметь:

$$\left(\frac{\sigma_c}{\sigma_l}\right)_j = \frac{C_{e,j}f_0r_{j-1,j}}{(f_h - f_l)\ln\left(\frac{A_{j-1,0}}{A_{j,0}r_{j-1,j}}\right)} \quad (15)$$

После подстановки в (15) значения $C_{e,j}$ из (9) будем иметь:

$$\left(\frac{\sigma_c}{\sigma_l}\right)_j = \frac{\ln\left(\frac{K_{c,e,j}}{B_{e,j}}\right)f_0r_{j-1,j}}{l_j(f_h - f_l)\ln\left(\frac{A_{j-1,0}}{A_{j,0}r_{j-1,j}}\right)} \quad (16)$$

В (16) значения частот выбираются в соответствии с рекомендациями, изложенными в работе [15].

Поскольку взяли длину интервалов бурения одинаковой и равной 1 м, расстояние от борта выработки до конца j -го интервала бурения будет равно $a_j=j$ м. Тогда расстояние от конца j -го интервала контроля до геофона l_j будет равно:

$$l_j = \sqrt{(j-1)^2 + l_1^2},$$

а разность хода $r_{j-1,j}$ определится выражением:

$$r_{j-1,j} = l_j - l_{j-1} = \sqrt{(j-1)^2 + l_1^2} - \sqrt{(j-2)^2 + l_1^2},$$

Отношение средних текущих и предельных напряжений, определенное в соответствии с (16), относится к треугольнику $\Gamma I_{j-1} I_j$. Вычислив это отношение последовательно для всех треугольников, начиная от $\Gamma I_0 I_1$ до $\Gamma I_5 I_6$, получим представление о распределении отношения текущих напряжений к предельным от борта выработки вглубь массива на расстояние, равное длине контрольного шпура. (При необходимости длину ее можно взять больше, чем требуется для выполнения текущего прогноза выбросоопасности).

В подготовительных выработках малого сечения обеспечить расположение контрольного шпура и шпура для геофона, пробуренных в грудь забоя параллельно оси выработки, с расстоянием между более 3 м по схеме, изображенной на рис. 1, не всегда возможно. В этом случае можно применить схему, приведенную на рис. 2, где b – расстояние между точкой установки геофона и осью контрольной скважины.

Для этой схемы в предположении о равенстве длин интервалов бурения 1 м расстояние от борта выработки до конца j -го интервала бурения будет равно $a_j=j$ м. (В эксперименте должно выполняться условие $j \geq 2$). Тогда расстояние от конца j -го интервала контроля до геофона l_j будет равно:

$$l_j = \sqrt{(h+j)^2 + b^2},$$

а разность хода $r_{j-1,j}$ определится выражением:

$$r_{j-1,j} = l_j - l_{j-1} = \sqrt{(h+j)^2 + b^2} - \sqrt{(h+j-1)^2 + b^2}.$$

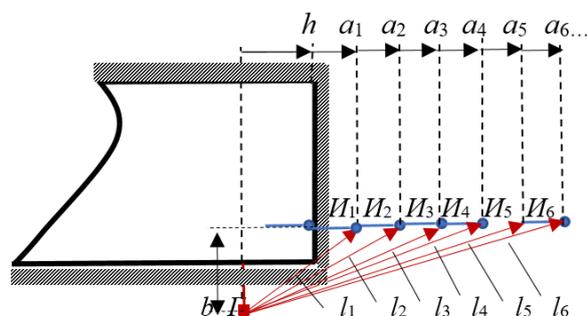


Рис. 2. Схема расположения контрольного шпура и шпура с геофоном у забоя подготовительной выработки

Fig. 2. Layout of the control hole and the hole with the geophone at the face of the development drive

Очевидно, что реализация этого метода контроля напряженного состояния призабойного пространства значительно менее трудоемка и требует меньшего времени, чем метод разгрузки или с помощью деформометров, или скважинных гидравлических датчиков. Загрузив в компьютер в искрозащищенном исполнении программу для расчета отношения средних текущих и предельных напряжений в соответствии с изложенным алгоритмом, можно в контролируемой выработке в течение 1,5–2 часов оценить выбросоопасность в призабойном пространстве и изменение напряженного состояния от борта выработки на участке массива, расположенного между контрольной скважиной и геофоном.

Заключение

Обоснован метод контроля напряженного состояния у борта (забоя) выработки путем одновременного применения инструментального и спектрально-акустического методов прогноза выбросоопасности.

В соответствии с этим методом отношение средних значений текущего и предельного напряжений на участке между резцом буровой штанги в конце текущего интервала бурения контрольного шпура и геофоном, установленным в борт выработки, прямо про-

порционально логарифму произведения критического значения показателя выбросоопасности инструментального метода прогноза и отношения текущих значений показателей выбросоопасности спектрально-акустического и инструментального методов прогноза, умноженному на произведение частоты гармоники f_0 , делящей низкочастотную (НЧ) и высокочастотную (ВЧ) области спектра сигнала «шума» резца, и разности хода $r_{i-1,i}$ между соседними концами интервалов бурения. Кроме того, отношение средних значений

текущего и предельного напряжений обратно пропорционально произведению расстояния от конца текущего интервала бурения до геофона, разности средних частот НЧ и ВЧ областей спектра «шума» и логарифма отношения амплитуд гармоники на частоте f_0 , измеренных на соседних интервалах бурения шпура, поделенного на разность хода между ними.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №17-17-01143).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горное давление в подготовительных выработках угольных шахт / Г.Г. Штумф, П.В. Егоров, А.И. Петров, Б.В. Красильников. – М.: Недра, 1996. – 352 с.
2. Зыков В.С. Внезапные выбросы угля и газа и другие газодинамические явления в шахтах. – Кемерово: Институт угля и углехимии СО РАН, 2010. – 333 с.
3. Проблемы безопасности и новые технологии подземной разработки угольных месторождений / В.И. Клишин, Л.В. Зворыгин, А.В. Лебедев, А.В. Савченко. – Новосибирск: ИД «Новосибирский писатель», 2011. – 524 с.
4. The current situation and prevention and control countermeasures for typical dynamic disasters in kilometer-deep mines in China / X. Chen, L. Li, L. Wang, L. Qi // Safety Science. – 2019. – V. 115. – P. 229–236. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.02.010> (дата обращения 15.09.2021).
5. Mechanical behaviors and acoustic emission fractal characteristics of coal specimens with a pre-existing flaw of various inclinations under uniaxial compression / D. Li, E. Wang, X. Kong, M. Ali, D. Wang // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2019. – V. 116. – P. 38–51. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2019.03.022> (дата обращения 15.09.2021).
6. Test system for the visualization of dynamic disasters and its application to coal and gas outburst / B. Zhou, J. Xu, S. Peng, J. Geng, F. Yan // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2019. – V. 122. – № 104083. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2019.104083> (дата обращения 15.09.2021).
7. Шкурятник В.Л., Николенко П.В. Методы определения напряженно-деформированного состояния массива горных пород: научно-образовательный курс. – М.: МГТУ, 2012. – 112 с.
8. Чернов О.И., Пузырев В.Н. Прогноз внезапных выбросов угля и газа. – М.: Недра, 1979. – 296 с.
9. Anisotropic mechanical properties and the permeability evolution of cubic coal under true triaxial stress paths / Y. Liu, G. Yin, M. Li, D. Zhang, B. Deng, C. Liu, J. Lu // Rock Mechanics and Rock Engineering. – 2019. – V. 52. – P. 2505–2521. URL: <https://doi.org/10.1007/s00603-019-01748-1> (дата обращения 15.09.2021).
10. Николенко Н.В. Аппаратурное и методическое обеспечение контроля сложного напряженного состояния массива с использованием эффекта памяти в упругих композиционных датчиках // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 2. – С. 97–104.
11. Николенко П.В., Шкурятник В.Л., Чепур М.Д. Акустико-эмиссионные эффекты при растяжении композитов для контроля состояния кровли горных // Горный журнал. – 2019. – № 1. – С. 13–16.
12. Использование эффекта Кайзера в композиционных материалах для контроля напряженного состояния массива горных пород / П.В. Николенко, В.Л. Шкурятник, М.Д. Чепур, А.Е. Кошелев // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2019. – № 1. – С. 26–31.
13. Шадрин А.В. Статическая и динамическая выбросоопасность угольных пластов // Безопасность труда в промышленности. – 2018. – № 4. – С. 42–48. DOI: 10.24000/0409-2961-2018-4-42-48.
14. Mining-induced static and dynamic loading rate effect on rock damage and acoustic emission characteristic under uniaxial compression / A. Cao, G. Jing, Y.-l. Ding, S. Liu // Safety Science. – 2019. – № 116. – P. 86–96. URL: <http://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.03.003> (дата обращения 15.09.2021).
15. Шадрин А.В., Диок Ю.А. Определение критерия выбросоопасности для комплексного спектрально-акустического метода прогноза // Безопасность труда в промышленности. – 2019. – № 8. – С. 19–26. DOI: 10.24000/0409-2961-2019-8-19-26.
16. Шадрин А.В. Функциональная часть подсистемы прогноза выбросоопасности многофункциональной системы безопасности угольной шахты // Безопасность труда в промышленности. – 2020. – № 6. – С. 72–78. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-6-72-78
17. Инструкция по прогнозу динамических явлений и мониторингу массива горных пород при отработке угольных месторождений: федер. нормы и правила в обл. пром. безопасности. – М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2019. – Сер. 05. – Вып. 49. – 148 с.
18. Black D.J. Review of coal and gas outburst in Australian underground coal mines // International Journal of Mining Science and Technology. – 2019. – V. 29. – Iss. 6. – P. 815–824. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2019.01.007> (дата обращения 15.09.2021).
19. Coal and gas outburst dynamic system / C. Fan, S. Li, M. Luo, W. Du, Z. Yang // International Journal of Mining Science and Technology. – 2017. – V. 27. – Iss. 1. – P. 49–55. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2016.11.00> (дата обращения 15.09.2021).
20. Regression analysis of major parameters affecting the intensity of coal and gas outbursts in laboratory / Geng Jiabo, Xu Jiang, Nie Wen, Peng Shoujian, Zhang Chaolin, Luo Xiaohang // International Journal of Mining Science and Technology. – 2017. – V. 27. – Iss. 2. – P. 327–332. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2017.01.004> (дата обращения 15.09.2021).
21. Black D.J. Investigations into the identification and control of outburst risk in Australian underground coal mines // International Journal of Mining Science and Technology. – 2017. – V. 27. – Iss. 5. – P. 749–753. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmst.2017.07.006> (дата обращения 15.09.2021).

Поступила 13.10.2021 г.

Информация об авторах

Шадрин А.В., доктор технических наук, главный научный сотрудник Лаборатории геофизических исследований горного массива Института угля Федерального исследовательского центра угля и углехимии СО РАН.

Телегуз А.С., младший научный сотрудник Лаборатории геофизических исследований горного массива Института угля Федерального исследовательского центра угля и углехимии СО РАН.

UDC 622.831.322:622.831.1

DEFINING A STRESS STATE OF A COAL SEAM SELVAGE APPLYING OUTBURST DANGER CURRENT PREDICTION METHODS

Alexander V. Shadrin¹,
avsh-357@mail.ru

Alexander S. Teleguz¹,
alexanderteleguz@rambler.ru

¹ Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 10, Leningradsky avenue, Kemerovo, 650065, Russia.

The relevance of the research is conditioned by the demand in operational method of experimental estimation of the stress-state of a coal seam ahead of the working, which is defined by key outburst danger factors: ground pressure, gas pressure and coal strength.

The main aim is to substantiate the method of estimating the stress state of a coal seam selvage in the form of ratio of current and critical values of outburst danger indicator applying simultaneously performed spectral-acoustic method and instrumental method of outburst danger current (operational) prediction.

Objects: underground mine coal seams prone to dynamic phenomena.

Methods: the analysis of instrumental and geophysical methods of a face space stress state control; the estimation of a stress state based on geo-mechanics of solid bodies; instrumental method of outburst danger control – on the initial speed of gas emission and cutting fines output under interval drilling of boreholes; geometric acoustics; geophysical method of outburst danger control based on spectral analysis of the drilling rig working element noise; estimation of a stress state of a coal seam selvage on the result of simultaneous control fulfilled by instrumental and geophysical methods.

Results. The paper introduces the characteristics of instrumental and geophysical methods of the ground pressure control and a stress state of underground working face space, in general. It is shown that for estimating the outburst danger degree neither ground pressure value nor gas pressure value bear any importance but the ratio of current and critical values of a stress state and it is, approximately, defined by three key factors: overlaying rock pressure, in-situ gas pressure and by the strength of the most broken coal layer. The technology of defining the stress state of a coal seam, which includes interval drilling of a borehole into the wall of the working into a certain depth with the interval length of 1 meter and measuring outburst danger indicator at each interval by instrumental and geophysical methods, is substantiated. Based on the measuring results one can determine the ratio of medium values of current and critical stresses at the distance between the miller of the drillrod at the end of the current drilling of a control borehole and a geophone, installed into the wall of the working.

Key words:

Coal seam, face space, stress state, current and critical values of medium stresses, outburst danger current (operational) prediction methods.

The research was carried out due to the grant of Russian Science Foundation (project no. 17-17-01143).

References

1. Shtumpf G.G., Egorov P.V., Petrov A.V., Krasilnikov B V. *Gornoe davlenie v podgotovitelnykh vyrabotkakh* [Ground pressure in coal mine development workings]. Moscow, Nedra Publ., 1996. 352 p.
2. Zykov V S. *Vnezapnye vybrossy uglya i gaza i drygie gazodinamicheskie yavleniya v shakhtakh* [Sudden coal and gas outbursts and other gas-dynamic phenomena in ground mines]. Kemerovo, Institut Uglya i uglekhimii SO RAN Publ., 2010. 333 p.
3. Klishin V.I., Zvorygin L. V., Savchenko A.V. *Problemy bezopasnosti i novye tehnologii podzemnoy razrabotki ugolnykh mestorozhdeniy* [Safety issues and new technologies of underground mining]. Novosibirsk, Novosibirskiy pissatel Publ. house, 2011. 524 p.
4. Chen X., Li L., Wang L., Qi L. The current situation and prevention and control countermeasures for typical dynamic disasters in kilometer-deep mines in China. *Safety Science*, 2019, vol. 115, pp. 229–236. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.02.010> (accessed 15 September 2021).
5. Li D., Wang E., Kong X., Ali M., Wang D. Mechanical behaviors and acoustic emission fractal characteristics of coal specimens with a pre-existing flaw of various inclinations under uniaxial compression. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2019, vol. 116, pp. 38–51. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2019.03.022> (accessed 15 September 2021).
6. Zhou B., Xu J., Peng S., Geng J., Yan F. Test system for the visualization of dynamic disasters and its application to coal and gas outburst. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2019, vol. 122, no. 104083. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2019.104083> (accessed 15 September 2021).
7. Shkuratnik V.L., Nikolayenko P V. *Metody opredeleniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya massiva gornyykh porod: nauchno-obrazovatelny kurs* [Methods for defining stress-deformed state of a rock massif: scientific-educational course]. Moscow, MGGU Publ., 2012. 112 p.
8. Chernov O.I., Puzyrev V.N. *Prognoz vnezapnykh vybrossov uglya i gaza* [Sudden coal and gas outbursts prediction]. Moscow, Nedra Publ., 1979. 296 p.
9. Liu Y., Yin G., Li M., Zhang D., Deng B., Liu C., Lu J. Anisotropic mechanical properties and the permeability evolution of cubic coal under true triaxial stress paths. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2019, vol. 52, pp. 2505–2521. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00603-019-01748-1> (accessed 15 September 2021).
10. Nikolaenko N.V. Hardware and methodological support of complex stress-strain state monitoring of rock massif using memory effects in elastic compositive sensors. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*, 2019, no. 2, pp. 97–104. In Rus.
11. Nikolenko P.V., Shkuratnik V.L., Chepur M.D. Acoustic emission effects in tension of composites and practical applications for roof

- control in underground mines. *Gorny Zhurnal*, 2019, no. 1, pp. 13–16. In Rus. DOI: 10.17580/gzh.2019.01.03.
12. Nikolenko P.V., Shkuratnik V.L., Chepur M.D., Koshelev A.E. Using the Kaiser effect in composites for stressed rock mass control. *Journal of Mining Science*, 2018, no. 1, pp. 26–31. In Rus. DOI: 10.15372/FTPRPI20180103
 13. Shadrin A.V. Static and dynamical outburst danger of the coal seams. *Occupational Safety in Industry*, 2018, no. 4, pp. 42–48. In Rus. DOI: 10.24000/0409-2961-2018-4-42-48.
 14. Cao A., Jing G., Ding Y.-l., Liu S. Mining-induced static and dynamic loading rate effect on rock damage and acoustic emission characteristic under uniaxial compression. *Safety Science*, 2019, no. 116, pp. 86–96. Available at: <http://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.03.003> (accessed 15 September 2021).
 15. Shadrin A.V., Diyuk Yu.A. Determination of the Outburst hazard criteria for the complex spectral-acoustic method of forecast. *Occupational Safety in Industry*, 2019, no. 8, pp. 19–26. In Rus. DOI: 10.24000/0409-2961-2019-8-19-26.
 16. Shadrin A.V. Functional part of the outburst hazard forecast subsystem of the multifunctional coal mine safety system. *Occupational Safety in Industry*, 2020, no. 6, pp. 72–78. In Rus. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-6-72-78
 17. *Instruktsiya po prognozu dinamicheskikh yavleniy i monitoring massiva gornykh porod pri otrabotke ugolnykh mestorozhdeniy: feder. normy ii pravila v obl. prom. bezopasnosti* [Instructions on dynamic phenomena prediction and rock massif monitoring while mining coal deposits: federal norms and regulations in the sphere of industrial safety]. Moscow, ZAO NTTs PB, 2019. Ser. 05, Iss. 49, 148 p.
 18. Black D.J. Review of coal and gas outburst in Australian underground coal mines. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2019, vol. 29, Iss. 6, pp. 815–824. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2019.01.007> (accessed 15 September 2021).
 19. Fan C., Li S., Luo M., Du W., Yang Z. Coal and gas outburst dynamic system. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2017, vol. 27, Iss. 1, pp. 49–55. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2016.11.00> (accessed 15 September 2021).
 20. Geng Jiabo, Xu Jiang, Nie Wen, Peng Shoujian, Zhang Chaolin, Luo Xiaohang. Regression analysis of major parameters affecting the intensity of coal and gas outbursts in laboratory. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2017, vol. 27, Iss. 2, pp. 327–332. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2017.01.004> (accessed 15 September 2021).
 21. Black D.J. Investigations into the identification and control of outburst risk in Australian underground coal mines. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2017, vol. 27, Iss. 5, pp. 749–753. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmst.2017.07.006> (accessed 15 September 2021).

Received 13 October 2021.

Information about the authors

Alexander V. Shadrin, Dr. Sc., chief scientist, Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

Alexander S. Teleguz, junior research scientist, Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

УДК 622.276.63

ГРУППИРОВАНИЕ И ВЫДЕЛЕНИЕ ЗАЛЕЖЕЙ НЕФТИ В КАРБОНАТНЫХ КОЛЛЕКТОРАХ ПО ПРОДУКТИВНОСТИ НА СТАДИИ ПРОВЕДЕНИЯ ГЕОЛОГО-РАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ

Мухаметшин Вячеслав Шарифуллович¹,
vsh@of.ugntu.ru

Кулешова Любовь Сергеевна¹,
markl212@mail.ru

Сафиуллина Альбина Ринатовна¹,
safullina.a.r@yandex.ru

¹ Филиал Уфимского государственного нефтяного технического университета в г. Октябрьском, Россия, 452607, г. Октябрьский, ул. Девонская, 54а.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью оценки продуктивности месторождений Волго-Уральской нефтегазоносной провинции, сложенных карбонатным коллектором, на стадии составления проектной документации по разработке для определения рентабельности и стратегии эксплуатации объектов, в которых сосредоточены значительные по размерам запасы нефти, относящиеся к категории трудноизвлекаемых. Решение этой задачи позволяет расширить ресурсную базу региона и минимизировать риски при принятии управляющих решений.

Цель: провести группирование объектов в карбонатных коллекторах с созданием методики отнесения объектов, выходящих из разведки, к категории высоко- или низкопродуктивных с использованием косвенных данных.

Объекты: залежи нефти в карбонатных коллекторах Волго-Уральской нефтегазоносной провинции.

Методы. При проведении группирования использован метод геолого-промислового анализа, виды факторного анализа.

Результаты. Установлено, что граничным значением коэффициента продуктивности залежей нефти в карбонатных коллекторах, разделяющим месторождения на высоко- и низкопродуктивные, является значение, равное 10 т/сут/МПа. Показано, что разделение залежей по продуктивности обуславливается емкостно-фильтрационными и толщинными свойствами пород-коллекторов, а также условиями залегания пластов и свойствами пластовых флюидов. В среднем по высокопродуктивным объектам эти параметры больше. Низкопродуктивные объекты в среднем имеют большие значения вязкости и плотности пластовой нефти. Однако четко поставить в соответствие граничному значению коэффициента продуктивности граничное значение какого-либо параметра невозможно, так как продуктивность залежей характеризуется комплексом значений параметров пласта и насыщающих его флюидов и лишь определенный набор этих значений позволяет оценить ее. Создана методика дифференциации объектов разработки в карбонатных коллекторах Волго-Уральской нефтегазоносной провинции по коэффициенту продуктивности на основе косвенных данных для решения задач выделения эксплуатационных объектов на многопластовых месторождениях; сравнения объектов при проведении анализа разработки и т. д.

Ключевые слова:

Коэффициент продуктивности, нефть, карбонатные коллектора, эффективность разработки, геолого-физические свойства пород.

Введение

Известно, что коэффициент продуктивности ($K_{\text{прод}}$) в обобщенном виде учитывает фильтрационно-емкостные свойства нефтяных пластов и во многом определяет степень извлечения нефти из недр, добывные возможности залежей, рентабельность разработки [1–12].

Значения продуктивности залежей используются при определении кондиционных значений емкостно-фильтрационных свойств; дифференциации запасов; определении объектов эксплуатации; расчете показателей разработки; мониторинге процесса нефтеизвлечения (по изменению коэффициента продуктивности можно изучать эффективность условий вскрытия и заканчивания скважин, эффективность методов воздействия на призабойную зону пласта, изменение состояния призабойной зоны в процессе разработки); выборе мероприятий по регулированию и совершенствованию процесса добычи нефти; определении важнейшего показателя фильтрационных способностей пласта – коэффициента проницаемости, который

широко используется при решении самых различных задач анализа и проектировании разработки залежей; расчете показателей разработки; определении режима работы скважин и т. д. [12–20]. Иначе говоря, дифференциация залежей по продуктивности с точки зрения выбора рациональной системы разработки имеет важное значение. Причем необходимо знать продуктивность залежей на стадии выхода месторождений из разведки. Однако эта стадия связана со слабой разбуренностью месторождений и, как следствие, с ограниченным количеством проведенных исследований скважин по гидродинамике, а также влиянием многочисленных «шумов», искажающих реальные свойства призабойной зоны в точке вскрытия ее скважиной из-за: загрязнения промывочной жидкостью пласта; образования высоковязких эмульсий; кольматации призабойной зоны пласта (ПЗП) в процессе вскрытия пласта бурением. Восстановление первоначальных свойств пласта происходит крайне медленно.

В этих условиях важным является устранение искажений реальной продуктивности через изучение

влияния различных геолого-технологических параметров на изменение добычных возможностей скважин. Причем параметры должны достаточно надежно определяться на стадии проведения испытаний скважин на приток [21–24].

Методы и материалы

В работах [25, 26] предложено разделение залежей нефти в карбонатах Волго-Уральской нефтегазоносной провинции (ВУНГП) по эффективности разработки на средне- и низкопродуктивные. Граничным значением коэффициента продуктивности предложено считать величину, равную 20 т/сут/МПа. В этих работах делается вывод, что при $K_{\text{прод}} \geq 20$ т/сут/МПа эффективность разработки залежей в карбонатных коллекторах сопоставима с эффективностью разработки высокопродуктивных залежей, сложенных терригенным коллектором.

В то же время анализ эффективности разработки многочисленных залежей, сложенных карбонатным коллектором, показывает, что при $K_{\text{прод}}$ до 10 т/сут/МПа залежи нефти характеризуются весьма высокими показателями разработки, а процесс вытеснения в них идет аналогично вытеснению в терригенных коллекторах. И лишь при средних значениях продуктивности менее этой величины показатели разработки характеризуются весьма низкими значениями. Разработка этих объектов ведется на естественных режимах, а заводнение не приносит желаемых результатов. При этом конечная нефтеотдача к концу разработки этих объектов не превысит 15 %.

В связи с этим граничной продуктивностью, разделяющей высоко- и низкопродуктивные объекты в карбонатных коллекторах, должна быть принята продуктивность, равная 10 т/сут/МПа. Именно при этом значении залежи наиболее четко разделяются на высоко- и низкопродуктивные (рис. 2).

Результаты и обсуждения

Более чем по 400 залежам в карбонатных коллекторах ВУНГП были проведены расчёты на основе использования одной из разновидностей метода факторного анализа – метода главных компонент (МГК). В качестве аргументов использовались параметры, определение которых с достаточной степенью точности проводится на стадии выхода месторождений из разведки. Значения параметров по выбранным объектам представлены в табл. 1.

Значения полученных первых четырех главных компонент имеют следующий вид:

$$Z_1 = -0,141H_3 + 0,034m_r + 0,032m_k + 0,214K_n + 0,002\mu_n + 0,001\mu_o - 0,025\rho_n + 0,312H_{\text{зал}} - 0,056P_{\text{нас}} - 0,042G + 0,321P_{\text{пл}} + 0,170K_{\text{прон}} + 0,333t_{\text{пл}}; \quad (1)$$

$$Z_2 = 0,234H_3 - 0,012m_r - 0,001m_k + 0,020K_n + 0,400\mu_n + 0,400\mu_o + 0,109\rho_n + 0,007H_{\text{зал}} - 0,045P_{\text{нас}} + 0,039G + 0,029P_{\text{пл}} + 0,315K_{\text{прон}} + 0,057t_{\text{пл}}; \quad (2)$$

$$Z_3 = 0,491H_3 - 0,047m_r - 0,038m_k + 0,027K_n + 0,084\mu_n + 0,086\mu_o - 0,208\rho_n - 0,082H_{\text{зал}} + 0,287P_{\text{нас}} + 0,383G - 0,066P_{\text{пл}} + 0,113K_{\text{прон}} - 0,079t_{\text{пл}}; \quad (3)$$

$$Z_4 = -0,102H_3 + 0,439m_r + 0,441m_k + 0,251K_n - 0,035\mu_n - 0,032\mu_o - 0,116\rho_n - 0,024H_{\text{зал}} - 0,087P_{\text{нас}} + 0,011G + 0,003P_{\text{пл}} + 0,200K_{\text{прон}} + 0,038t_{\text{пл}}. \quad (4)$$

Таблица 1. Значения параметров объектов исследования

Table 1. Values of research objects parameters

Параметр Parameter	Значения параметров Parameter values		
	мини- мальное min	среднее average	макси- мальное max
Эффективная нефтенасыщенная толщина H_3 , м Net oil pay H_3 , m	0,5	5,9	102,3
Коэффициент пористости (по геофизике) m_r , % Porosity factor (geophysics) m_r , %	3,0	13,3	24,2
Коэффициент пористости (по керну) m_k , % Porosity factor (by core) m_k , %	2,0	13,2	28,0
Коэффициент нефтенасыщенности, K_n Oil saturation factor, K_n	0,45	0,78	0,96
Вязкость нефти μ_n , мПа·с Oil viscosity μ_n , mPa·s	0,9	23,0	390,0
Относительная вязкость нефти μ_o Specific oil viscosity μ_o	0,7	16,3	229,0
Плотность нефти ρ_n , кг/м ³ Oil density ρ_n , kg/m ³	720	862	958
Глубина залегания $H_{\text{зал}}$, м Occurrence depth $H_{\text{зал}}$, m	230	1269	2570
Давление насыщения $P_{\text{нас}}$, МПа Saturation pressure $P_{\text{нас}}$, MPa	0,5	5,0	21,3
Пластовый газовый фактор G , м ³ /т Formation gas-oil ratio G , m ³ /t	1,8	25,0	207,0
Начальное пластовое давление $P_{\text{пл}}$, МПа Initial reservoir pressure $P_{\text{пл}}$, MPa	2,8	12,5	28,7
Начальная пластовая температура $t_{\text{пл}}$, К Initial reservoir temperature $t_{\text{пл}}$, K	278	298	327
Коэффициент проницаемости $K_{\text{прон}}$, 10 ⁻³ мкм ² Permeability coefficient $K_{\text{прон}}$, 10 ⁻³ mkm ²	6	85	1065

После использования МГК в осях главных компонент (ГК) на основании установленной границы были выделены зоны приуроченности высоко- и низкопродуктивных объектов (табл. 2).

В зоне I все объекты являются высокопродуктивными, в зонах III и IV – лишь часть. Зона II включает низкопродуктивные объекты. При попадании объекта в зоны I и II можно утверждать однозначно о принадлежности его к высоко- или низкопродуктивной группе. Более четкое разделение объектов зон III и IV по продуктивности получено после проведения дискриминантного анализа (рис. 1).

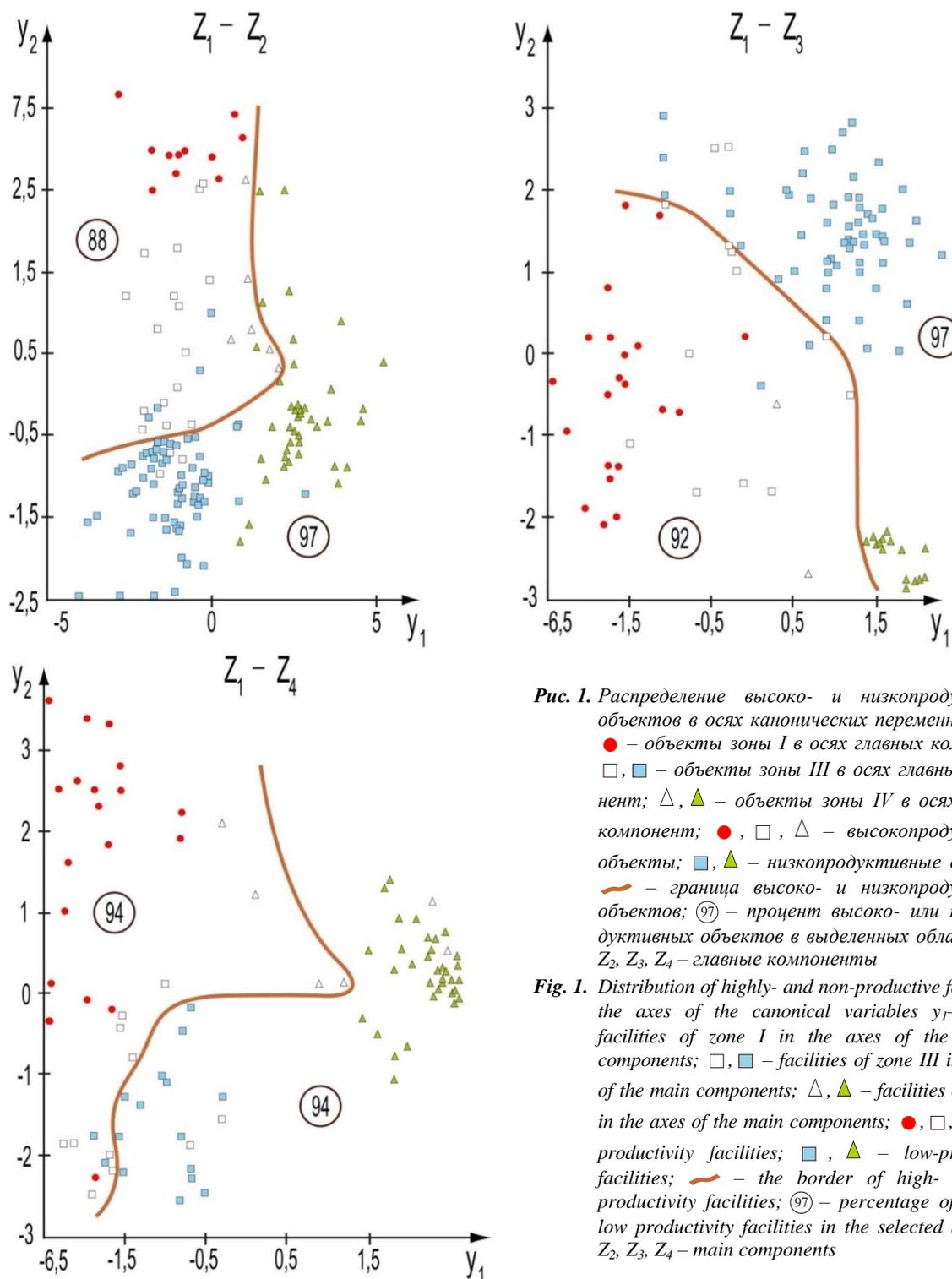


Рис. 1. Распределение высоко- и низкопродуктивных объектов в осях канонических переменных y_1 - y_2 :
 ● – объекты зоны I в осях главных компонент;
 □, ■ – объекты зоны III в осях главных компонент; △, ▲ – объекты зоны IV в осях главных компонент;
 ●, □, △ – высокопродуктивные объекты; ■, ▲ – низкопродуктивные объекты;
 — граница высоко- и низкопродуктивных объектов; 97 – процент высоко- или низкопродуктивных объектов в выделенных областях; Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 – главные компоненты

Fig. 1. Distribution of highly- and non-productive facilities in the axes of the canonical variables y_1 - y_2 :
 ● – facilities of zone I in the axes of the principal components; □, ■ – facilities of zone III in the axes of the main components; △, ▲ – facilities of zone IV in the axes of the main components; ●, □, △ – high productivity facilities; ■, ▲ – low-productivity facilities;
 — the border of high- and low-productivity facilities; 97 – percentage of high- or low productivity facilities in the selected areas; Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 – main components

Таблица 2. Интервалы изменения значений главных компонент зон высоко- и низкопродуктивных объектов

Table 2. Changes in the values of the main components of the zones of high and low productivity objects

Оси главных компонент Principal component axes	Главные компоненты Principal components	Значения интервалов изменения значений главных компонент по зонам Values of the intervals of changes in the values of the main components by zones			
		I	II	III	IV
$Z_1 - Z_2$	Z_1	-2,0...0,7	0,7...4,0	0,7...4,0	-0,5...0,1
	Z_2	-1,0...4,0	0,5...1,5	0,5...-1,0	0,7...0,4
$Z_1 - Z_3$	Z_1	0,7...4,0	-2,0...0,7	0,7...4,0	-0,5...0,1
	Z_3	0,7...5,0	-1,0...5,0	-0,5...0,7	-0,1...0,5
$Z_1 - Z_4$	Z_1	0,7...4,0	2,0...0,7	0,7...4,0	-0,5...0,1
	Z_4	0,7...2,0	-3,0...2,0	0,7...-0,7	-0,3...0,5

В осях канонических переменных y_1 – y_2 процент высоко- или низкопродуктивных объектов в выделенных областях составляет от 88 до 97 %, что является высоким показателем. Для сравнения аналогичная операция была проведена при граничных значениях $K_{\text{прод}}$ равных 6, 8, 12, 14, 16, 18, 20 т/сут/МПа, откуда видно (рис. 2), что при значении $K_{\text{прод}}=10$ т/сут/МПа объекты наиболее четко делятся на высоко- и низкопродуктивные.

Анализ распределений, представленных на рис. 2, и уравнений канонических переменных (табл. 3) показывает, что разделение залежей по продуктивности обуславливается как емкостно-фильтрационными, так и толщинными свойствами пластов, а также свойствами пластовых флюидов и условиями залегания. В среднем по высокопродуктивным объектам эти параметры больше. Низкопродуктивные объекты в среднем имеют большие значения вязкости и плотности пластовой нефти. Однако четко поставить в соответствие граничному значению коэффициента продуктивности граничное значение какого-либо параметра, как видно из рис. 3, не представляется возможным. Иначе говоря, продуктивность залежей характеризуется комплексом значений параметров пласта и насыщающих его флюидов и лишь определенный набор этих значений позволяет оценить ее.

Таблица 3. Уравнения канонических переменных y_1 – y_2 для разделения залежей по продуктивности

Table 3. Equations of canonical variables y_1 – y_2 for deposits separation by their productivity

Для зоны III, IV в координатах For zone III, IV in coordinates	Уравнение Equation	Номер уравнения Equation number
Z_1 – Z_2	$y_1 = 46,5 + 0,052H_3 + 0,058m_k - 7,05K_n + 0,12\mu_0 - 0,004\rho_n - 0,128t_{\text{пл}} - 0,002K_{\text{прон}}$	(5)
	$y_2 = 1,25 + 0,072H_3 + 0,217m_k - 3,579K_n - 0,018\mu_0 - 0,007t_{\text{пл}} + 0,007K_{\text{прон}}$	(6)
Z_1 – Z_3	$y_1 = -12,02 - 0,187H_3 + 0,018\rho_n - 0,0002H_{\text{зал}} - 0,021G - 0,004 K_{\text{прон}}$	(7)
	$y_2 = -5,07 - 0,008H_3 - 0,0009\rho_n + 0,003H_{\text{зал}} - 0,01G + 0,002K_{\text{прон}}$	(8)
Z_1 – Z_4	$y_1 = 29,78 - 0,01H_3 - 0,178m_r + 0,009\rho_n - 0,002H_{\text{зал}} - 0,102t_{\text{пл}} - 0,005K_{\text{прон}}$	(9)
	$y_2 = 27,31 + 0,057H_3 + 0,345m_r - 0,009\rho_n - 0,001H_{\text{зал}} - 0,077t_{\text{пл}} + 0,0005K_{\text{прон}}$	(10)

Иначе говоря, при составлении проектных документов оценку $K_{\text{прод}}$ необходимо проводить по значениям параметров, входящих в уравнения ГК, и по расположению объектов в пространстве первых четырех главных компонент. В случае если объект попал в трех плоскостях в зоны I и II, можно однозначно утверждать о принадлежности его к высоко- или низкопродуктивной группам. В случае попадания объекта в зоны неопределенности (зоны III, IV) необ-

ходимо рассчитать значения канонических переменных для него и определить его местоположение на плоскости (рис. 1).

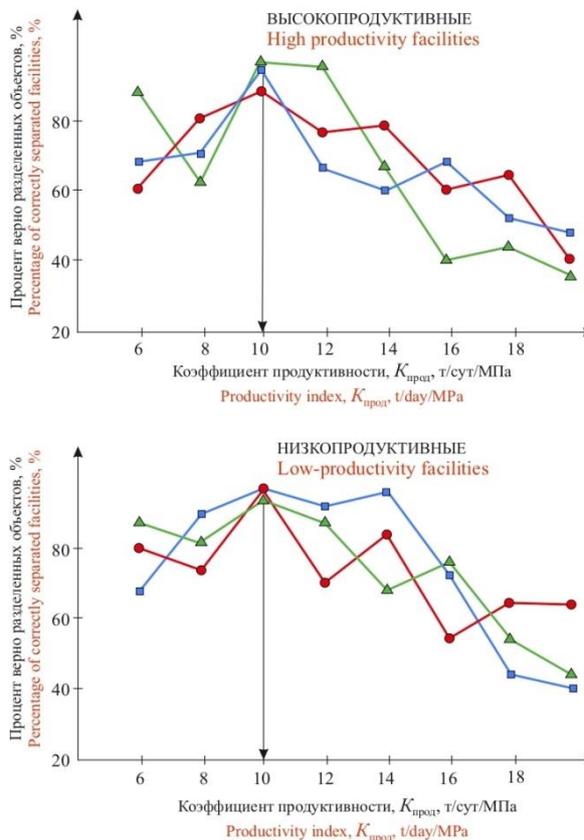


Рис. 2. Эффективность разделения высоко- и низкопродуктивных объектов при различных граничных значениях продуктивности: ● – для залежей зон в осях Z_1 – Z_2 ; ■ – для залежей зон в осях Z_1 – Z_3 ; ▲ – для залежей зон в осях Z_1 – Z_4

Fig. 2. Efficiency of high- and low-productivity facilities separation at various boundary values of productivity: ● – for reservoirs of zones in the axes Z_1 – Z_2 ; ■ – for reservoirs of zones in the axes Z_1 – Z_3 ; ▲ – for reservoirs of zones in the axes Z_1 – Z_4

При оценке продуктивности залежей в стадии проведения геологоразведочных работ необходимо знать среднее значение коэффициента проницаемости, которое входит в уравнения (1)–(10). В этой стадии определение его возможно на основании лабораторных исследований ядра или использования эталонных зависимостей проницаемости от пористости, построенных для залежей, близких по строению и коллекторским свойствам исследуемой.

Использование этих зависимостей возможно, если имеются значения пористости по ядру, однако незначительная погрешность при определении средних значений пористости по ядру и по данным геофизических исследований (рис. 4) позволяет оценивать проницаемость и в случае, если ядро по залежи не был отобран. Проницаемость, определенная таким образом, будет довольно приближенной, однако для

решения задачи качественного разделения объектов по продуктивности в условиях отсутствия более надежной информации ее использование будет вполне оправданным. Наличие тесной взаимосвязи

между параметрами m_k и m_r (рис. 4) также позволяет в формулах (1)–(10) заменить m_k на m_r в случае отсутствия керна и лабораторных исследований его пористости.

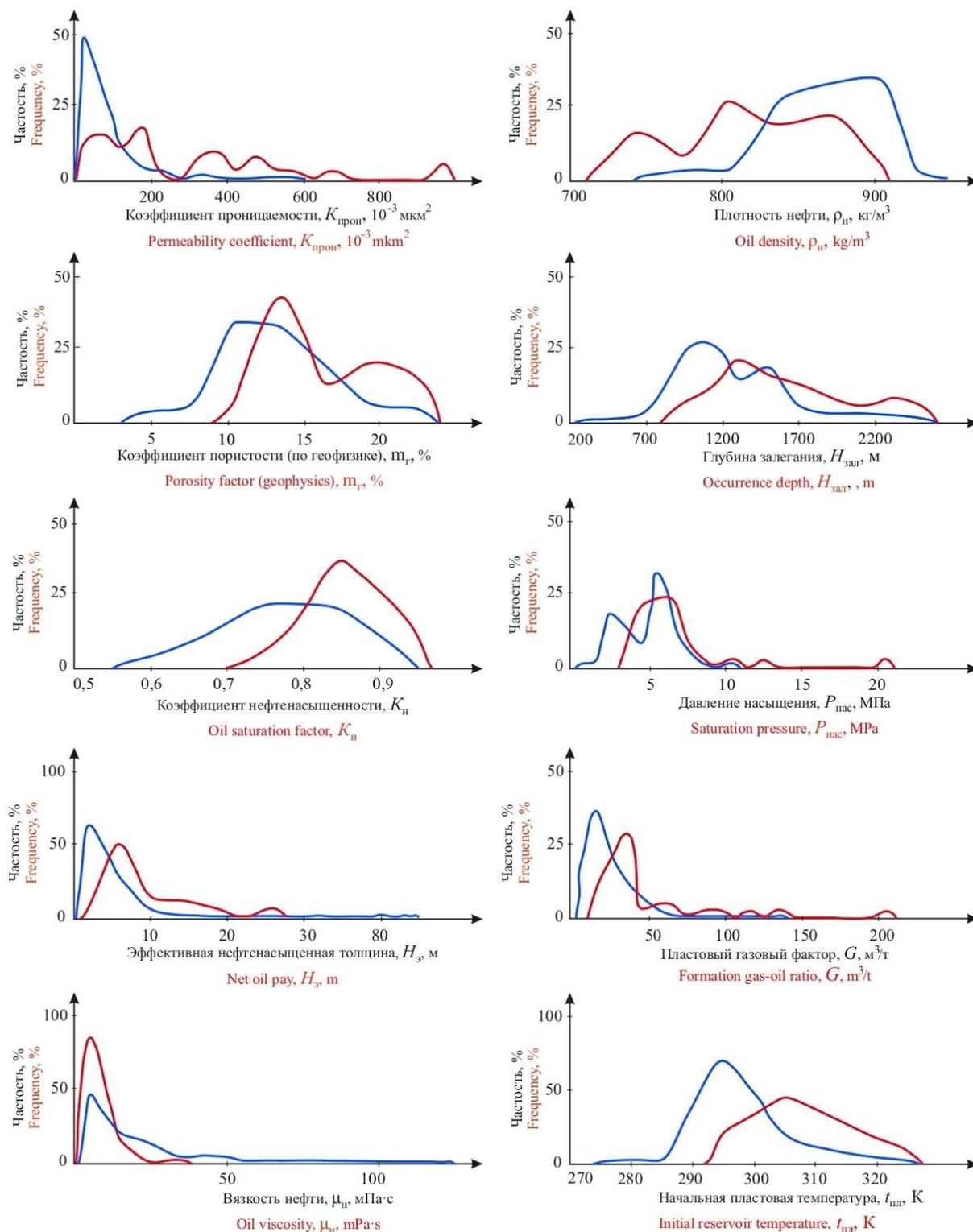


Рис. 3. Плотность распределения параметров высоко- и низкопродуктивных объектов: — кривая распределения низкопродуктивных объектов; — кривая распределения высокопродуктивных объектов

Fig. 3. Density of high- and low-productivity facilities parameters distribution: — distribution curve of low-productivity facilities; — distribution curve of high-productivity facilities

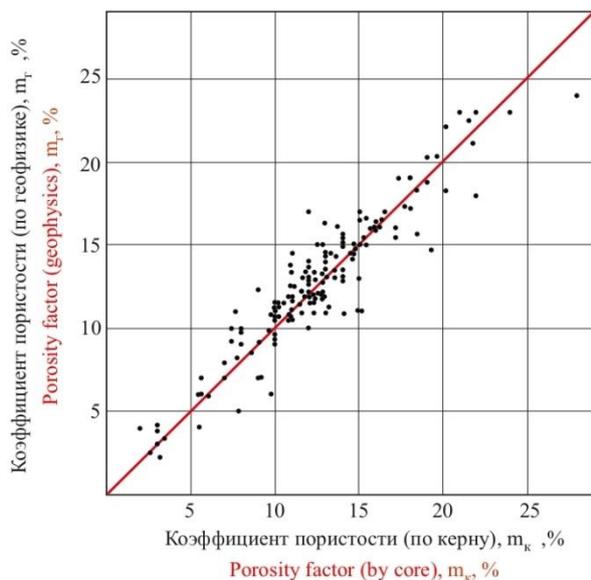


Рис. 4. Сопоставление значений определения пористости по керну (m_k) и по данным геофизических исследований (m_g)

Fig. 4. Comparison of the values of porosity determination on core (m_k) and on geophysical studies data (m_g)

Выводы

1. Установлено, что граничным значением коэффициента продуктивности залежей нефти в карбонатных коллекторах, разделяющим месторождения на высоко- и низкопродуктивные, является значение, равное 10 т/сут/МПа.
2. Выявлены геолого-физические параметры продуктивных карбонатных пород, оказывающие

превалирующее влияние на формирование добычных возможностей залежей.

3. Создана методика разделения эксплуатационных объектов на месторождениях с карбонатными коллекторами Волго-Уральской нефтегазоносной провинции по продуктивности с использованием данных, определение которых достаточно надёжно проводится на стадии окончания геологоразведочных мероприятий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Муслимов Р.Х. Современные методы повышения нефтеизвлечения: проектирование, оптимизация и оценка эффективности. – Казань: ФЭН, 2005. – 688 с.
2. Economides J.M., Nolte K.I. Reservoir stimulation. – West Sussex, England: John Wiley and Sons, 2000. – 856 p.
3. Мухаметшин В.В., Кулешова Л.С. Обоснование систем заводнения низкопродуктивных залежей нефти в условиях ограниченного объема информации // SOCAR Proceedings. – 2019. – № 2. – С. 16–22. DOI: 10.5510/OGP20190200384.
4. Byrnes A.P., Bhattacharya S. Influence of initial and residual oil saturation and relative permeability on recovery from transition zone reservoirs in shallow-shelf carbonates // SPE/DOE Symposium on Improved Oil Recovery. – Tulsa, Oklahoma, USA, 22–26 April 2006. – 11 p. DOI: 10.2118/99736-MS.
5. Мухаметшин В.В. Оценка эффективности использования нанотехнологий после завершения строительства скважин, направленных на ускорение ввода месторождений нефти в разработку // Нанотехнологии в строительстве. – 2018. – Т. 10. – № 1. – С. 113–131. DOI: 10.15828/2075-8545-2018-10-1-113-131.
6. Мухаметшин В.В. Повышение эффективности управления объектами добычи нефти с использованием метода аналогий // SOCAR Proceedings. – 2020. – № 4. – С. 42–50. DOI: 10.5510/OGP20200400464.
7. Back M.J., Kirk G. An integrated portfolio management approach for more effective business planning // SPE Hydrocarbon Economics and Evaluation Symposium. – Calgary, Alberta, Canada, 24–25 September 2012. – 12 p. DOI: 10.2118/162748-MS.
8. Оптимизация выработки запасов из водонефтяных зон горизонта D3rs Шкаловского нефтяного месторождения с помощью горизонтальных скважин / Р.Ф. Якупов, В.Ш. Мухаметшин, И.Н. Хахимзянов, В.Е. Трофимов // Георесурсы. – 2019. – Т. 21. – № 3. – С. 55–61. DOI: 10.18599/grs.2019.3.55-61.
9. Burchette T. Carbonate rocks and petroleum reservoirs: a geological perspective from the industry // Geological Society of London Special Publications. – 2012. – V. 370. – P. 17–37.
10. Roehl P.O., Choquette P.W. Carbonate petroleum reservoirs. – New York: Springer-Verlag, 1985. – 622 p.
11. Innovative characterization of tight sandstones from Paleozoic basins in Poland using X-ray computed tomography supported by nuclear magnetic resonance and mercury porosimetry / P. Krakowska, E. Puskarczyka, M. Jędrychowski, M. Habrata, P. Madejski, M. Dohnalik // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2018. – V. 166. – P. 389–405. DOI: 10.1016/j.petrol.2018.03.052.
12. Sander R., Pan Z., Connell L.D. Laboratory measurement of low permeability unconventional gas reservoir rocks: a review of experimental methods // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2016. – V. 37. – P. 248–279. DOI: 10.1016/j.jngse.2016.11.041.
13. Alvarado V., Thyne G., Murrell G.R. Screening strategy for chemical enhanced oil recovery in Wyoming basin // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. – Denver, Colorado, USA, 21–24 September 2008. – 14 p. DOI: 10.2118/115940-MS.
14. Yakupov R.F., Mukhametshin V.Sh., Tyncherov K.T. Filtration model of oil coning in a bottom water-drive reservoir // Periodico Tchê Quimica. – 2018. – V. 15. – Iss. 30. – P. 725–733.
15. Мухаметшин В.В., Андреев В.Е. Повышение эффективности оценки результативности технологий, направленных на расширение использования ресурсной базы месторождений с трудноизвлекаемыми запасами // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 8. – С. 30–36.
16. Дмитриевский А.Н. Ресурсно-инновационная стратегия развития экономики России // Нефтяное хозяйство. – 2017. – № 5. – С. 6–7.
17. Геологические и технологические особенности создания гибких типовых шаблонов геологического моделирования / К.Е. Закревский, В.Л. Попов, А.Е. Лепилин, Е.А. Рыжиков // Нефтяное хозяйство. – 2020. – № 11. – С. 38–43. DOI: 10.24887/0028-2448-2020-11-38-43.
18. Мухаметшин В.В., Кулешова Л.С. О снижении уровня неопределенности при управлении заводнением залежей с трудноизвлекаемыми запасами // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 5. – С. 140–146. DOI 10.18799/24131830/2020/5/2644.

19. Use of hydrochloric acid to remove filter-cake damage from preformed particle gel during conformance-control treatments / A. Imqam, B. Bai, M. Wei, H. Elue, F.A. Muhammed // SPE Production & Operations. – 2016. – V. 31. – № 3. – 11 p. DOI: 10.2118/172352-PA.
20. Системное решение технологических проблем заканчивания строительства скважин / В.Н. Поляков, Ю.В. Зейгман, Ю.А. Котенёв, В.В. Мухаметшин, Ш.Х. Султанов, А.П. Чижов // Нанотехнологии в строительстве. – 2018. – Т. 10. – № 1. – С. 72–87. DOI: 10.15828/2075-8545-2018-10-1-72-87.
21. Рогачев М.К., Мухаметшин В.В. Контроль и регулирование процесса солянокислотного воздействия на призабойную зону скважин по геолого-промысловым данным // Записки Горного института. – 2018. – Т. 231. – С. 275–280. DOI: 10.25515/PMI.2018.3.275.
22. Ахметов Р.Т., Андреев А.В., Мухаметшин В.В. Методика прогноза остаточной нефтенасыщенности и коэффициента вытеснения по данным геофизических исследований для оценки эффективности применения нанотехнологий // Нанотехнологии в строительстве. – 2017. – Т. 9. – № 5. – С. 116–133. DOI: 10.15828/2075-8545-2017-9-5-116-133.
23. Kuleshova L.S., Mukhametshin V.V., Safiullina A.R. Applying information technologies in identifying the features of deposit identification under conditions of different oil-and gas provinces // Journal of Physics: Conference Series (ITBI 2019 – International Conference «Information Technologies in Business and Industry»). – 2019. – V. 1333. – Iss. 7 (072012). – P. 1–5. DOI: 10.1088/1742-6596/1333/7/072012.
24. Идентификация слабо выработанных зон на месторождениях с трудноизвлекаемыми запасами / И.Ф. Хатмуллин, Е.И. Хатмуллина, А.Т. Хамитов, Р.А. Гималетдинов, С.Е. Мезиков // Нефтяное хозяйство. – 2015. – № 1. – С. 74–79.
25. Шустеф И.Н. О зависимости нефтеотдачи от продуктивности и гидропроводности пластов // РНГС Нефтегазовая геология и геофизика. – 1976. – № 8. – С. 15–16.
26. Шустеф И.Н. Геологические основы технологических решений в разработке нефтяных месторождений. – М.: Недра, 1988. – 199 с.

Поступила 28.10.2021 г.

Информация об авторах

Мухаметшин В.Ш., доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий кафедрой разведки и разработки нефтяных и газовых месторождений, директор, филиал Уфимского государственного нефтяного технического университета в г. Октябрьском.

Кулешова Л.С., кандидат технических наук, доцент, преподаватель кафедры разведки и разработки нефтяных и газовых месторождений, заместитель директора по УР, филиал Уфимского государственного нефтяного технического университета в г. Октябрьском.

Сафиуллина А.Р., техник кафедры разведки и разработки нефтяных и газовых месторождений, филиал Уфимского государственного нефтяного технического университета в г. Октябрьском.

UDC 622.276.63

GROUPING AND DETERMINING OIL RESERVOIRS IN CARBONATE RESERVOIRS BY THEIR PRODUCTIVITY AT THE STAGE OF GEOLOGICAL EXPLORATION

Vyacheslav Sh. Mukhametshin¹,
vsh@of.ugntu.ru

Lyubov S. Kuleshova¹,
markl212@mail.ru

Albina R. Safiullina¹,
safiullina.a.r@yandex.ru

¹ Ufa State Petroleum Technological University, Branch of the University in the City of Oktyabrsky, 54a, Devonskaya street, Oktyabrsky, 452607, Russia.

The relevance of the study is caused by the need to assess the productivity of fields in the Volga-Ural oil and gas province which are composed of a carbonate reservoir at the stage of project documents compiling with the aim of determining the profitability and development strategy of these facilities, as significant oil reserves are concentrated there and they are classified as hard-to-recover. Solving this problem allows us to expand the resource base of the region and minimize risks in making management decisions.

The purpose of the research is to group objects in carbonate reservoirs with the creation of a methodology for classifying objects going out from exploration into the category of high or low productivity applying indirect data.

Objects: oil deposits in carbonate reservoirs of the Volga-Ural oil and gas province.

Methods. The method of geological field analysis, some types of factor analysis were used when grouping.

Results. It was found that the boundary value of the oil deposits productivity index in carbonate reservoirs, referring the fields into high- and low-productivity, is a value equal to 10 t/day/MPa. It is shown that the separation of deposits by productivity is determined by the reservoir-filtration and thickness properties of the reservoir rocks, as well as the bedding conditions and the reservoir fluids properties. On average, these parameters are higher for highly productive facilities. Low-productivity objects, on average, have high reservoir oil viscosity and density values. It is impossible to clearly match the boundary value of the productivity coefficient to the boundary value of any parameter, since the productivity of the deposits is characterized by a complex of values of the reservoir parameters and the fluids saturating it, and only a set of these values makes it possible to evaluate it. A method was created for differentiating development facilities in Volga-Ural oil and gas province carbonate reservoirs by productivity index basing on indirect data to solve the problems of identifying production facilities in multi-layer fields; comparison of the facilities while conducting the development analysis, etc.

Key words:

Productivity index, oil, carbonate reservoirs, development efficiency, geological and physical properties of rocks.

REFERENCES

- Muslimov R.Kh. *Sovremennyye metody povysheniya nefteizvlecheniya: proektirovaniye, optimizatsiya i otsenka effektivnosti* [Modern methods of oil recovery increasing: design, optimization and performance evaluation]. Kazan, FEN Publ., 2005. 688 p.
- Economides J.M., Nolte K.I. *Reservoir stimulation*. West Sussex, England, John Wiley and Sons, 2000. 856 p.
- Mukhametshin V.V., Kuleshova L.S. Justification of low-productive oil deposits flooding systems in the conditions of limited information amount. *SOCAR Proceedings*, 2019, no. 2, pp. 16–22. DOI: 10.5510/OGP20190200384. In Rus.
- Byrnes A.P., Bhattacharya S. Influence of initial and residual oil saturation and relative permeability on recovery from transition zone reservoirs in shallow-shelf carbonates. *SPE/DOE Symposium on Improved Oil Recovery*. Tulsa, Oklahoma, USA, April 22–26, 2006. 11 p. DOI: 10.2118/99736-MS.
- Mukhametshin V.V. Efficiency estimation of nanotechnologies applied in constructed wells to accelerate field development. *Nanotechnologies in Construction*, 2018, vol. 10, no. 1, pp. 113–131. In Rus. DOI: 10.15828/2075-8545-2018-10-1-113-131.
- Mukhametshin V.V. Oil production facilities management improving using the analogy method. *SOCAR Proceedings*, 2020, no. 4, pp. 42–50. DOI: 10.5510/OGP20200400464. In Rus.
- Back M.J., Kirk G. An integrated portfolio management approach for more effective business planning. *SPE Hydrocarbon Economics and Evaluation Symposium*. Calgary, Alberta, Canada, September 24–25, 2012. 12 p. DOI: 10.2118/162748-MS.
- Yakupov R.F., Mukhametshin V.Sh., Khakimzyanov I.N., Trofimov V.E. Optimization of reserve production from water oil zones of D3ps horizon of Shkapovsky oil field by means of horizontal wells. *Georesursy*, 2019, vol. 21, no. 3, pp. 55–61. DOI: 10.18599/grs.2019.3.55-61.
- Burchette T. Carbonate rocks and petroleum reservoirs: a geological perspective from the industry. *Geological Society of London Special Publications*, 2012, vol. 370, pp. 17–37.
- Roehl P.O., Choquette P.W. *Carbonate petroleum reservoirs*. New York, Springer-Verlag, 1985. 622 p.
- Krakowskaa P., Puskarczyka E., Jędrychowskib M., Habrata M., Madejskic P., Dohnalikd M. Innovative characterization of tight sandstones from Paleozoic basins in Poland using X-ray computed tomography supported by nuclear magnetic resonance and mercury porosimetry. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, vol. 166, pp. 389–405. DOI: 10.1016/j.petrol.2018.03.052.
- Sander R., Pan Z., Connell L.D. Laboratory measurement of low permeability unconventional gas reservoir rocks: a review of experimental methods. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, vol. 37, pp. 248–279. DOI: 10.1016/j.jngse.2016.11.041.
- Alvarado V., Thyne G., Murrell G.R. Screening strategy for chemical enhanced oil recovery in Wyoming basin. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Denver, Colorado, USA, September 21–24, 2008. 14 p. DOI: 10.2118/115940-MS.
- Yakupov R.F., Mukhametshin V.Sh., Tyncherov K.T. Filtration model of oil coning in a bottom water-drive reservoir. *Periodico Tche Quimica*, 2018, vol. 15, Iss. 30, pp. 725–733.
- Mukhametshin V.V., Andreev V.E. Increasing the efficiency of assessing the performance of techniques aimed at expanding the use of resource potential of oilfields with hard-to-recover reserves. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 8, pp. 30–36. In Rus.

16. Dmitrievskiy A.N. Resource-innovative strategy for the development of the Russian economy. *Neftyanoe khozyaystvo = Oil Industry*, 2017, no. 5, pp. 6–7. In Rus.
17. Zakrevskiy K.E., Popov V.L., Lepilin A.E., Ryzhikov E.A. Geological and technological features of creating flexible typical templates for geological modeling. *Neftyanoe khozyaystvo = Oil Industry*, 2020, no. 11, pp. 38–43. In Rus. DOI: 10.24887/0028-2448-2020-11-38-43.
18. Mukhametshin V.V., Kuleshova L.S. On uncertainty level reduction in managing waterflooding of the deposits with hard to extract reserves. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 5, pp. 140–146. In Rus. DOI: 10.18799/24131830/2020/5/2644.
19. Imqam A., Bai B., Wei M., Elue H., Muhammed F.A. Use of hydrochloric acid to remove filter-cake damage from preformed particle gel during conformance-control treatments. *SPE Production & Operations*, 2016, vol. 31, no. 3, 11 p. DOI: 10.2118/172352-PA.
20. Polyakov V.N., Zeigman Yu.V., Kotenev Yu.A., Mukhametshin V.V., Sultanov Sh.Kh., Chizhov A.P. System solution for technological problems of well construction completion. *Nanotechnologies in Construction*, 2018, vol. 10, no. 1, pp. 72–87. In Rus. DOI: 10.15828/2075-8545-2018-10-1-72-87.
21. Rogachev M.K., Mukhametshin V.V. Control and regulation of the hydrochloric acid treatment of the bottomhole zone based on field-geological data. *Journal of Mining Institute*, 2018, vol. 231, pp. 275–280. DOI: 10.25515/PMI.2018.3.275.
22. Akhmetov R.T., Andreev A.V., Mukhametshin V.V. Residual oil saturation and the displacement factor prediction methodology based on geophysical studies data to evaluate efficiency of nanotechnologies application. *Nanotechnologies in Construction*, 2017, vol. 9, no. 5, pp. 116–133. In Rus. DOI: 10.15828/2075-8545-2017-9-5-116-133.
23. Kuleshova L.S., Mukhametshin V.V., Safiullina A.R. Applying information technologies in identifying the features of deposit identification under conditions of different oil-and gas provinces. *Journal of Physics: Conference Series (ITBI 2019 – International Conference «Information Technologies in Business and Industry»)*, 2019, vol. 1333, Iss. 7 (072012), pp. 1–5. DOI: 10.1088/1742-6596/1333/7/072012.
24. Khatmullin I.F., Khatmullina E.I., Khamitov A.T., Gimaletdinov R.A., Mezikov S.E. Identification of zones with poor displacement in fields with hard-to-recover reserves. *Neftyanoe khozyaystvo = Oil Industry*, 2015, no. 1, pp. 74–79. In Rus.
25. Shustef I.N. O zavisimosti nefteotdachi ot produktivnosti i gidroprovodnosti plastov [On the dependence of oil recovery on the productivity and hydroconductivity of layers]. *RNGS Neftgazovaya geologiya i geofizika*, 1976, no. 8, pp. 15–16.
26. Shustef I.N. *Geologicheskie osnovy tekhnologicheskikh resheniy v razrabotke neftyanykh mestorozhdeniy* [Geological bases of technological solutions in the development of oil fields]. Moscow, Nedra Publ., 1988. 199 p.

Received: 28 October 2021.

Information about the authors

Vyacheslav Sh. Mukhametshin, Dr. Sc., professor, head of the Department of Oil and Gas Field Exploration and Development, director, Ufa State Petroleum Technological University, Branch of the University in the City of Oktyabrsky.

Lyubov S. Kuleshova, Cand. Sc., associate professor, deputy director for Academic Affairs, Ufa State Petroleum Technological University, Branch of the University in the City of Oktyabrsky.

Albina R. Safiullina, technician, Ufa State Petroleum Technological University, Branch of the University in the City of Oktyabrsky.

УДК 528.88:502.36:004.94

ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТРУБОПРОВОДНОГО ТРАНСПОРТА

Долгополов Даниил Валентинович¹,
daniil.dolgopolov@gmail.co

Мелкий Вячеслав Анатольевич²,
vamelkiy@mail.ru

Верхотуров Алексей Александрович²,
ussr-91@mail.ru

¹ АО «СпейсИнфо Геоматикс»,
Россия, 127490, г. Москва, ул. Декабристов, 51.

² Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН,
Россия, 693022, г. Южно-Сахалинск, ул. Науки, 1Б.

Актуальность исследования определяется необходимостью минимизации потерь на всех этапах цикла переработки и транспортировки углеводородного сырья и снижения загрязнения окружающей среды при утечках на трубопроводах. Обеспечение безопасности функционирования трубопроводных систем требует выполнения оперативных оценок ситуаций на любом из природных и хозяйственных объектов в пределах участка трубопровода. Наиболее совершенными инструментами для решения аналитических задач являются технологии геоинформационного картографирования. Общее назначение создаваемых картографических изображений – помощь в организации безопасного размещения промышленных объектов при строительстве и выполнении эколого-геодинамического мониторинга во время эксплуатации трубопроводов.

Цель: проанализировать возможности применения различной геопространственной информации, способствующей безопасной эксплуатации трубопроводных систем, обрабатываемой посредством геоинформационных технологий. Для достижения цели в работе изучен отечественный и международный опыт предотвращения и ликвидации разливов нефти, разработаны требования к ГИС-технологии, аккумулирующей информацию о природных и техногенных процессах.

Объекты. Состав информации и модулей для моделирования обстановки в составе ГИС должны содержать программные средства для анализа состояния составляющих объектов трубопроводной инфраструктуры: основных и резервных ниток, лупингов, ответвлений, отводов, площадочных и внутриплощадочных объектов, производственных зданий и сооружений, резервуаров, технологических трубопроводов и т. д., а также составления картографических материалов для обеспечения мероприятий по предупреждению и организации ликвидации аварийных ситуаций.

Методы: дешифрирование аэрокосмических изображений трубопроводных систем, анализ материалов космических съемок, данных беспилотных летательных аппаратов и воздушного лазерного сканирования, изучение возможностей технологий геоинформационного картографирования, компьютерное моделирование состояния природно-техногенных комплексов.

Результаты. Произведен анализ нормативных документов, определяющих состав информации, необходимой для формирования тематических слоёв ГИС о состоянии компонентов окружающей среды и динамики природных процессов вдоль трасс трубопроводных систем. Модули информационной системы концентрируют данные о нарушенности и загрязненности среды, позволяющие создать карты сценариев техногенного воздействия и сформулировать рекомендации по оценке состояния и снижению негативных последствий. Экологическая безопасность транспорта углеводородов обеспечивается посредством моделирования развития природных процессов, оказывающих негативное влияние на объекты трубопроводной системы. Так, при затоплении участков трубопроводов во время наводнений, а также при попадании нефти и нефтепродуктов в водотоки необходимо использовать высокоточные цифровые модели рельефа. Предлагается включение в состав системы модулей, поддерживающих анализ данных наблюдений, способствующих принятию решений в зависимости от сценариев динамики процессов, сопровождающихся аварийными разливами нефти.

Выводы. Значимость проведенных исследований заключается в разработанной методике решения ряда вопросов, способствующих принятию решений по минимизации риска вероятных аварий при эксплуатации трубопроводных систем. Практическая значимость предлагаемой технологии сбора и обработки первичной информации для наполнения баз данных геоинформационных систем заключается в том, что она позволяет получать сведения, достаточные для принятия решений при подготовке планов профилактических мероприятий и ликвидации аварийных разливов нефтепродуктов и организации аварийно-восстановительных работ.

Ключевые слова:

Геопространственные данные, дешифрирование аэрокосмических изображений, геоинформационные технологии, трубопроводные системы, транспорт углеводородов, цифровая модель рельефа, аварийные разливы нефти и нефтепродуктов, ASTER, DEM, SRTM.

Введение

Развитие регионов всецело зависит от их природно-ресурсного потенциала. В любом регионе существует система эколого-географических ограничений,

влияющих на режим природопользования и предопределяющих объемы необходимой информационной обеспеченности безопасной эксплуатации природно-техногенных комплексов. Среди основных

направлений решения экологических проблем, связанных с развитием транспортных трубопроводных систем, значимую позицию занимает организация мониторинга и моделирования возможных последствий воздействия на окружающую среду [1].

Трубопроводные транспортные системы, проходя через природные территории (рис. 1), образуют сложные техногенные комплексы [2, 3]. Местоположение таких природно-территориальных формирований определяется рядом признаков, которые проявляются в разнообразии ландшафтных формаций, связанных с определенным воздействием объектов трубопроводов и их инфраструктуры.

Некоторые события (ЧС, изменение природной среды), связанные с эксплуатацией трубопроводных систем, оказывают существенное влияние на природ-

ную среду и могут повлечь за собой огромные материальные потери и существенные экологические последствия. В то же время природные условия в районах прохождения трубопроводных систем оказывают влияние на состояние объектов трубопроводного транспорта.

Необходимость оперативной обработки и обеспечения обновленными данными определяет потребность в создании единой пространственной среды (геопространства) [4], ориентированной на задачи разных направлений и подразделений компаний, позволяющей анализировать данные эксплуатационных служб, геотехнического и экологического мониторинга, материалы полевых наблюдений и данные дистанционного зондирования Земли, а также обеспечивающей безопасную эксплуатацию трубопроводных систем [5].



Рис. 1. Схема расположения основных трубопроводных систем Дальнего Востока [6]

Fig. 1. Layout of the main pipeline systems of the Far East [6]

Общие требования к пространственным данным геоинформационных систем трубопроводного транспорта

Методологической базой при разработке геоинформационных систем для трубопроводного транспорта могут служить теоретические и методические работы ученых в области геоинформатики и мониторинга природно-территориальных комплексов, в которых обоснованы возможности использования аэро-

космических методов для создания тематических слоёв ГИС [7–16].

Быстрое изменение обстановки в районах прохождения трубопроводов требует проведения оперативного анализа ситуаций, которые складываются при возникновении неблагоприятных природных процессов. Геоинформационные системы, содержащие информацию, необходимую для формирования тематических слоёв о состоянии компонентов, динамике

процессов, нарушенности и загрязненности природной среды позволяют создать карты сценариев техногенного воздействия и сформулировать рекомендации по снижению негативных последствий. Технологиче-

ские схемы геоинформационного картографирования для оперативной оценки ситуации могут функционировать на основе реализации различных алгоритмов, однако суть их остается неизменной (рис. 2).

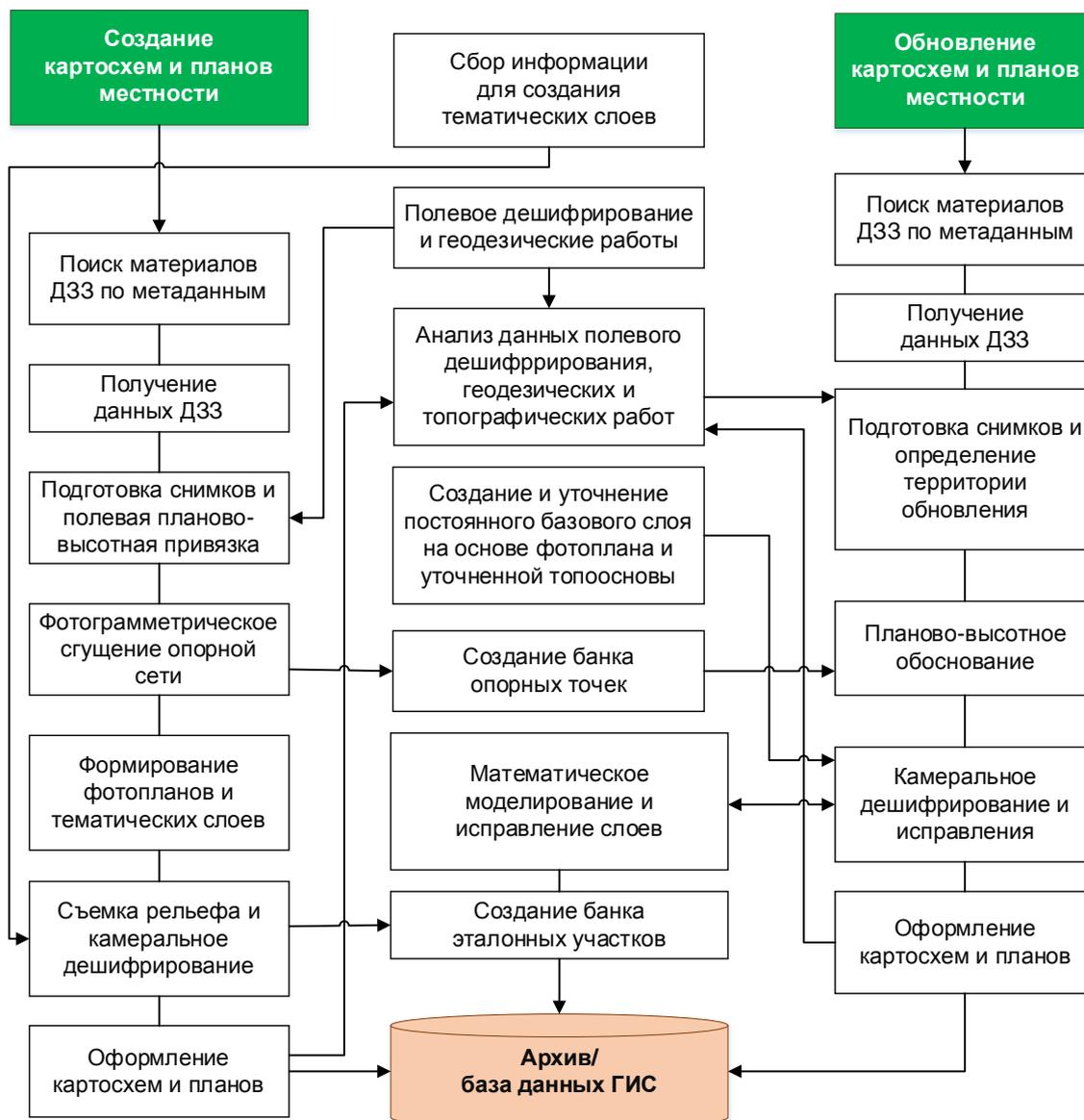


Рис. 2. Технология сбора и обработки первичной информации для наполнения геоинформационных систем трубопроводного транспорта

Fig. 2. Technology of collecting and processing primary information for filling geoinformation systems of pipeline transport

Формируя геопространство трубопроводного транспорта можно выделить общие требования к пространственным данным для всех направлений деятельности компаний, эксплуатирующих трубопроводные системы, определяемые в основном отраслевой спецификой, а также требования, связанные с производственной деятельностью по каждому направлению.

Общий состав пространственных данных может включать следующие группы данных:

- объекты линейной части трубопровода: основные нитки, резервные нитки, лупинги, ответвления, отводы и т. д.;

- структурное деление линейной части трубопровода (например, технологические участки);
- пересечения и сближения: подземные переходы через крупные водные преграды, малые водотоки, овраги и балки;
- границы и участки обслуживания/ответственности подразделений;
- площадочные объекты трубопроводного транспорта;
- внутриплощадочные сооружения: производственные здания, резервуары, технологические трубопроводы и т. д.;
- объекты, включенные в государственный кадастр недвижимости;

- зоны, ограничивающие размещение трубопроводного транспорта: населенные пункты, особо охраняемые природные территории и т. д.;
- объекты реконструкции и нового строительства;
- сторонние объекты и т. д.

Производственные задачи, решаемые разными подразделениями, предъявляют дополнительные требования к пространственной локализации, составу и актуальности данных для каждого участка трубопровода, которые могут существенно различаться в зависимости от условий прохождения трассы.

Магистральный нефтепровод при любом виде прокладки должен иметь охранную зону, которая устанавливается нормативными документами:

- ограниченную полосой в 25 м с каждой стороны от осевой линии;
- на подводных переходах, расположенную между параллельными плоскостями, проведенными в 100 м от осей крайних ниток трубопроводов с обеих сторон.

В то же время для решения производственных задач на переходах магистральных нефтепроводов через водные преграды потребность в пространственных данных не ограничивается 100 метрами [17].

В соответствии с руководящими документами пространственные данные должны включать сведения о следующих объектах:

- участках магистральных нефтепроводов (нефтепродуктопроводов), пересекающих водные преграды (рис. 3);
- акваториях с максимально-возможной площадью загрязнения нефтью (нефтепродуктами);
- местах установки приспособлений для локализации распространения нефти (нефтепродуктов) в акватории водотоков.

Геоинформационные системы для безопасной эксплуатации трубопроводов

В рамках обеспечения экологической безопасности транспорта нефти и нефтепродуктов геоинформационное обеспечение позволяет решать следующие задачи:

- ведения тематических пространственных данных, необходимых для проведения инженерно-экологических изысканий;
- ведения реестров источников загрязнения воздуха и воды;
- расчета предельно допустимых выбросов;
- ведения реестра водозаборных скважин;
- ведения наблюдений за водными объектами;
- сопровождения работ по рекультивации земель;
- информационного обеспечения в условиях ЧС;
- моделирования разливов нефти.



Рис. 3. Схема перехода магистрального нефтепровода через водную преграду

Fig. 3. Schematic map of the main oil-pipeline transition through water barrier

Геоинформационные технологии обеспечивают: сбор пространственных данных, их обработку, отображение в едином пространстве, интеграцию данных и знаний о территории для анализа, моделирования, прогнозирования, управления сохранением целостности окружающей среды [18–21].

Комплекс работ по формированию геоинформационного пространства включает: создание картографиче-

ской основы, загрузку цифровых тематических карт и материалов дистанционного зондирования Земли, оптимизацию сети наблюдений с использованием ГИС-анализа, проведение специальных съемок на местности, пробоотбора проб (почвы и воды), выполнение измерений, разработку и наполнение базы геоданных.

Функциональность геоинформационных систем для безопасной эксплуатации трубопроводного транспорта

может включать прогнозные модули, обеспечивающие комплексный анализ данных наблюдений, а также ситуационные модули принятия решения, позволяющие строить сценарии развития ситуации с учетом текущей ситуации и информации об окружающей среде. Наполнение баз данных геоинформационных систем должно осуществляться в объеме, необходимом для работы функциональных приложений (модулей) и решения производственных задач (рис. 4).

Особое место в составе систем, обеспечивающих безопасную эксплуатацию трубопроводов, занимают модули моделирования и прогнозирования динамики развития негативных процессов и нарушений функционирования бесперебойной работы трубопроводного транспорта в результате стихийных природных явлений.

Серьезные последствия могут возникать в результате воздействия стихийных природных процессов: при затоплении объектов инфраструктуры трубопроводных систем во время наводнений, возникновении пожаров вдоль трасс трубопроводов, подтаивания вечномёрзлых пород, повышении геодинамической активности территории, воздействии опасных морских явлений (нагонные и штормовые процессы, сложная ледовая обстановка) и т. д. Система мониторинга состояния объектов нефтегазового комплекса должна содержать модули для определения оценки риска. Рассмотрим состав информации, необходимой для моделирования некоторых природных процессов с целью снижения риска.

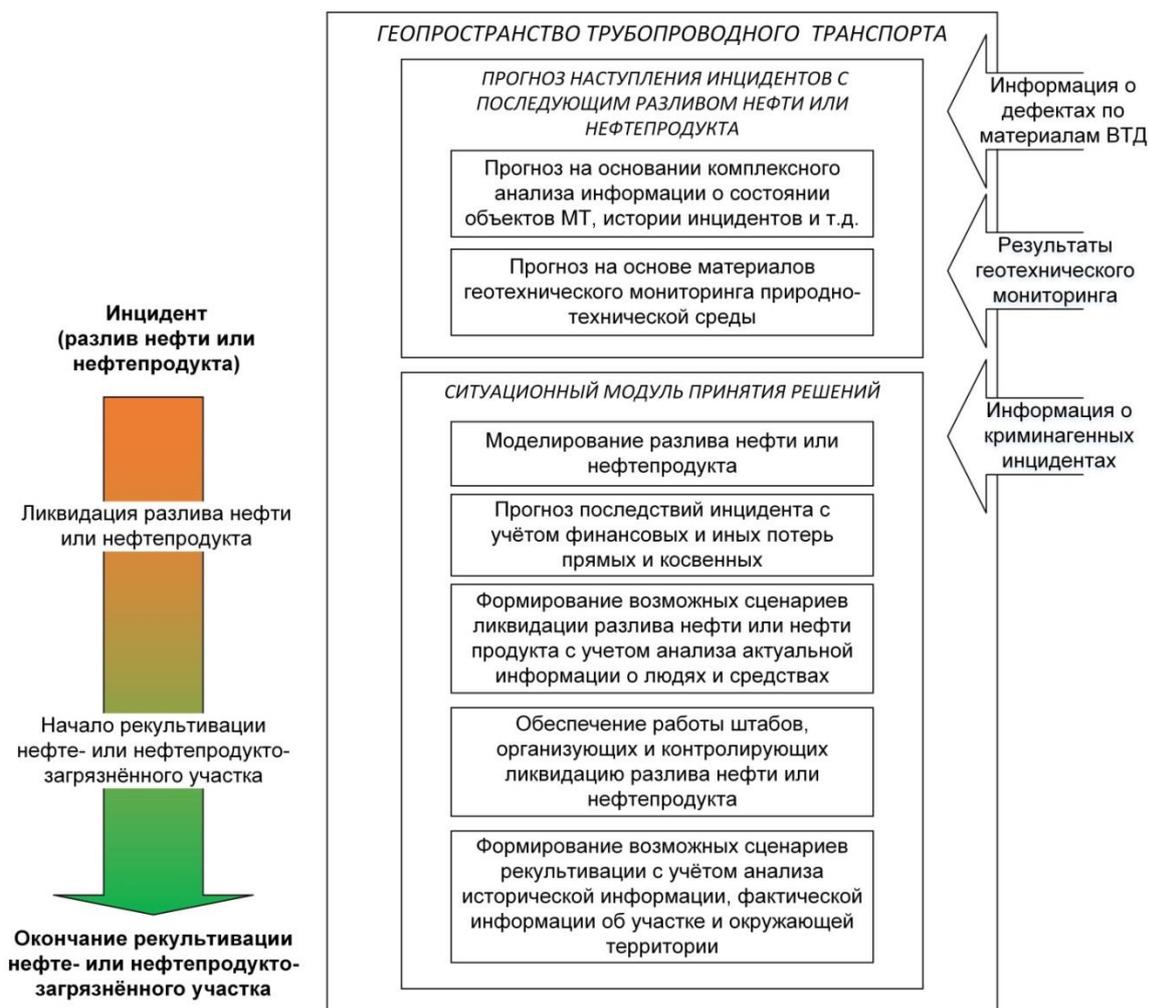


Рис. 4. Пример наполнения геоинформационного пространства для обеспечения аварийно-восстановительных работ после разлива нефти или нефтепродуктов, прогноза последствий инцидента с учетом финансовых и иных потерь прямых и косвенных

Fig. 4. Example of filling the geoinformation space for emergency recovery operations after an oil or petroleum spill, forecasting the consequences of an accident taking into account financial and other losses, direct and indirect

Моделирование русловых процессов – довольно сложная задача, потому что поток жидкости подвергается многочисленным воздействиям, вызывающим разноплановые возмущения. Математические модели позволяют получать количественные характеристики трансформации движущихся вод-

ных потоков [22–26]. Широкое распространение для решения гидрологических задач получили программные комплексы GRASS, SAGA, SWAT, в России – MIKE11 (Датского гидравлического института) и HEC-RAS (Центра инженерной гидрологии армии США) [27–29].

Система NEC-RAS состоит из четырех компонентов для анализа геометрии и состояния потока: 1) модуля расчета профиля поверхности воды с установившимся течением; 2) пакета моделирования нестационарного течения; 3) блока моделирования транспорта наносов; 4) модуля анализа качества воды. В дополнение к компонентам анализа система позволяет выполнять гидравлические расчеты после определения основных характеристик водного потока.

Геоинформационная система, предназначенная для обеспечения безопасной эксплуатации трубопроводов, должна аккумулировать картографические и гидрологические данные, необходимые для моделирования областей затопления [30]. Для моделирования необходимы сведения о строении речных долин, которые можно получить при исследовании цифровых моделей рельефа (ЦМР), с использованием информации гидрологических баз данных. Высокоточные ЦМР, созданные по материалам дистанционного зондирования, позволяют создавать корректные модели затоплений речных долин [31–34]. В базах ГИС также хранятся базовые картографические данные, материалы космических и аэрофотосъемок, в том числе с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и средств воздушного лазерного сканирования (ВЛС), оцифровки топографических карт [35–38]. При гидрологических исследованиях активно используются глобальные модели рельефа (ASTER GDEM, SRTM) [39–45]. Глобальные ЦМР SRTM1 dEM и ASTER GdEM, созданные по материалам радиолокационной интерферометрии в С- и Х-диапазонах радиоволн с борта космических аппаратов «Индевор» и «Тетта», обеспечивают моделирование затоплений [46–48].

Базы данных ГИС должны содержать разноплановую информацию. При строительстве и эксплуатации объектов, расположенных на вечномёрзлых грунтах и в зонах повышенной сейсмической активности, требуется проведение деформационного мониторинга [49, 50], для обеспечения анализа лесопирологической обстановки накапливаются сведения о состоянии растительных сообществ, так как горимость лесов зависит от состава древостоев. Регулярный комплексный экологический мониторинг служит информационной базой для проектирования мероприятий по снижению негативных процессов [51–53].

Планирование мероприятий по предупреждению и ликвидации аварийных разливов нефти и нефтепродуктов

В соответствии с Законодательством Российской Федерации предприятия, эксплуатирующие опасные производственные объекты, должны обеспечить ликвидацию последствий аварий, иметь штатных специалистов и технические средства для восстановительных работ [54].

Планы по ликвидации аварийных разливов нефти разрабатываются и осуществляются в соответствии с российским законодательством, а также руководствами по предотвращению и ликвидации аварийных разливов нефти, разработанными нефтяными компаниями [55]. Планы предусматривают:

- активное внедрение превентивных мер;
- комплексное обучение специалистов по ликвидации разливов нефти (ЛРН);
- немедленное реагирование в случае потенциального разлива нефти силами заранее созданных подразделений по ЛРН, располагающих хорошо обученными кадрами и необходимым оборудованием.

Серьезную работу приходится проделывать компаниям при подготовке планов ЛРН для трубопроводов, которые пересекают крупные водные преграды, в особенности морские проливы в дальневосточном регионе, где порой складывается сложная ледовая обстановка (рис. 5). План ЛРН компании «Эксон Нефтегаз Лимитед» для проекта «Сахалин-1» раскрывает аспекты ликвидации разливов нефти, описанные в виде двух отдельных книг, применительно к конкретным условиям Сахалинской области и Хабаровского края. План содержит сведения о составе и объеме мероприятий по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций, связанных с разливом нефти (ЧС(Н)), конкретизирует вопросы, рассмотренные в оперативных и территориальных планах.

План содержит конкретные сведения, касающиеся конкретных объектов, и справочные материалы. Основное внимание в Плане ЛРН уделяется вопросам организации практических действий, направленных на повышение эффективности мероприятий по реагированию и сведению к минимуму негативного воздействия на окружающую среду. Никакие экономические результаты производственной деятельности не важны настолько, чтобы ради них можно было пожертвовать безопасностью персонала и работ. Основная задача состоит в предотвращении аварий, (ЧС(Н)) и в обеспечении безопасности персонала.

Хочется отметить комплекс мер по предотвращению и уменьшению объемов потенциальных разливов нефти, предусмотренный для эксплуатации трубопроводных систем консорциума «Сахалин-1»:

- трубопроводы запроектированы с прочностью на разрыв, достаточной для сохранения целостности при сейсмических событиях, с периодом повторяемости в 1000 лет для участков, проложенных на суше, и 2000 – в морских условиях;
- промысловые трубопроводы обеспечены системой автоматического отключения при утечках с задвижками через каждые 30 км на всем протяжении от Чайво до Де-Кастри;
- введена в эксплуатацию современная технология измерения толщины стенок и диагностики коррозии с контролем электрического потенциала;
- проводятся плановые инспекции трубопроводов.

Заключение

Модули геоинформационной системы, аккумулирующие данные о нарушенности и загрязненности среды, должны обеспечивать создание карт сценариев техногенного воздействия и способствовать выработке рекомендаций по оценке состояния и снижению негативных последствий.



a/a



b/b

Рис. 5. Общий план трубопроводных систем, работающих в рамках проекта «Сахалин-1» (a), производственная площадка буровой установки «Ястреб» и береговой комплекс подготовки продукции на космическом снимке Landsat-8 (Сайт GoogleEarth). Фото В.А. Мелкого (б)

Fig. 5. General plan of the pipeline systems operating under the Sakhalin-1 project (a), the production site of the Yastreb drilling rig and the onshore product preparation complex in the Landsat-8 satellite image (GoogleEarth website). Photo by V.A. Melkiy (b)

Для обеспечения мониторинга фактического положения объектов трубопроводного транспорта и состояния среды в местах их расположения целесообразно использовать данные дистанционного зондирования среднего и сверхвысокого разрешения (<1 м), материалы АФС, съемок БПЛА, высокоточных геодезических измерений, обеспечивающие необходимую

точность и детализацию для корректного распознавания объектов.

Моделирование развития ситуаций при затоплении участков трубопроводов во время наводнений, а также при попадании нефти и нефтепродуктов в водотоки создается с использованием высокоточных цифровых моделей рельефа.

В состав ГИС необходимо включить модули, поддерживающие анализ данных наблюдений и способствующие принятию решений в зависимости от сценариев динамики процессов, приводящих к аварийным ситуациям с утечками нефти.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Качур А. Н., Бакланов П. Я. Эколого-географические проблемы и ограничения в региональном развитии // Геосистемы Дальнего Востока России на рубеже XX–XXI веков в 3 т. Т. 3. Территориальные социально-экономические структуры / отв. ред. П.Я. Бакланов, М.Т. Романов. – Владивосток: Дальнаука, 2012. – С. 111–118.
2. Дубровский А.В. Формирование техногенных природно-территориальных комплексов нефтегазовых месторождений севера Сибири // Сборник научных трудов аспирантов и молодых ученых Сибирской государственной геодезической академии / под общ. ред. Т.А. Широковой. – Новосибирск, СГГА, 2004. – С. 19–24.
3. Дубровский А.В. Базовые принципы геоинформационного обеспечения безопасной эксплуатации промышленных объектов // Всероссийская научная Интернет-конференция с международным участием: материалы конференции. – Казань, 5 июня 2014. – Казань: ИП Синяев Д.Н., 2014. – С. 14–17.
4. Карпик А.П. Концепция геоинформационного пространства // Материалы международной научно-технической конференции, посвященной 225-летию МИИГАиК. – М.: МИИГАиК, 2004. – С. 434–438.
5. Долгополов Д.В. Использование данных дистанционного зондирования Земли при формировании геоинформационного пространства трубопроводного транспорта // Вестник Сибирского государственного университета геосистем и технологий (СГУГиТ). – 2020. – Т. 25. – № 3. – С. 151–159. DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-3-151-159
6. «Стройтрансгаз» обустроит инфраструктуру Чайиндинского нефтегазоконденсатного месторождения // Сайт ООО «Агентство Бизнес Новостей». URL: <https://abnews.ru/tag/zaostrojtransgaz/> (дата обращения 25.01.2021).
7. Савиных В.П., Крапивин В.Ф., Потапов И.И. Информационные технологии в системах экологического мониторинга. – М.: ООО «Геодезкартсдат», 2007. – 392 с.
8. Савиных В.П., Цветков В.Я. Геоданные как системный информационный ресурс // Вестник Российской академии наук. – 2014. – Т. 84. – № 9. – С. 826–829.
9. Зверев А.Т., Малинников В.А. Космический геоэкологический мониторинг северных территорий России // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2011. – № 6. – С. 68–73.
10. Бондур В.Г. Аэрокосмический мониторинг нефтегазоносных территорий и объектов нефтегазового комплекса. Реальности и перспективы // Аэрокосмический мониторинг объектов нефтегазового комплекса / под ред. академика В.Г. Бондура. – М.: Научный мир, 2012. – С. 15–37.
11. Карпик А.П. Методологические и технологические основы геоинформационного обеспечения территорий: монография. – Новосибирск: СГГА, 2004. – 260 с.
12. Методология геоэкологической стандартизации территории как основа геоэкологической безопасности / Д.А. Маркелов, А.В. Маркелов, Н.Я. Минеева, М.А. Григорьева, А.П. Акользин, Д.А. Шаповалов, А.О. Хуторова // Проблемы региональной экологии. – 2017. – № 3. – С. 16–25.
13. Лисицкий Д.В. Основные принципы цифрового картографирования местности. – М.: Недра, 1988. – 264 с.
14. Уставич Г.А., Утробина Е.С. Новый вид картографических произведений на районы субъектов Российской Федерации для широкого круга потребителей // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2012. – № 2-1. – С. 76–80.
15. Пространственная оценка современных пожарных режимов лесных экосистем России / А.С. Плотникова, Д.В. Ершов, А.О. Харитоновна, П.П. Шуляк, С.А. Барталев, Ф.В. Стыщенко // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2019. – Т. 16. – № 5. – С. 228–240.
16. Мелкий В.А. Теоретические основы и принципы построения единой системы мониторинга природной среды и техносферы // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2002. – № 2. – С. 89–97.
17. РД-13.020.40-КТН-025-14 «Магистральный трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. Требования к разработке плана по предупреждению и ликвидации разливов нефти (нефтепродуктов) на переходах МН (МНПП) через водные преграды». – М.: ПАО «Транснефть», 2014. – 15 с.
18. Нефтяное загрязнение ландшафтов Чечни: распознавание на местности – «Технологии с одного взгляда» / Д.А. Маркелов, А.В. Маркелов, Н.Я. Минеева, А.П. Акользин, Б.И. Кочуров, Д.А. Шаповалов, А.О. Хуторова, М.А. Григорьева, Е.А. Чукмасова // Экология урбанизированных территорий. – 2018. – № 2. – С. 52–60.
19. Castillo F. Managing Information Technology. – Luxembourg: Springer, 2016. – 246 p.
20. Arun S.B., Kesavan K., Parivallal S. Recent advances in health monitoring and assessment of inservice oil and gas buried pipelines // Journal of the Institution of Engineers (India): Series A. – 2018. – V. 99 – P. 729–740. DOI: 10.1007/s40030-018-0316-5
21. Геоэкологический анализ влияния трубопроводного транспорта на окружающую среду транзитных регионов / Л.А. Межова, А.М. Луговской, Ю.Н. Гладкий, А.Б. Глазьева, О.Ю. Сушкова, Л.Б. Вампилова, А.А. Соколова, Л.А. Луговская // Юг России: экология, развитие. – 2019. – Т. 14. – № 4. – С. 98–110.
22. Advances in the application of the SWAT model for water resources management / R. Jayakrishnan, R. Srinivasan, C. Santhi, J.G. Arnold // Hydrological Processes. – 2005. – V. 19 (3). – P. 749–762.
23. Global relationships between river width, slope, catchment area, meander wavelength, sinuosity, and discharge / R.P.d.M. Frasson, T.M. Pavelsky, M.A. Fonstad, M.T. Durand, G.H. Allen, G. Schumann, C. Lion, R.E. Beighley, X. Yang // Geophysical Research Letters. – 2019. – V. 46. – № 6. – P. 3252–3262.
24. Романовский Р.В. Применение методов компьютерного моделирования зон затопления при максимальных расчетных уровнях воды для решения проектных задач при рекультивации нарушенных земель, а также проектировании зданий и сооружений вблизи водных объектов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 2. – С. 186–201.
25. Dingman L. Physical hydrology. Third edition. – Long Grove, Illinois: Waveland press, Inc., 2015. – 643 с.
26. Yongzhi L., Wenting Z., Ximin C. Flood emergency management using hydrodynamic modelling // Procedia Engineering. – 2012. – V. 28. – P. 750–753. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.01.802>
27. Pay-per-hour water modelling // MIKE Powered by DHI. URL: <https://www.mikepoweredbydhi.com/products/mike-on-saas> (дата обращения 07.02.2021).
28. CESDb.com Civil Engineering Software Database. URL: <https://www.cesdb.com/hydraulic-engineering/> (дата обращения 07.02.2021).
29. Пьянков С.В. Шихов А.Н. Геоинформационное обеспечение моделирования гидрологических процессов и явлений: монография. – Пермь, Пермский гос. нац. исслед. универ., 2017. – 148 с.
30. Новаковский Б.А., Пермяков Р.В. Комплексное геоинформационно-фотограмметрическое моделирование рельефа. – М.: МИИГАиК, 2019. – 175 с.
31. Pike R.J., Evans I.S., Hengl T. Chapter 1. Geomorphometry: a brief guide // Geomorphometry: concepts, software, applications. Developments in soil science / Eds. T. Hengl, H.I. Reuter. – 2008. – V. 33. – P. 3–30. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0166-2481\(08\)00001-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0166-2481(08)00001-9)
32. Li Z.L., Zhu Q., Gold C. Digital terrain modeling. Principles and methodology. – Boca Raton: CRC Press, 2005. – 318 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780203357132>

33. Evaluation of recently released open global digital elevation models of Hubei, China / Z. Hu., J. Peng, Y. Hou, J. Shan // Remote Sensing. – 2017. – V. 9 (3). – 262 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs9030262>
34. Investigation on the use of geomorphic approaches for the delineation of flood prone areas / S. Manfreda, F. Nardi, C. Samela, S. Grimaldi, A. C. Taramasso, G. Roth, A. Sole // Journal Hydrology. – 2014. – V. 517. – P. 863–876 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.06.009>
35. Технологические решения в области обеспечения геопространственной информации о магистральных трубопроводах и объектах их инфраструктуры / Е.И. Аврунев, Г.А. Уставич, А.О. Грекова, А.В. Никонов, В.А. Мелкий, Д.В. Долгополов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 7. – С. 188–201. DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/7/2729>
36. Monitoring of gas pipelines – a civil UAV application / D. Hausamman, W. Ziring, G. Schreier, P. Strobl // Aircraft Engineering and Aerospace Technology. – 2005. – V. 77. – № 5. – P. 352–360. DOI: <https://doi.org/10.1108/00022660510617077>
37. Kovačić B., Kamnik R. Accuracy of trigonometric heighting and monitoring the vertical displacements // Engineering modelling. – 2007. – № 20. – P. 77–84. URL: https://www.researchgate.net/publication/293730162_Accuracy_of_trigonometric_heighting_and_monitoring_the_vertical_displacements (дата обращения 07.02.2021).
38. Хлебникова Т.А., Опригова О.А., Аубакирова С.М. Экспериментальные исследования точности построения фотограмметрической модели по материалам БПЛА // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2018. – Т. 1. – № 4. – С. 32–37.
39. Implications of simulating global digital elevation models for flood inundation studies / L. Hawker, J. Rougier, J.C. Neal, P. Bates, L. Archer, D. Yamazaki // Water Resources Research. – 2018. – V. 54. – Iss. 10. – P. 7910–7928. DOI: <https://doi.org/10.1029/2018WR023279>
40. Niyazi B., Zaidi S.M.F., Masoud M.H.Z. Comparative study of different types of digital elevation models on the basis of drainage morphometric parameters (case study of Wadi Fatimah Basin, KSA) // Earth Systems and Environment. – 2019. – V. 3. – № 3. – P. 539–550. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41748-019-00111-2>
41. High-quality seamless DEM generation blending SRTM-1, ASTER GDEM v2 and ICESat/GLAS observations / L. Yue, H. Shen, L. Zhang, X. Zheng, F. Zhang, Q. Yuan // Journal of Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS). – 2017. – V. 123. – P. 20–34. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.11.002>
42. Santillan J.R., Makinano-Santillan M., Makinano R.M. Vertical accuracy assessment of ALOS World 3D – 30 m Digital Elevation Model over northeastern Mindanao, Philippines // 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). – 2016. – P. 5374–5377. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7730400> (дата обращения 07.02.2021).
43. Comparison of SRTM-V4.1 and ASTER-V2.1 for accurate topographic attributes and hydrologic indices extraction in flooded areas / A. Bannari, G. Kadhem, A. El-Battay, N. Hameid // Journal of Earth Science and Engineering. – 2018. – V. 8. – № 1. – P. 8–30. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/958e/e8773691ac91f61914277400872db025e7a1.pdf> (дата обращения 07.02.2021).
44. Chen C., Yang S., Li Y. Accuracy assessment and correction of SRTM DEM using ICESat/GLAS data under data coregistration // Remote Sensing. – 2020. – V. 12. – № 20. – P. 3435. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12203435>
45. Скрыпичина Т.Н., Флоринский И.В., Лушикова О.С. Сравнительная оценка точности квази-глобальных моделей рельефа AW3D30 DSM, ASTER GDEM и SRTM1 DEM // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2017. – № 5. – С. 86–90.
46. On the vertical accuracy of the ALOS world 3D-30m digital elevation model / B. Caglar, K. Belek, C. Mekik, M. Ozendi // Remote Sensing Letters. – 2018. – V. 9 (6). – P. 607–615. DOI: <https://doi.org/10.1080/2150704X.2018.1453174>
47. Current status of Advanced Land Observing Satellite-3 (ALOS-3) / T. Imai, H. Katayama, H. Imai, Y. Hatooka, S. Suzuki, Y. Osawa // Proc. of SPIE, the International Society for Optical Engineering. – France, Toulouse, Sept. 20–23, 2010. – V. 7826. – paper 7826-11. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.866289>
48. Tarolli P., Mudd S. M. Introduction to remote sensing of geomorphology // Developments in Earth Surface Processes. – 2020. – V. 23. – P. XIII–XV DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64177-9.09992-6>
49. Технологические аспекты построения 3D-модели инженерных сооружений в городах арктического региона РФ / Е.И. Аврунев, А.В. Чернов, А.В. Дубровский, А.В. Комиссаров, Е.Ю. Пасечник // Известия Томского политехнического университета. – 2018. – Т. 329. – № 7. – С. 131–137.
50. Особенности выполнения деформационного мониторинга инженерных сооружений в условиях вечной мерзлоты / Г.А. Уставич, Е.И. Аврунев, В.Г. Сальников, В.К. Попов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 4. – С. 97–109.
51. Севастьянов Н.Н. Предложения по развитию корпоративной геоинформационной системы ПАО «Газпром» на базе использования аэрокосмической информации // Газовая промышленность. – 2018. – № 7 (771). – С. 18–25.
52. Экологический мониторинг и мероприятия по снижению уровня возможного негативного воздействия трубопроводов (Проект «Сахалин 2») на окружающую среду острова Сахалин / В.А. Мелкий, А.А. Верхотуров, Д.В. Долгополов, А.Н. Бурыкин, В.В. Ильин, А.А. Гальцев, О.М. Зарипов, Д.Г. Новиков, Я.П. Белянина, И.В. Еременко // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2015. – № 4. – С. 101–108.
53. Liu W.T., Kogan F.N. Monitoring regional drought using the vegetation condition index // International Journal of Remote Sensing. – 1996. – V. 17. – № 14. – P. 2761–2782. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431169608949106>
54. Постановление Правительства РФ от 31 декабря 2020 г. № 2451 «Об утверждении Правил организации мероприятий по предупреждению и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов на территории Российской Федерации, за исключением внутренних морских вод Российской Федерации и территориального моря Российской Федерации, а также о признании утратившими силу некоторых актов Правительства Российской Федерации // Информационно-правовой портал «Гарант.РУ». URL: <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/400070332/> (дата обращения 07.02.2021).
55. Правила охраны магистральных трубопроводов. Нормативные документы по безопасности, надзорной и разрешительной деятельности в нефтяной и газовой промышленности. / Ответственные составители-разработчики: Ю.А. Дадонов, С.Н. Мокроусов. – М.: Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России, 2004. – Вып. 14. – 8 с.

Поступила 08.02.2021 г.

Информация об авторах

Долгополов Д.В., кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник АО «СпейсИнфо Геоматикс».

Мелкий В.А., доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории вулканологии и вулканопасности Института морской геологии и геофизики ДВО РАН.

Верхотуров А.А., кандидат технических наук, старший научный сотрудник Центра коллективного пользования, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН.

UDC 528.88:502.36:004.94

GEOINFORMATION SUPPORT FOR SAFE OPERATION OF PIPELINE TRANSPORT

Daniil V. Dolgoplov¹,
daniil.dolgoplov@gmail.com

Vyacheslav A. Melkiy²,
vamelkiy@mail.ru

Alexey A. Verkhoturov²,
ussr-91@mail.ru

¹ SpacInfo Geomatics JSC,
51, Dekabristov street, Moscow, 127490, Russia.

² Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far East Branch of Russian Academy of Science (IMGG FEB RAS),
1b, Nauki street, Yuzhno-Sakhalinsk, 693022, Russia.

The relevance of the research is determined by the need to minimize the losses at all stages of the cycle of processing and transportation of hydrocarbon raw materials and reduce environmental pollution from leaks in pipelines. Ensuring the safety of the functioning of pipeline systems requires performing operational assessments of situations at any of natural and economic objects within pipeline segment. The most advanced tools for solving analytical problems are technologies of geoinformation mapping. The general purpose of the created cartographic images is to help in organizing the safe placement of industrial facilities during construction and performing environmental-geodynamic monitoring during pipeline operation.

The main aim was to analyze the possibilities of using various geospatial information that contributes to the safe operation of pipeline systems, processed through geoinformation technologies. To achieve this goal, the work examines the domestic and international experience in preventing and eliminating oil spills, and develops requirements for GIS technology that accumulates information about natural and man-made processes.

Objects. Composition of information and modules for simulation environment composed of GIS must contain the software for analysis of condition of the components of pipeline infrastructure: primary and backup threads, loopings, branches, bends, site and on-site facilities, industrial buildings, tanks, process piping, etc., and preparation of cartographic materials to ensure prevention and organization of emergency.

Methods: decoding of aerospace images of pipeline systems, analysis of space survey materials, data from unmanned aerial vehicles and aerial laser scanning, studying the possibilities of technologies of geoinformation mapping, computer modeling of the state of natural-anthropogenic complexes.

Results. The authors have analyzed the regulatory documents that determine the composition of the information necessary for formation of GIS thematic layers on the state of environmental components and the dynamics of natural processes along the routes of pipeline systems. The modules of the information system concentrate data on the disturbance and pollution of the environment, allowing you to create maps of man-made impact scenarios and formulate recommendations for assessing the state and reducing negative consequences. The work shown that the data of remote sensing of the Earth with different spatial resolutions, unmanned aerial vehicles and aerial laser scanning, accurate geodetic reference make it possible to form arrays of geospatial data required for modeling. The environmental safety of hydrocarbon transport is ensured by modeling the development of natural processes that have negative impact on the objects of the pipeline system. For example, when pipeline sections are flooded during floods, as well as when oil and petroleum products enter watercourses, it is necessary to use high-precision digital terrain models. It is proposed to include modules in system that support the analysis of observational data and facilitate decision-making depending on the scenarios of process dynamics, including in the case of emergency oil spills.

Conclusions. The significance of the work performed is to develop a methodology for solving a number of issues that contribute to decision-making to minimize the risk of possible accidents during the operation of pipeline systems. The practical value of the proposed technology for collecting and processing primary information for filling databases of geoinformation systems is that it allows you to obtain information sufficient for decision-making in preparation of plans for preventive measures and the elimination of emergency oil spills and the organization of emergency recovery operations.

Key words:

Geospatial data, decoding of aerospace images, geoinformation technologies, pipeline systems, transportation of hydrocarbons, digital terrain model, emergency oil and petroleum product spills, ASTER, DEM, SRTM.

REFERENCES

1. Kachur A.N., Baklanov P.Ya. Ekologo-geograficheskie problemy i ogranicheniya v regionalnom razvitii [Ecological-geographical problems and restrictions in regional development]. *Geosistemy Dalnego Vostoka Rossii na rubezhe XX–XXI vekov v 3 t. T. 3. Territorialnye sotsialno-ekonomicheskie struktury* [Geosystems of the Russian Far East at turn of the XX–XXI centuries. In 3 vols. Vol. 3. Territorial socio-economic structures]. Eds. P.Ya. Baklanov, M.T. Romanov. Vladivostok, Dalnauka Publ., 2012. Vol. 3, pp. 111–118.
2. Dubrovskiy A.V. Formirovanie tekhnogennykh prirodno-territorialnykh kompleksov neftegazovykh mestorozhdeniy severa Sibiri [Formation of technogenic natural-territorial complexes of oil and gas fields in the North of Siberia]. *Sbornik nauchnykh trudov aspirantov i molodykh uchenykh Sibirskoy gosudarstvennoy geodezicheskoy akademii* [Collection of scientific works of postgraduates and young scientists of the Siberian State Geodesic Academy]. Ed. by T.A. Shirokova. Novosibirsk, SGA Publ., 2004. pp. 19–24.
3. Dubrovskiy A.V. Bazovye printsipy geoinformatsionnogo obespecheniya bezopasnoy ekspluatatsii promyshlennykh ob'ektov

- [Basic principles of geoinformation support for safe operation of industrial facilities]. *Vserossiyskaya nauchnaya Internet-konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiem: materialy konferentsii* [All-Russian Scientific Internet conference with international participation: materials of the conference]. Kazan, June 5, 2014. Kazan, IP Sinyayev D.N. Publ., 2014. pp. 14–17.
4. Karpik A.P. Kontseptsiya geoinformatsionnogo prostranstva [The concept of geoinformation space]. *Materialy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, posvyashchenoy 225-letiyu MIIGAiK* [Materials of the international scientific and technical conference dedicated to the 225th anniversary of MIIGAiK]. Moscow, MIIGAiK Publ., 2004. pp. 434–438.
 5. Dolgoplov D.V. The use of remote sensing data in the formation of the geoinformation space of pipeline transport. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta geosistem i tekhnologii (SGUGiT)*, 2020, vol. 25, no. 3, pp. 151–159. In Rus. DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-3-151-159
 6. «Stroytransgaz» obustroit infrastrukturu Chayandinskogo neftegazokondensatnogo mestorozhdeniya [«Stroytransgaz» will equip the infrastructure of the Chayandinsky oil and gas condensate field]. *Business News Agency LLC Website*. Available at: <https://abnews.ru/tag/zao-stroytransgaz/> (accessed 07 February 2021).
 7. Savinykh V.P., Krapivin V.F., Potapov I.I. *Informatsionnye tekhnologii v sistemakh ekologicheskogo monitoring* [Information technologies in environmental monitoring systems]. Moscow, OOO «Geodezkartizdat» Publ., 2007. 392 p.
 8. Savinykh V.P., Tsvetkov V.Ya. Geodata as system information resource. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2014, vol. 84, no. 9, pp. 826–829. In Rus.
 9. Zverev A.T., Malinnikov V.A. Space geoeological monitoring for Russian North. *Proceedings of the Higher Educational Institutions. Izvestia vuzov «Geodesy and aerophotosurveying»*, 2011, no. 6, pp. 68–73. In Rus.
 10. Bondur V.G. Aerokosmicheskiy monitoring neftegazonosnykh territoriy i ob'ektov neftegazovogo kompleksa. Realnosti i perspektivy [Aerospace monitoring of oil and gas-bearing territories and objects of the oil and gas complex. Realities and prospects]. *Aerokosmicheskiy monitoring ob'ektov neftegazovogo kompleksa* [Aerospace monitoring of oil and gas complex objects]. Ed. by academician V.G. Bondur. Moscow, Nauchnyy mir Publ., 2012. pp. 15–37.
 11. Karpik A.P. *Metodologicheskie i tekhnologicheskie osnovy geoinformatsionnogo obespecheniya territoriy: monografiya* [Methodological and technological bases of geoinformation support of territories: monograph]. Novosibirsk, SGGa Publ., 2004. 260 p.
 12. Markelov D.A., Markelov A.V., Mineeva N.Ya., Grigoreva M.A., Akolzin A.P., Shapovalov D.A., Khutorova A.O. Methodology of geoeological standardization of the territory as the basis of geoeological safety. *Problems of regional ecology*, 2017, no. 3, pp. 16–25. In Rus.
 13. Lisitskiy D. V. *Osnovnye printsipy tsifrovogo kartografirovaniya mestnosti* [Basic principles of digital mapping of the area]. Moscow, Nedra Publ., 1988. 264 p.
 14. Ustavich G. A., Utrobina E. S. A new type of cartographic works on the regions of the subjects of the Russian Federation for a wide range of consumers] *Proceedings of the Higher Educational Institutions. Izvestia vuzov «Geodesy and aerophotosurveying»*, 2012, no. 2–1, pp. 76–80. In Rus.
 15. Plotnikova A.S., Yershov D.V., Kharitonova A.O., Shulyak P.P., Bartalev S.A., Stytchenko F.V. Spatial assessment of modern forest fire regimes in Russia. *Current problems in remote sensing of the Earth from space*, 2019, vol. 16, no. 5, pp. 228–240. In Rus.
 16. Melkiy V.A. Theoretical foundations and principles of building a unified system for monitoring the natural environment and the technosphere. *Proceedings of the Higher Educational Institutions. Izvestia vuzov «Geodesy and aerophotosurveying»*, 2002, no. 2, pp. 89–97. In Rus.
 17. RD-13.020.40-KTN-025-14. *Magistralny truboprovodny transport nefiti i nefteproduktov. Trebovaniya k razrabotke plana po preduprezhdeniyu i likvidatsii razlivov nefiti (nefteproduktov) na perekhodakh MN (MNPP) cherez vodnye pregrady, PAO «Transneft»* [PD-13.020.40-KTH-025-14. Trunk pipeline transportation of oil and oil products. Requirements for the development of a plan for the prevention and liquidation of oil (petroleum) spills on MN (MNPP) transitions through water barriers]. Moscow, PJSC «Transneft», 2014. 15 p.
 18. Markelov D.A., Markelov A.V., Mineeva N.Ya., Akolzin A.P., Kochurov B.I., Shapovalov D.A., Khutorova A.O., Grigoreva M.A., Chukmasova E.A. Oil pollution of Chechen landscapes: recognition on the ground – «Technologies at a glance». *Ecology of Urbanized Territories*, 2018, no. 2, pp. 52–60. In Rus.
 19. Castillo F. *Managing Information Technology*. Luxembourg, Springer, 2016. 246 p.
 20. Arun S.B., Kesavan K., Parivallal S. Recent advances in health monitoring and assessment of inservice oil and gas buried pipelines. *Journal of the Institution of Engineers (India): Series A*, 2018, vol. 99, pp. 729–740. DOI: 10.1007/s40030-018-0316-5
 21. Mezhova L.A., Lugovskoy A.M., Gladkiy Yu.N., Glazyeva A.B., Sushkova O.Yu., Vampilova L.B., Sokolova A.A., Lugovskaya L.A. Geo-ecological Analysis of the effects of pipe-line transport on the environment of transit regions (Voronezh Region, Russia). *South of Russia: ecology, development*, 2019, vol. 14, no. 4, pp. 98–110. In Rus. DOI: 10.18470/1992-1098-2019-4-98-110.
 22. Jayakrishnan R., Srinivasan R., Santhi C., Arnold J.G. Advances in the application of the SWAT model for water resources management. *Hydrological Processes*, 2005, vol. 19, no. 3, pp. 749–762.
 23. Frasson R.P.d.M., Pavelsky T.M., Fonstad M.A., Durand M.T., Allen G.H., Schumann G., Lion C., Beighley R.E., Yang X. Global relationships between river width, slope, catchment area, meander wavelength, sinuosity, and discharge. *Geophysical Research Letters*, 2019, vol. 46, no. 6, pp. 3252–3262.
 24. Romanovskiy R.V. Application of computer modeling methods of flood zones at maximum design water levels for solving project tasks in the disturbed lands recultivation and design of buildings and facilities near water bodies. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 2, pp. 186–201. In Rus.
 25. Dingman L. *Physical hydrology*. Long Grove, Illinois, Waveland press, Inc., 2015. 643 p.
 26. Yongzhi L., Wenting Z., Xinmin C. Flood emergency management using hydrodynamic modelling. *Procedia Engineering*, 2012, vol. 28, pp. 750–753. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.01.802>.
 27. *Pay-per-hour water modelling. MIKE Powered by DHI*. Available at: <https://www.mikepoweredbydhi.com/products/mike-on-saas> (accessed 7 February 2021).
 28. *CESDb.com Civil Engineering Software Database*. Available at: <https://www.cesdb.com/hydraulic-engineering/> (accessed 7 February 2021).
 29. Pyankov S.V. Shikhov A.N. *Geoinformatsionnoe obespechenie modelirovaniya gidrologicheskikh protsessov i yavleniy: monografiya* [Geoinformational support of modeling of hydrological processes and phenomena: monograph]. Perm, Perm State University Publ., 2017. 148 p.
 30. Novakovskiy B.A., Permyakov R.V. *Kompleksnoe geoinformatsionno-fotogrammetricheskoe modelirovanie relefa* [Complex geoinformation-photogrammetric modeling of relief]. Moscow, MIIGAiK Publ., 2019. 175 p.
 31. Pike R.J., Evans I.S., Hengl T. Ch. 1. Geomorphometry: a brief guide. *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications. Developments in Soil Science*. Eds. T. Hengl, H.I. Reuter. Elsevier, 2008, vol. 33, pp. 3–30. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0166-2481\(08\)00001-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0166-2481(08)00001-9)
 32. Li Z.L., Zhu Q., Gold C. *Digital terrain modeling. Principles and methodology*. CRC Press, 2005. 318 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780203357132>
 33. Hu Z., Peng J., Hou Y., Shan J. Evaluation of recently released open global digital elevation models of Hubei, China. *Remote Sensing*, 2017, vol. 9, no. 3, 262 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs9030262>
 34. Manfreda S., Nardi F., Samela C., Grimaldi S., Taramasso A.C., Roth G., Sole A. Investigation on the use of geomorphic approaches for the delineation of flood prone areas. *Journal Hydrology*, 2014, vol. 517, pp. 863–876 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.06.009>
 35. Avrunev E.I., Ustavich G.A., Grekov, A.O., Nikonov A.V., Melkiy V.A., Dolgoplov D.V. Features of deformation monitoring of engineering structures in permafrost conditions.

- Bulletin of the Tomsk polytechnic university. Geo assets engineering*, 2020, vol. 331, no. 7, pp. 188–201. In Rus. DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/7/2729>
36. Hausamann D., Zirnig W., Schreier G., Strobl P. Monitoring of gas pipelines – a civil UAV application. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 2005, vol. 77, no. 5, pp. 352–360. DOI: <https://doi.org/10.1108/00022660510617077>
 37. Kovačić B., Kamnik R. Accuracy of trigonometric heighting and monitoring the vertical displacements. *Engineering modeling*, 2007, no. 20, 1–4, pp. 77–84. Available at: https://www.researchgate.net/publication/293730162_Accuracy_of_trigonometric_heighting_and_monitoring_the_vertical_displacements (accessed 7 February 2021).
 38. Khlebnikova T.A., Opritova O.A., Aubakirova S.M. Experimentalnye issledovaniya tochnosti postroeniya fotogrammetricheskoy modeli po materialam BPLA [Experimental studies of photogrammetric model accuracy by UAV]. *Sbornik materialov Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii. Interexpo Geo-Sibir'-2018* [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2018. International Scientific Conference]. Novosibirsk, SSGA Publ., 2018. Vol. 1, pp. 32–37.
 39. Hawker L., Rougier J., Neal J., Bates P., Archer L., Yamazaki D. Implications of Simulating Global Digital Elevation Models for Flood Inundation Studies. *Water Resources Research*, 2018, vol. 54, Iss. 10, pp. 7910–7928. DOI: <https://doi.org/10.1029/2018WR023279>
 40. Niyazi B., Zaidi S.M.F., Masoud M.H.Z. Comparative study of different types of digital elevation models on the basis of drainage morphometric parameters (case study of Wadi Fatimah Basin, KSA). *Earth Systems and Environment*, Springer, 2019, vol. 3, no. 3, pp. 539–550. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41748-019-00111-2>
 41. Yue L., Shen H., Zhang L., Zheng X., Zhang F., Yuan Q. High-quality seamless DEM generation blending SRTM-1, ASTER GDEM v2 and ICESat/GLAS observations. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* (ISPRS), 2017, vol. 123, pp. 20–34. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjrs.2016.11.002>
 42. Santillan J.R., Makinano-Santillan M., Makinano R.M. Vertical accuracy assessment of ALOS World 3D – 30 m Digital Elevation Model over northeastern Mindanao, Philippines. *2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*. 2016. pp. 5374–5377. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7730400> (accessed 7 February 2021).
 43. Bannari A., Kadhem G., El-Battay A., Hameid N. Comparison of SRTM-V4.1 and ASTER-V2.1 for Accurate topographic attributes and hydrologic indices extraction in flooded areas. *Journal of Earth Science and Engineering*, 2018, vol. 8, no. 1, pp. 8–30. Available at: <https://pdfs.semanticscholar.org/958e/e8773691ac91f61914277400872db025e7a1.pdf> (accessed 7 February 2021).
 44. Chen C., Yang S., Li Y. Accuracy assessment and correction of SRTM DEM using ICESat/GLAS data under data coregistration. *Remote Sensing*, 2020, vol. 12, no. 20, pp. 3435. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12203435>
 45. Skrypitsyna T.N., Florinskiy I.V., Lushchikova O.S. Comparative evaluation of the accuracy of quasi-global terrain models AW3D30 DSM, ASTER GDEM and SRTM1 DEM. *Proceedings of the Higher Educational Institutions. Izvestia vuzov «Geodesy and aerophotosurveying»*, 2017, no. 5, pp. 86–90. In Rus.
 46. Caglar B., Belek K., Mekik C., Ozendi M. On the vertical accuracy of the ALOS world 3D-30m digital elevation model. *Remote Sensing Letters*, 2018, vol. 9, no. 6, pp. 607–615. DOI: <https://doi.org/10.1080/2150704X.2018.1453174>
 47. Imai T., Katayama H., Imai H., Hatooka Y., Suzuki Sh., Osawa Y. Current status of Advanced Land Observing Satellite-3 (ALOS-3). *Proceedings of SPIE 7826, Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites XIV*. France, Toulouse, Sept. 20–23, 2010. Paper 78260C. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.866289>
 48. Tarolli P., Mudd S.M. Introduction to remote sensing of geomorphology. *Developments in Earth Surface Processes*, 2020, vol. 23, pp. XIII–XV. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64177-9.09992-6>
 49. Avrunev E.I., Chernov A.V., Dubrovsky A.V., Komissarov A.V., Pasechnik E.Yu. Technological aspects of constructing 3D-model of engineering structures in the cities of the RF Arctic Region. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 7, pp. 131–137. In Rus. Available at: <http://izvestiya.tpu.ru/archive/article/view/2066> (accessed 7 February 2021).
 50. Ustavich G.A., Avrunev E.I., Salmikov V.G., Popov V.K. Features of deformation monitoring of engineering structures in permafrost conditions. *Bulletin of the Tomsk polytechnic university. Geo assets engineering*, 2018, vol. 329, no. 4, pp. 97–109. In Rus. Available at: <http://izvestiya.tpu.ru/archive/article/view/2018> (accessed 7 February 2021).
 51. Sevastyanov N.N. Proposals for development of PJSC Gazprom's corporate geoinformation system based on use of aerospace information. *Gas Industry of Russia*, 2018, no. 7 (771), pp. 18–25. In Rus.
 52. Melkiy V.A., Verkhoturov A.A., Dolgoplov D.V., Burykin A.N., Ilin V.V., Galtsev A.A., Zaripov O.M., Novikov D.G., Belyanina Ya.P., Eremenko I.V. Environmental monitoring and measures to reduce the possible negative impact of pipelines (Sakhalin 2 Project) on the environment of Sakhalin Island. *Proceedings of the Higher Educational Institutions. Izvestia vuzov «Geodesy and aerophotosurveying»*, 2015, no. 4, pp. 101–108. In Rus.
 53. Liu W.T., Kogan F.N. Monitoring regional drought using the vegetation condition index. *International Journal of Remote Sensing*, 1996, vol. 17, no. 14, pp. 2761–2782. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431169608949106>
 54. Postanovlenie Pravitelstva RF ot 31 dekabrya 2020 g. № 2451 «Ob utverzhdenii Pravil organizatsii meropriyatiy po preduprezhdeniyu i likvidatsii razlivov nefi i nefteproduktov na territorii Rossiyskoy Federatsii, za isklucheniem vnutrennikh morskikh vod Rossiyskoy Federatsii i territorialnogo morya Rossiyskoy Federatsii, a takzhe o priznanii utrativshimi silu nekotorykh aktov Pravitelstva Rossiyskoy Federatsii» [The resolution of the RF Government dated 31 December 2020, No. 2451 «On approval of Rules of organization of measures for prevention and elimination of oil spills and oil products on the territory of the Russian Federation, except for the internal waters of the Russian Federation and the territorial sea of the Russian Federation and the annulment of certain acts of the Government of the Russian Federation»]. *Information and legal portal «Garant.RU»*. Available at: <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/400070332/> (accessed 7 February 2021).
 55. *Pravila okhrany magistralnykh truboprovodov*. Normativnye dokumenty po bezopasnosti, nadzornoy i razreshitelnoy deyatel'nosti v nefyanoy i gazovoy promyshlennosti [Rules for protection of trunk pipelines. Regulatory documents on safety, supervision and licensing activities in the oil and gas industry]. Eds. Yu.A. Dadonov, S.N. Mokrousov. Moscow, Scientific-technical center for industrial safety of Gosgortekhnadzor of Russia Publ., 2004. Iss. 14, 8 p.

Received: 8 February 2021.

Information about the authors

Daniil V. Dolgoplov, Cand. Sc., leading researcher, SpacInfo Geomatics JSC.

Vyacheslav A. Melkiy, Dr. Sc., leading researcher, laboratory of Volcanology and volcano hazard of the Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of Russian Academy of Science.

Alexey A. Verkhoturov, Cand. Sc., senior researcher, Center for collective use of the Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of Russian Academy of Science.

УДК 553.21:549.02

ТИПОМОРФИЗМ МИНЕРАЛОВ ВЕЗДАРИНСКОЙ ЖИЛЫ (ЮГО-ЗАПАДНЫЙ ПАМИР) – РЕПЕР ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПЕГМАТИТООБРАЗОВАНИЯ

Бухарова Оксана Владимировна¹,
bukharovagetina@gmail.com

Кунгулова Эльвира Нурфасовна¹,
elvirakungulova@mail.ru

¹ Национальный исследовательский Томский государственный университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

Актуальность работы обусловлена необходимостью уточнения условий формирования уникального пегматитового объекта – Вездаринской миароловой пегматитовой жилы, давшей миру большое количество редких минеральных видов, что указывает на особенные физико-химические параметры среды минералообразования.

Цель: дать характеристику формирования структурно-вещественных комплексов пегматитовой жилы по типоморфным признакам полевых шпатов, турмалинов, гранатов, слюд.

Объекты: породообразующие и второстепенные минеральные виды Вездаринской пегматитовой жилы

Методы. Количественный анализ химического состава минералов выполнен рентгеноспектральным микроанализом на микронзонде JXA-8100 и на сканирующих электронных микроскопах Tescan Mira 3 LMU и VEGA II LMU, совмещенных со спектрометрами INCA Energy350 Oxford, структурное состояние полевых шпатов рассчитывалось по результатам рентгеновского анализа на дифрактометре XPert PRO (PANalytical)

Результаты. Получены комплексные данные по минеральному составу Вездаринской пегматитовой жилы (определены и уточнены 4 минеральных вида слюд, 4 вида турмалинов, 2 вида плагиоклазов), выделены генерации минеральных видов, зафиксированы новые для этого пегматита минералы (андалузит, бертьерин), ассоциация с которыми является типоморфной. Предложен сценарий образования околомаролового агрегата жилы и проанализирована роль ремобилизации вмещающих пород при формировании пегматита (его минеральных ассоциаций). По ассоциации минеральных фаз определены температуры образования вещественно-структурных комплексов жилы. Типохимизм второстепенных минералов фиксирует наличие гетерогенной, подвергшейся разделению на существенно силикатную и силикатно-флюидную части, пегматитообразующей среды. Геохимия пегматита и его минеральный набор обусловлены изменением химизма пегматитовой расплава под влиянием вмещающих его пород шугнанской свиты шахдаринской серии.

Ключевые слова:

Миароловые пегматиты, Вездаринская жила, минеральные ассоциации, генерации, пегматитообразование, Юго-Западный Памир.

Введение

Последние годы публикуют обобщающие работы по типизации пегматитов, их промышленной специализации [1–9], в которых характеризуются пегматитовые районы и провинции мира, описываются геологические предпосылки их появления, а также сравниваются условия их образования. В этом контексте Памирская пегматитовая провинция является наименее изученной, поскольку это труднодоступный регион, располагающийся в высокогорных районах на территории Таджикистана, в меньшей степени Афганистана. Уникальные миароловые пегматиты (Вездаринская, Лесхозовская и Музейная жилы) стали известны благодаря работам российских геологов В.Е. Загорского, И.С. Перетяжко, С.И. Коноваленко, Л.Н. Россовского, С.А. Ананьева и др. [10–19]. В этих жилах были обнаружены новые и редкие минералы: стибиколюмбит ($SbNbO_4$), иксиолит ($Ta, Nb, Sn, Fe, Mn)_4O_8$, еремеевит $Al_6(BO_3)_3(OH, F)$, гамбергит $Be_2(BO_3)OH$ [11], виитаньемиит $Na(Ca, Mn)Al(PO_4)(F, OH)_3$ [16], корагоит $Mn_3(Nb, Ta)_3(Nb, Mn)_2W_2O_{20}$, герценбергит SnS [17]), описаны коллекционные образцы, представленные агрегатами из породообразующих и второстепенных минералов (полевых шпатов, кварца, слюд, турмалинов). Были обобщены немногочисленные данные о

химическом составе минеральных фаз в жилах [18]; фрагментарно выполнены анализы включений, что позволило охарактеризовать параметры формирования отдельных зон жил [19–21].

Целью данной работы является установление физико-химических параметров формирования структурно-вещественных комплексов Вездаринской пегматитовой жилы посредством типоморфизма сквозных минералов (породообразующих и второстепенных), в частности, описание возможного сценария образования околомаролового агрегата и роли ремобилизации вещества вмещающих пород при формировании пегматита.

Объект исследования

Вездаринская жила входит в состав пегматитового поля Юго-Западного Памира и расположена в верховьях р. Вез-Дара на высоте около 4000 м. Это вытянутое тело размером 6×45 м сечет гнейсы и мрамора шугнанской свиты шахдаринской серии архейского возраста [18]. По классификации миароловых пегматитов она принадлежит к кристаллоносной формации субредкометальной подформации турмалиноносных пегматитов [18], к классу редкоэлементных типа LCT (Li-Cs-Ta) [22]. Ценная коллекция образцов из этого

пегматитового тела появилась в Томском государственном университете благодаря доценту кафедры минералогии и геохимии ТГУ Сергею Ивановичу Коноваленко, участвовавшему в экспедициях на Памир в 1989 и 2015 гг. С.И. Коноваленко с коллегами описали это пегматитовое тело как асимметричное слабо зональное, что связано с неравномерным распространением минеральных агрегатов [19]. Анализ минеральных агрегатов позволил выделить восемь структурно-вещественных комплексов (СВК): кварц-двуполевошпатовый (Qz-2Fsp), кварц-плагиоклазовый с турмалином гранатом (Qz-Pl with Tur/Grt), кварц-полевошпатовый пегматоидный (Qz-Fsp PG), калишпатовый блоковый (K Fsp megacrystal), миароловый (Mirolitic cavities), околомароловый (Near mirolitic) и трещинно-прожилковый (Fractures-vein) [23].

Материалы и методы

Минералогическое исследование базируется на характеристике структурно-вещественных комплексов, описанных в работе [23]. Правомерность выделенных генераций показали аналитические исследования, отметившие структурные и типохимические особенности минеральных видов. Исследования химического состава минералов проводились методами рентгеноспектрального микроанализа на микрозонде JXA-8100 и на сканирующих электронных микроскопах Tescan Mira 3 LMU и VEGA II LMU, совмещенных со спектрометрами INCA Energy350 Oxford. Мономинеральные оксидовые шашки и полиминеральные пластины были изготовлены с параллельными рабочими поверхностями, одна из которых была отполирована и покрыта проводящим материалом (углеродом). Анализ минералов методом ВДС проводился при следующих рабочих параметрах: ускоряющее напряжение 20 кВ, сила тока зонда 30–50 нА, диаметр электронного пучка 2–4 мкм. Правильность полученных результатов контролировалась периодической съемкой стандартов, использованных при калибровке. Калибровка прибора осуществлялась по лабораторным стандартам: природным альбиту, ортоклазу, диопсиду и синтетическому фтор-флогопиту. Для более точной коррекции матричных эффектов при анализе водосодержащих фаз в программу вводилось ожидаемое содержание H_2O 2,5 мас. % для слюд. Пределы обнаружения для элементов-примесей составили (1 σ , мас. %): TiO_2 – 0,013, FeO – 0,029, MnO – 0,021, MgO – 0,018, BaO – 0,113, CaO – 0,011, Na_2O – 0,024, K_2O – 0,010, Rb_2O – 0,015, Cs_2O – 0,03, P_2O_5 – 0,016, F – 0,16, Cl – 0,01. Параметры съемки при анализе химического состава минералов энергодисперсионным анализатором: ускоряющее напряжение 20кВ, PC=5, живое время набора 120 сек, катод вольфрамовый, размер зонда 1–2 μm . Были использованы стандартные образцы MAC (55 Standard Universal Block Layout+F/Cup, Micro-Analysis Consultants Ltd, UK): Si K α -линия – кварц, Al K α -линия – корунд, Ca K α -линия – волластонит, K K α -линия – KBr, Na K α -линия – альбит, Ba K α -линия – BaF₂, Mg K α -линия – MgO, Fe K α -линия – Fe, Mn K α -линия – Mn, F K α -линия – флюорит, Cl K α -линия –

галит, Ti K α -линия – Ti. Количественная оптимизация выполнялась по кобальту. Расчет кристаллохимических коэффициентов слюд производился анионным методом (на 12 анионов). Литий в слюдах рассчитан по недостатку в позиции Y [24, 25]. Кристаллохимические коэффициенты турмалинов получены по алгоритму расчета формул минералов по неполным микронзондовым данным [26]. Полевые шпаты и гранаты рассчитывались анионным методом, на 8 и 12 позиций кислород, соответственно.

Рентгенография была выполнена на дифрактометре XPert PRO (PANalytical). Условия съемки: трубка с медным анодом (CuK α) с Ni-фильтром, напряжение на трубке меняли от 20 до 30 кВ, ток от 18 до 25 мА, диапазон углов 2θ 18...54°. Образец снимался дважды: общая рентгенограмма в области углов 2θ (18–54°) со скоростью вращения 40 об./мин, и в области углов 2θ (28–32°) и 2θ (40–52°) со скоростью 0,50 об./мин. Расшифровка дифрактограмм проводилась с помощью программного обеспечения PDF-4 и HighScore. Расчеты структурных характеристик проводились по стандартной методике [27].

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП МИИ ИГМ СО РАН (г. Новосибирск) и Томского регионального центра коллективного пользования ТГУ

Результаты исследования

Вездаринская жила на 80 % сложена кварцем и полевыми шпатами (плагиоклазом и калишпатовом), второстепенные минералы представлены турмалинами, слюдами, в меньшей степени гранатом.

Калиевые полевые шпаты в пегматитовом теле представлены тремя генерациями: I – субизометричные зерна размером до 0,5 см в кварц-двуполевошпатовом СВК и их реликтами в кварц-плагиоклазовом; II – таблитчатые зерна размером около 1 см, образующие с кварцем графическую структуру в кварц-полевошпатовом пегматоидном СВК и переходящие в калишпатовый блоковый комплекс в виде крупных зерен размером более 2 см (табл. 1, 2); III – кристаллы в миароловом комплексе. Последняя генерация КПШ, которая описана в [18], в исследуемом каменном материале не представлена. Для ранней генерации КПШ характерно наличие 6–8 % альбитового минала и небольшое содержание кальция (CaO 0,11–0,16 мас. %). Во второй генерации содержание альбитовой молекулы больше в два раза. По результатам рентгеноструктурного анализа калиевые полевые шпаты I и II генерации являются промежуточным ортоклазом с характерным для него содержанием от 75 до 79 % Al в позиции t1, степень моноκлинности при этом варьирует от 0,54 до 0,61.

Плагиоклазы присутствуют во всех комплексах, кроме миаролового. Они образуют семь генераций, отличающихся по морфологическим признакам, химическому составу и структурным особенностям (табл. 3, 4). Первая генерация соответствует олигоклазу (Pl_{Na20}) с низкой степенью структурной упорядоченности ($\Sigma t1$ 0,36). Она представлена изометричными зернами от 0,05 до 1 см с тонкими ровными полисинтетическими

двойниками. Вторая генерация (PI_{№1}) выделена в пределах кварц-двуполевошпатового и пегматоидного комплексов и представлена пертитом распада в ортоклазе.

Таблица 1. Химический состав калиевых полевых шпатов Вездаринской жилы (Юго-Западный Памир)

Table 1. Chemical composition of potassium feldspars of Vezdarinskaya vein (Southwestern Pamir)

Компоненты Composition	Структурно-вещественный комплекс/Structural-material complex				Near miarolitic	Miarolitic cavities	Fractures-vein
	Qz-2Fsp (4)	Qz-Pl with Tur/Grt (5)	Qz-Fsp PG (8)	K Fsp megacrystal (7)			
SiO ₂ , wt. %	64,54	65,36	64,42	64,14	Отсутствует None	Нет данных No data available	Отсутствует None
Al ₂ O ₃	18,25	18,08	18,52	18,59			
CaO	0,16	0,11	–	–			
Na ₂ O	0,87	0,72	1,53	1,35			
K ₂ O	15,57	16,1	14,82	15,07			
Σ	99,39	100,37	99,29	99,15			
Si, ф.к. (apfu)	3,00	3,01	2,96	2,95			
Al	1,00	0,98	1,00	1,01			
Ca	0,01	0,01	0	0			
Na	0,08	0,06	0,14	0,12			
K	0,92	0,95	0,87	0,88			
An, %	0,79	0,78	0	0			
Ab, %	8	6	13	12			
Fsp, %	92	92	87	88			
Генерация Generation	I	I	II	II		III (?)	

Примечания: «–» – ниже предела обнаружения, римскими цифрами указаны генерации минералов, в скобках – количество измерений; Ab, % – альбитовая молекула; An, % – анортитовая молекула; Fsp, % – ортоклазовая молекула.

Notes: «–» – below the detection limit, roman numerals indicate the generation of minerals, in parentheses – the number of dimensions; Ab, % – albite molecule; An, % – anorthite molecule; Fsp, % – orthoclase molecule.

Таблица 2. Структурные характеристики калиевых полевых шпатов Вездаринской жилы (Юго-Западный Памир)

Table 2. Structural characteristics of potassium feldspars of Vezdarinskaya vein (Southwestern Pamir)

Рентгенографические характеристики Radiographic characteristics	Структурно-вещественный комплекс Structural-material complex			
	Qz-2Fsp	Qz-Pl with Tur/Grt	Qz-Fsp PG	K Fsp megacrystal
2Θ ₍₂₀₁₎	21,01	21,03	21,02	21,20
2Θ ₍₀₆₀₎	41,78	41,78	41,72	41,89
2Θ ₍₂₀₄₎	50,74	50,79	50,73	50,88
Δz	0,61	0,54	0,55	0,56
Δp	0	0	0	0
t ₁	0,79	0,75	0,79	0,75
t ₂	0,21	0,25	0,21	0,25
Σt ₁	0,80	0,77	0,77	0,77
Генерация Generation	I	I	II	II

Примечания: Δz – моноклинная упорядоченность; Δp – триклинная упорядоченность; Σt₁ – степень структурной упорядоченности, римскими цифрами указаны генерации минералов.

Notes: Δz – monoclinic ordering; Δp – triclinic ordering; Σt₁ – degree of structural ordering, Roman numerals indicate the generation of minerals.

Ламели (ширина до 5 нм) имеют закономерную линейную ориентировку. Плаггиоклаз третьей генерации распространен в кварц-плаггиоклазовом СВК и является олигоклазом (PI_{№25}). Это достаточно крупные серицитизированные зерна (более 5 мкм) с корродированными границами. В матрице зерен плаггиоклаза заключены редкие таблитчатые зерна андалузита (~150 мкм по удлинению) (в вес. %: SiO₂ 37,54; Al₂O₃ 61,95; FeO 0,26; Σ 99,75). Четвертая генерация плаггиоклаза (PI_{№3}) установлена в кварц-полевошпатовом пегматоидном и

калийшпатовом блоковом СВК, который в виде сегрегационных ленточных пертитов замещения развивается по ортоклазу, вплоть до формирования альбитизированных участков до 0,5 мм. Плаггиоклаз пятой генерации (PI_{№13}) приурочен к блоковой СВК, представлен индивидами (менее 0,5 мм) с полисинтетическим двойникованием, в виде ориентированных (с одновременным погасанием) вростков в калиевом полевошпате. Шестая генерация представлена тонкопластинчатым плаггиоклазом (PI_{№0}), который формирует агрегаты околомиаролового пространства (более 2 см) с пористой текстурой. Седьмая генерация плаггиоклаза образована также альбитом (PI_{№2}), который входит в состав минеральной ассоциации трещинно-прожилкового комплекса, где выполняет межзерновое пространство и заполняет трещины в минералах.

В целом плаггиоклазы Вездаринской жилы соответствуют ряду альбит–олигоклаз. Плаггиоклаз из калийшпатового блокового СВК и из трещинно-прожилкового комплекса, локализованного в пределах первого, содержат в своем составе P₂O₅ от 0,36 до 0,70 мас. %. Структурная упорядоченность возрастает от ранних генераций к поздним (табл. 4).

Турмалины представлены четырьмя минеральными видами (табл. 5). В кварц-плаггиоклазовом СВК черный турмалин образует псевдографические агрегаты с кварцем, формируя локальные зоны в плаггиоклазовом матрикс. Этот турмалин соответствует дутровиту с содержанием ювитовой молекулы до 22 %. Размер зерен достигает 5 мкм. Часто по периферии и механически деформированным частям индивидов развивается мелко-тонкошпатовый агрегат бертьерина (в вес. %: SiO₂ – 23,87; Al₂O₃ – 24,32; MgO 5,42; – FeO 37,2; MnO – 0,58; CaO – 0,09; Na₂O – 0,11; K₂O – 0,1; Cl – 0,02; Σ – 91,69)

с каолинитом и редкими индивидами 2–3 μm ниобий-танталсодержащего рутила (Nb₂O₅ до 0,44 вес. %, Ta₂O₅ 1,04 вес. %). В околомияроловом СВК в пористом альбитовом агрегате присутствуют крупные кристаллы шерла (>2 см по L₃) с примесью россманитового минала (34 %). В миароловых полостях находятся друзовые агрегаты цветных турмалинов переменного состава с высокими содержаниями MnO (до 6,6 вес. %).

Наблюдаются как однородные индивиды тсилаизит-эльбаитовые состава, так и зональные кристаллы. Согласно результатам рентгеноспектрального микроанализа, центральные зоны кристаллов имеют шерл-эльбаитовый состав с незначительной примесью MnO (0,8 вес. %). Следующая зона представлена турмалином фойтитового состава с тсилаизитовой молекулой (12 %), а оторочка образована эльбаитом.

Таблица 3. Химический состав плагиоклазов Вездаринской жилы (Юго-Западный Памир)

Table 3. Chemical composition of plagioclases of Vezdarinskaya vein (Southwestern Pamir)

Компоненты Composition	Структурно-вещественный комплекс/Structural-material complex										
	Qz-2Fsp		Qz-Pl with Tur/Grt		Qz-Fsp PG		K Fsp megacrystal		Near miarolitic	Mia rolitic	Fractures-vein
	(6)	(8)	(5)	(10)	(5)	(17)	(21)	(12)	(7)	(6)	
SiO ₂ , wt. %	63,83	69,00	63,25	62,28	69,00	68,29	69,29	66,45	68,81	Отсутствует/None	68,88
Al ₂ O ₃	22,53	19,27	22,46	23,23	19,28	20,1	19,25	21,35	19,06		19,50
CaO	3,99	0,17	4,21	5,13	0,16	0,56	0,10	2,54	–		0,46
Na ₂ O	8,89	10,53	8,82	8,41	10,54	11,08	10,86	9,91	11,30		10,54
K ₂ O	0,71	1,03	0,43	0,40	1,03	0,24	0,50	0,23	–		0,22
Σ	99,96	100,00	99,17	99,45	100,00	100,28	100,00	100,48	99,17		100,15 ^a
Si, ф.к. (apfu)	2,82	3,01	2,82	2,77	3,01	2,96	3,02	2,90	3,02		2,98
Al	1,17	0,99	1,18	1,22	0,99	1,03	0,99	1,10	0,99		0,99
Ca	0,19	0,01	0,20	0,25	0,01	0,03	0,00	0,12	0,00		0,02
Na	0,76	0,89	0,76	0,73	0,89	0,93	0,92	0,84	0,96		0,88
K	0,04	0,06	0,02	0,02	0,06	0,01	0,03	0,01	0,00		0,01
№ Pl	20	1	20	25	1	3	0	13	0		3
Ab, %	77	93	78	73	93	96	97	86	100		97
An, %	19	1	20	25	1	3	0	13	0		2
Fsp, %	4	6	2	2	6	1	3	1	0		1
Генерация Generation	I	II	I	III	II	IV	IV	V	VI	VII	

Примечания: «–» – ниже предела обнаружения, римскими цифрами указаны генерации минералов, в скобках – количество измерений; ^ac 0,55 вес. % P₂O₅, Ab, % – альбитовая молекула; An, % – анортитовая молекула; Fsp, % – ортоклазовая молекула.

Note: «–» – below the detection limit, roman numerals indicate the generation of minerals, in parentheses – the number of dimensions; ^ac 0,55 wt. % P₂O₅, Ab, % – albite molecule; An, % – anorthite molecule; Fsp, % – orthoclase molecule.

Таблица 4. Структурные характеристики плагиоклазов Вездаринской жилы (Юго-Западный Памир)

Table 4. Structural characteristics of plagioclases of Vezdarinskaya vein (Southwestern Pamir)

Рентгенографические характеристики Radiographic characteristics	Структурно-вещественный комплекс/Structural-material complex				
	Qz-2Fsp	Qz-Pl with Tur/Grt	Qz-Fsp PG	K Fsp megacrystal	Near miarolitic
2θ ₍₂₀₁₎	22,00	21,96	22,06	22,16	22,14
2θ ₍₁₃₁₎	31,43	31,44	31,48	31,49	31,41
2θ _(13̄1)	29,73	29,77	29,98	30,29	30,21
Δ2θ _(131–13̄1)	1,70	1,66	1,50	1,19	1,20
2θ ₍₁₁₃₎	50,75	50,82	50,84	50,71	50,78
2θ ₍₂₀₄₎	51,37	51,46	51,42	51,39	51,30
Σt ₁	0,36	0,41	0,53	0,89	0,80
№ Pl	18	25	7	15	1
Генерация/Generation	I	III	IV	V	VI

Примечания: Σt₁ – степень структурной упорядоченности; № Pl – номер плагиоклаза, римскими цифрами указаны генерации минералов. Структурное состояние II генерации (ламеллы) не удалось проанализировать.

Note: Σt₁ – degree of structural orderliness; № Pl – plagioclase number, Roman numerals indicate the generation of minerals. The structural state of generation II (lamellae) could not be analyzed.

Таким образом, в Вездаринской жиле присутствует две генерации шерла, три генерации эльбаита, по одной генерация фойтита и увит-дуровита. Для турмалинов из миаролового СВК характерно наличие примеси цинка и рубидия.

Гранаты образуют участки псевдографических агрегатов совместно с кварцем в пределах кварц-плагиоклазового комплекса. Зерна размером от 0,3 мм до 1,5 см сильно трещиноваты и деформированы (табл. 6).

Гранат Вездаринской жилы представлен альмандином с незначительной примесью пиропового минала. Содержание спессартиновой молекулы не превышает 2–3 %. В пределах кварц-плагиоклазового комплекса в направлении от краевых частей жилы к полевошпатовому пегматоидному СВК происходит укрупнение индивидов и возрастает содержание в них альмандинового минала.

Таблица 5. Химический состав турмалинов Вездаринской жилы (Юго-Западный Памир)

Table 5. Chemical composition of tourmalines of Vezdarinskaya vein (Southwestern Pamir)

Компоненты Composition	Структурно-вещественный комплекс/Structural-material complex									
	Qz-2Fsp	Qz-Pl with Tur/Grt	Qz-Fsp PG	K Fsp megacrystal	Near miarolitic	Mirolitic cavities				Fractures -vein
	–	(8)	–	–	(3)	(4)	(5)	(4)	(3)	(15)
SiO ₂ , wt. %		35,6			35,21	36,78	34,82	36,99	34,82	36,05
TiO ₂		1,43			0,73	0,10	0,16	0,05	0,12	0,21
Al ₂ O ₃		32,00			34,42	35,56	35,41	37,38	36,84	32,63
CaO		1,24			0,47	0,03	0,11	0,21	0,27	0,04
MnO		–			0,22	0,81	2,37	3,69	6,62	0,05
MgO		4,75			0,79	0,02	0,02	0,01	0,01	1,81
FeO		9,55			11,95	7,99	11,36	1,62	2,76	13,61
ZnO		–			–	0,08	0,14	0,02	0,06	–
Na ₂ O		1,8			1,83	3,06	1,79	2,86	2,52	1,92
K ₂ O		–			0,12	0,02	0,04	0,02	0,03	–
Rb ₂ O		–			–	0,06	0,05	0,04	0,06	–
F		–			–	1,87	0,63	1,8	1,13	–
Si, ф.к. (apfu)		5,93			5,88	6,03	5,86	5,93	5,74	6,04
Ti		0,18			0,09	0,01	0,02	–	0,01	0,03
Al		6,29			6,78	6,88	7,02	7,06	7,16	6,44
Ca		0,22			0,08	0,01	0,02	0,04	0,05	0,01
Mn		–			0,03	0,11	0,34	0,5	0,92	0,01
Mg		1,18			0,20	–	0,01	–	–	0,45
Fe		1,33			1,67	1,10	1,60	0,22	0,38	1,91
Zn		–			–	0,01	0,02	–	0,01	–
Na		0,58			0,59	0,97	0,58	0,89	0,81	0,62
K		–			0,03	–	0,01	–	0,01	–
F		–			–	0,97	0,34	0,91	0,59	–
Li*		0,09			0,36	0,86	0,14	1,28	0,77	0,13
X		0,80			0,70	0,98	0,61	0,93	0,86	0,63
AL(Si)		0,07			0,12	–	0,14	0,07	0,26	–
Al-Y		0,22			0,65	0,91	0,88	0,99	0,9	0,48
Srl, %		15			42	36	–	–	–	48
Elb, %		–			–	58	10	73	52	9
Oln, %		8			–	–	–	–	–	–
Ftt, %		–			–	–	73	10	15	17
Tst, %		–			1	4	12	17	31	19
Mg-Ftt, %		14			–	–	–	–	–	–
Uvt, %		22			5	–	0,5	–	–	1
Dtw, %		37			18	2	4,5	–	2	6
Rsm, %		4			34	–	–	–	–	–

Примечание: «–» – ниже предела обнаружения; Li* – литий расчётный [19]; Srl, % – шерловая молекула; Elb, % – эльбаитовая молекула; Oln, % – оленитовая молекула; Ftt, % – фойтитовая молекула; Tst, % – тсилазитовая молекула; Mg-Ftt, % – Mg-фойтитовая молекула; Uvt, % – увитовая молекула; Dtw, % – дутровитовая молекула; Rsm, % – россманитовая молекула.

Note: «–» – below the detection limit; Li* – lithium calculated [19]; Srl, % – sherl molecule; Elb, % – elbaite molecule; Oln, % – olenite molecule; Ftt, % – foitite molecule; Tst, % – tsilaisite molecule; Mg-Ftt, % – Mg-foitite molecule; Uvt, % – uvite molecule; Dtw, % – dutrovite molecule; Rsm, % – rossmanite the molecule.

Слюды Вездаринской жилы, согласно результатам рентгеноспектрального микроанализа (табл. 7), представлены изоморфными смесями, состоящими из анитовой, флогопитовой, тайниолитовой, мусковитовой, трилитионитовой, полилитоинитовой, оксифлогопитовой и истонитовой молекул. Бурые слюды, представленные существенно аннитом, присутствуют в трех комплексах (кварц-двуполевошпатовом, кварц-плагиоклазовом и калишпатовом). Вблизи контакта пегматитового тела с вмещающими породами размеры индивидов достигают 1 см (I генерация), в кварц-плагиоклазовом и калишпатовом она образует тонко-чешуйчатые единичные выделения (II, III генерации). Для первой генерации характерно повышенное содержание истонитового минала и присутствие фтора, для второй – равная примесь оксифлогопитовой и истонитовой молекул, для третьей – самой железистой – му-

сковитовой и оксифлогопитовой. В пределах околомияролового комплекса слюда представлена золотистым мелкочешуйчатым мусковитом с долей полилитоинитового минала 16 %. В миароловом СВК слюды отличаются многообразием состава: флогопит, полилитоинит и литийсодержащий мусковит. Слюды из миаролового комплекса содержат Cs и Rb. Генерации мусковита отличаются содержанием примесных элементов Mg, Fe, Rb, Zn и Ti. Для всех видов слюд миаролого комплекса характерно повышенное содержание фтора (до 1,9 вес. %). В трещинно-прожилковом комплексе совместно с альбитом и кварцем присутствует мусковит IV генерации. В жильном агрегате, расположенном ближе к миаролам, он может достигать гигантских размеров, а на периферии пегматитового тела составляет первые мм. Для этого мусковита характерно наличие 35 % трилитоинитовой молекулы.

Таблица 6. Химический состав гранатов кварц-плагиоклазового комплекса Вездаринской жилы (Юго-Западный Памир)

Table 6. Chemical composition of garnets of miarolitic pegmatite of Vezdarinskaya vein (Southwestern Pamir)

Компоненты Composition	Структурно-вещественный комплекс Structural-material complex		
	Qz-Pl with Grt		
	1 (4)	2 (8)	3 (2)
SiO ₂ , wt. %	37,17	36,99	36,77
Al ₂ O ₃	20,8	20,82	20,67
MgO	2,86	2,1	1,71
FeO	35,77	37,14	38,96
MnO	1,31	1,07	0,59
CaO	1,71	1,87	1,06
Σ	99,60	99,99	99,72
Si, ф.к. (apfu)	3,02	2,69	2,98
Al	1,99	1,79	1,97
Fe	2,43	2,26	2,64
Mg	0,35	0,23	0,21
Mn	0,09	0,07	0,04
Ca	0,15	0,15	0,09
Alm, %	80,61	83,78	83,81
Prp, %	11,49	8,45	8,17
Grs, %	4,91	5,8	5,06
Sps, %	2,99	1,97	2,96

Примечание: 1 – зона контакта кварц-плагиоклазового комплекса с вмещающими породами; 2 – «центральная» часть кварц-плагиоклазового комплекса; 3 – зона контакта кварц-плагиоклазового и калишпатового комплекса. В скобках указано количество измерений. Alm, % – альмандиновая молекула; Prp, % – пироповая молекула; Grs, % – гроссуляровая молекула; Sps, % – спессартиновая молекула.

Note: 1 – the contact zone of the quartz-plagioclase complex with the host rocks; 2 – the «central» part of the quartz-plagioclase complex; 3 – the contact zone of the quartz-plagioclase and kalishpat complex. The number of dimensions is indicated in parentheses. Alm, % – almandine molecule; Prp, % – pyrope molecule; Grs, % – grossular molecule; Sps, % – spessartin molecule.

Всего в теле миароловых пегматитов присутствует четыре минеральных вида: аннит (3 генерации), поллититонит, флогопит и мусковит (4 генерации).

Обсуждение

Пегматитовые тела Юго-Западного Памира формировались из уникальных гетерогенных остаточных расплавов, обогащенных специфическим флюидом, богатым бором, фтором, редкими щелочами [21]. Существование такой минералообразующей среды обусловлено сложным геологическим строением, которые обеспечивали вмещающие гнейсы и мрамора шугнанской свиты шахдаринской серии.

Генетическое значение степени упорядоченности и наличия структур распада твердого раствора в полевых шпатах.

Калиевые полевые шпаты Вездаринской жилы относятся к моноклинному виду с невысокой степенью структурной упорядоченности. Возможно несколько сценариев образования и сохранения ортоклаза в минеральных ассоциациях. Первый – «сухая система»

[28]. Второй – низкое парциальное давление флюида в области кристаллизации КПШ [29]. Третий – наличие водосодержащего флюида с низкой концентрацией водородных ионов (протонов), поскольку процесс трансформации твид-структуры ортоклаза в микроклин вызывает именно протон [30], свободно проникающий в индивид и разрывающий тетраэдрические связи между Al, Si и O, ускоряя межзерновую диффузию и вызывая Al-Si перераспределения на границе твердых фаз [31]. Высокая концентрация водородных ионов возможна при высокой температуре воды, когда она ведет себя как слабая кислота [32], либо флюид должен иметь повышенную кислотность благодаря растворенным в нем солям сильных кислот.

Рассмотрев эти три сценария, первый вариант представляется менее обоснованным, поскольку наблюдаются участки с мирмекитовой структурой, а также наличие в ассоциации минералов с гидроксо-группой [23]. Вероятнее, кристаллизация пегматита (Qz-2Fsp и K Fsp megacrystal СВК) проходила при незначительном количестве водосодержащего флюида с растворенными в нем слабыми кислотами, в условиях низкого парциального давления и невысокой температуры. Структуры распада, наблюдаемые в калиевых полевых шпатах, связаны с двумя разными механизмами образования. Первый тип – собственно пертиты распада, образовались в результате миграции ионов Na и K по крупным каналам, имеющимся в структуре полевых шпатов, при избытке Na в гетерогенном твердом растворе. Зерна КПШ со структурой пертитов отмечены в ранних краевых комплексах. Распределение альбитового компонента между равновесными плагиоклазами и калишпатом разной степени упорядоченности [33] показывают температуры распада 500–450 °C. Второй тип – пертиты замещения, вызваны автометасоматическим процессом, обусловленный миграцией флюида с Na и Ca в межзерновом пространстве. В блоковой зоне отмечаются структуры совместного роста – олигоклаз-ортоклазовый микроагрегат. Отсутствие метасоматических признаков позволяет воспользоваться двуполевошпатовым термометром, который соответствует температуре формирования агрегата 420–400 °C.

Типохимизм породообразующих и второстепенных минералов

Из проанализированных полевых шпатов Вездаринской жилы интерес представляет олигоклаз, который маркирует зоны пегматита, сформированные в условиях Ca профицита, вызванного обогащением среды минерализации веществом вмещающих пород.

Неравномерное присутствие бора в гетерогенном пегматитовом расплаве привело к фрагментарному образованию кварц-гранатовой псевдографики в Вездаринской турмалиноносной жиле, в которой гранат относится к пироп-альмандиновому ряду и отличается малым содержанием спессартиновой молекулы. Его состав отражает процесс «очистки» среды минералообразования от избыточных Mg, Fe, Al, заимствованных из вмещающих пород. Незначительное вхождение в структуру гранатов Mn указывает на его

концентрацию во флюидной составляющей пегматитового гетерогенного расплава, что подтверждает типоморфизм слюд, турмалинов. И даже при незначи-

тельном количестве в среде минералообразования Мп он охотнее будет входить в состав слюд, турмалина или танталониобатов.

Таблица 7. Химический состав слюд Вездаринской жилы (Юго-Западный Памир)

Table 7. Chemical composition of micas of Vezdarinskaya vein (Southwestern Pamir)

Компоненты Composition	Структурно-вещественный комплекс/Structural-material complex									
	Qz-2Fsp	Qz-Pl with Tur/Grt	Qz-Fsp PG	K Fsp megacrystal	Near miarolitic	Miarolitic cavities			Fractures-vein	
	(7)	(3)		(7)	(14)	(7)	(5)	(7)	(8)	(40)
SiO ₂ , wt. %	34,5	37,75		35,68	46,97	55,46	46,93	41,89	45,8	46,37
Al ₂ O ₃	19,67	18,50		16,82	35,58	18,56	30,42	12,11	34,82	35,21
TiO ₂	–	4,13		4,01	–	0,01	0,02	–	–	–
MgO	5,19	8,83		1,36	0,06	0,01	0,01	24	0,73	0,47
FeO	23,81	19,83		29,42	1,23	0,05	–	4,65	1,66	2,04
MnO	0,25	0,41		–	0,01	0,02	0,02	0,06	0,02	0,02
ZnO	–	–		–	–	–	0,03	–	–	–
CaO	0,01	–		–	0,06	0,04	–	0,01	0,01	0,01
Na ₂ O	0,26	–		0,6	0,11	0,21	0,15	0,21	0,5	0,52
K ₂ O	10,4	9,83		8,33	9,69	10,64	11,3	10,79	9,31	9,31
Rb ₂ O	0,07	–		–	0,06	0,55	0,14	0,25	0,05	0,09
Cs ₂ O	–	–		–	–	1,06	0,1	0,01	–	0,01
F	0,3	–		–	0,08	9,6	1,44	5,15	0,73	0,34
Li ₂ O (calc)	–	–		–	1,08	7,72	2,03	0,38	1,53	1,26
Cl	0,22	0,21		2,61	0,01	0,01	0,01	0,03	0,01	0,01
Сумма-F	94,36	99,49		98,82	94,89	94,10	91,10	94,00	94,44	95,18
Si, ф.к. (apfu)	2,85	2,89		2,94	3,22	3,52	3,3	3,12	3,15	3,17
Ti	–	0,24		0,25	–	–	–	–	–	–
Al	1,91	1,66		1,63	2,87	1,39	2,52	1,06	2,82	2,84
Mn	0,02	0,03		–	–	–	–	–	–	–
Mg	0,64	1,01		0,17	0,01	0	0	2,69	0,08	0,05
Fe	1,64	1,26		2,02	0,07	0	0	0,29	0,1	0,12
Na	0,04	0		0,1	0,01	0,03	0,02	0,03	0,07	0,07
K	1,1	0,96		0,88	0,85	0,86	1,02	1,03	0,82	0,81
Rb	–	–		–	–	–	0,02	0,01	–	–
Cs	–	–		–	–	0,03	–	–	–	–
F	0,08	–		–	0,02	1,92	0,32	1,21	0,16	0,07
Cl	0,03	–		0,36	–	–	–	–	–	–
Li	–	–		–	0,3	1,96	0,57	0,11	0,42	0,35
□	–	0,04		0,03	0,13	0,11	–	–	0,12	0,12
O	0,87	1,04		1,02	0,84	–	0,39	0,84	0,7	0,78
OH	1,06	0,96		0,97	1,14	0,87	1,28	–	1,14	1,15
Ann, %	56	52		72	3	–	–	9	5	6
Phl, %	–	–		–	–	–	–	80	4	3
OPhl, %	–	23		13	–	–	–	–	–	–
Eas, %	32	25		–	–	–	–	–	–	–
Ms, %	12	–		15	81	–	69	–	52	56
Plt, %	–	–		–	16	100	31	–	–	–
Tnlt, %	–	–		–	–	–	–	11	–	–
Tlt, %	–	–		–	–	–	–	–	39	35

Примечание: «–» – ниже предела обнаружения; □ – вакансия в позиции X, в скобках указано количество измерений; Ann, % – аннитовая молекула; Phl, % – флогопитовая; Tnlt, % – тайниолитовая; Ms, % – мусковитовая; Tlt, % – трилиитионитовая; Plt, % – полилитионитовая; OPhl, % – оксифлогопитовая; Eas, % – истонитовая.

Note: «–» – below the detection limit, □ – vacancy in the position X, the number of dimensions is indicated in parentheses; Ann, % – annite molecule; Phl, % – phlogopite; Tnlt, % – tainiolite; Ms, % – muscovite; Tlt, % – trilitionite; Plt, % – polyolithionite; OPhl, % – oxyphlogopite; Eas, % – istonite.

Эволюция состава слюды Вездаринской пегматитовой жилы отражает общую динамику минералообразования: существенно Fe-Al слюды с примесью Mg и Ti кристаллизуются из остаточного силикатного расплава с незначительным содержанием воды, формирующего основной объем пегматита (кварц-двуполевошпатовый, кварц-плагиоклазовый с турмалином/гранатом, кварц-полевошпатовый пегматоидный, калишпатовый блоковый комплексы); Li-Al слюды и собственно Mg-слюда образуются из обосо-

бившейся существенно флюидной части, которая участвует в формировании миаролового, околомияролового и прожилкового комплексов. Характер распространения слюд в пегматитовом процессе указывает на изменение кислотности-щелочности среды, активности летучих компонентов и щелочей [34]. Представленный набор минеральных видов в Вездаринской жиле показал, что пегматит кристаллизовался в щелочной среде (репер биотит), а миаролы, околомияроловые и прожилковые агрегаты формирова-

лись в среде повышенной кислотности, содержащей Cs, Rb и Li при высокой активности последнего. Редкие щелочные металлы некогерентны к расплаву и накапливаются в его дериватах: во флюиде или в остаточной силикатной части. Перераспределение щелочей в системе водный флюид – остаточный силикатный расплав зависит от состава флюида: чисто водный флюид не концентрирует в себе щелочные металлы, а рост давления в системе только способствует накоплению Li, Rb, Cs в остаточном расплаве. Однако если флюид обогащен хлором – именно в нем происходит концентрация редких щелочных металлов [35]. Поскольку прямых данных о концентрации хлора в водном флюиде не имеется, рассмотрим среду кристаллизации миаролового комплекса, опираясь на результаты исследований включений в кварце [19]. Согласно [19], термобарогеохимия показала в корневой части индивидов кварца наличие расплавных и сингенетических с ними флюидных высокоплотных водных растворов с незначительной долей углекислоты. Судя по всему, среда формирования миаролового комплекса была представлена водно-силикатной жидкостью, обогащенной фтором, бором, редкими щелочами. Кроме того, нет однозначного ответа, являлась ли слюда миарол продуктом кристаллизации силикатной составляющей флюида или образовалась из его водной фазы. В околомароловом и в трещино-прожилковом комплексах появляется генерация мусковита как результат гидролиза полевых шпатов ранних СВК с характерными типохимическими признаками (содержит Na, Fe, OH⁻) и в ассоциации с индивидами кварца с зазубренными краями (следствие кристаллизации избытка кремнезема при разложении полевого шпата щелочными растворами). Температура формирования кварц-плагиоклазовой зоны по минеральному геотермометру сонахождения биотита и граната (по [33]) составила 500–450 °С.

Известно, что образование турмалина для пегматитов «чистой линии» имеет последовательность: шерл (Fe) → тсилаизит (Mn) → эльбаит (оленит) (Li, Al) [32]. В Вездаринской жиле отмечается следующее: турмалин краевой зоны пегматита обогащен Ca, Ti, Mg, что снижает общее содержание шерлового минерала. Это можно объяснить влиянием вмещающих пород (мрамора, гнейсы) на пегматитовый расплав, образовавшийся Вездаринскую жилу.

Значительное разнообразие турмалина по составу представлено в миароловом комплексе, где его индивиды зачастую зональны и при их формировании реализуется практически стандартная геохимическая схема (снижение содержания Fe и увеличение Mn, Li, Al): шерл-эльбаит обрастает фойтитом, периферия представлена тсилаизит-эльбаитом с примесью фойтита. Фойтит свидетельствует о повышении кислотности среды минералообразования при значительном содержании в ней Al и при умеренном количестве Fe. Присутствие изоморфных примесей Zn, Rb в турмалине миарол также подтверждают условия незначительного дефицита железа в системе. В результате разгерметизации миарол (усадки стенок полостей) остатки флюида формируют трещино-прожилковый

комплекс. Поздние генерации боросиликата существенно железистые, при этом в их составе присутствуют Li, Al, Mn, что указывает на участие в их формировании остаточного водного флюида миарол. Мигрируя в другие СВК пегматитовой жилы, активный раствор способствовал появлению зональных индивидов шерла в тонкой «рубашке» эльбаитового состава с типичными реакционными границами между минеральными фазами. Так проявился механизм синхронного псевдоморфизма, который происходит на границе протокристалл–раствор, где осуществляется неполный обмен компонентами [36]. Турмалин околомаролового комплекса уникален по своему составу, представлен смесью видообразующих молекул шерла и россманита (Fe, Li, Al) с увитом (Ca, Mg) и дутровитом (Fe, Ti). Такой состав маркирует эффект смешивания двух минералообразующих сред: расплавной части (Fe, Ca, Ti, Mg) и флюидной (Li, F), разделение которых произошло на начальной стадии пегматитового процесса, но при формировании околомаролового комплекса они могли провзаимодействовать.

В минеральных ассоциациях нами определены еще два типоморфных минерала: андалузит и бертьерин, наличие которых также говорит об особенностях среды минералообразования. Включения андалузита в матрице полевого шпата указывает на избыток алюминия над содержащимися в среде щелочами. Появление андалузита однозначно не связано с гидролизом полевого шпата, поскольку он сопровождается высвобождением кремнезема, а значит образованием метасоматического кварца, которого нет в минеральном агрегате. Бертьерин с каолинитом и редкими зернами рутила образуется при разрушении турмалина, в результате переработки последнего остаточным водным флюидом миарол, о чем свидетельствует наличие Cl, Mn в бертьерине, Nb, Ta – в рутиле. Бертьерин, в составе которого одновременно присутствует окисное и закисное железо, является репером окислительно-восстановительных условий. Наличие трехвалентного железа в бертьерине, развившегося по шерлу, указывает на высокую активность кислорода в остаточном растворе.

Таким образом, структурный типоморфизм полевых шпатов, их совместное нахождение в минеральных парагенезисах СВК, а также типохимизм второстепенных минеральных видов позволяют оценить температуру кристаллизации пегматита, воздействие вмещающих пород на состав расплава, установить кислотность-щелочность силикатной и существенно флюидной частях и отметить изменение окислительно-восстановительных условий водно-силикатного флюида в пегматитообразующей системе.

Заключение

В работе по типоморфизму слюд, полевых шпатов, турмалинов и гранатов дана характеристика среды их кристаллизации. По особенностям состава структурно-вещественных комплексов, слагающих Вездаринскую жилу, четко фиксируются две среды минералообразования. Основной объем пегматитового тела, сложенный кварц-двуполевошпатовым, псевдографи-

ческим, пегматоидным, блоковым агрегатами, образовывался в интервале 500–400 °С из пегматитового расплава, оригинальный химизм которого связан с поступлением в него дополнительно Са, Mg, Ti, Al из вмещающих пород. Последнее обстоятельство привело к появлению нехарактерных для классических пегматитов минеральных ассоциаций и разнообразило минеральный набор Вездаринской жилы, которая насчитывает по обобщенным данным порядка 40 минеральных видов. Формирование остальных минеральных комплексов и их автотемасоматические преобразования в теле пегматита связаны с эволюцией силикатно-флюидной фазы, в которой обособились редкие щелочные металлы, летучие (В, F, H₂O, немного Cl) и, конечно, редкие (Nb, Та, Zn и др.). Механизм формирования околомаролового комплекса, по результатам проведенных исследований, отчасти объ-

ясняется тем, что он не является продуктом автотемасоматоза стенки миаролы и мог возникнуть в процессе кристаллизации гибридной среды (расплав-флюид). Анализируя условия кристаллизации уникальной по минералогическому составу Вездаринской жилы, отмечаем нормальный рядовой для пегматитового процесса характер распределения рудных элементов (Li, Nb и др.) и образования рудных парагенезисов, формирование которых связано с силикатно-флюидной средой и ее дериватов, продуцирующей миаролы и поздние структурно-вещественные комплексы в пегматитовом теле.

Данное исследование – дань памяти и глубокого уважения минералогу, наставнику Сергею Ивановичу Коноваленко.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ № 0721-2020-0041.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dill H.G. Pegmatites and aplites: their genetic and applied ore geology // *Ore Geology Reviews*. – 2015. – V. 69. – P. 417–561.
2. Alkali metal and rare earth element evolution of rock-forming minerals from the Gatumba area pegmatites (Rwanda): quantitative assessment of crystal-melt fractionation in the regional zonation of pegmatite groups / N. Hulsbosch, J. Hertogen, S. Dewaele, L. André, Ph. Muchez // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2014. – V. 132. – P. 349–374.
3. Zheng-Hang Lv, Zhang H., Tang Y. Anatexis origin of rare metal/earth pegmatites: evidences from the Permian pegmatites in the Chinese Altai // *Lithos*. – 2021. – V. 380–381. – P. 105865.
4. Formation of miarolitic-class, segregation-type pegmatites in the Taishanmiaoh batholith, China: the role of pressure fluctuations and volatile exsolution during pegmatite formation in a closed, isochoric system / Y. Yuan, L.R. Moore, R.J. McAleer, S. Yuan, H. Ouyang, H.E. Belkin, J. Mao, D.M. Sublett, R.J. Bodnar // *American Mineralogist*. – 2021. – V. 106. – Iss. 10. – P. 1559–1573.
5. Rare element minerals' assemblage in El Quemado pegmatites (Argentina): insights for pegmatite melt evolution from gahnite, columbite-group minerals and tourmaline chemistry and implications for mineralogenesis / Vanina López de Azarevich, P. Fulignati, A. Gioncada, M. Azarevich // *Mineralogy and Petrology*. – 2021. – V. 115. – P. 497–518.
6. Feldspar thermometry in pegmatites: truth and consequences / D. London, L.E. Hunt, Ch.R. Schwing, B.M. Guttery // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. – 2020. – V. 175. – Iss. 1. – P. 1617–1636.
7. Chemical composition of gemstones and characterization of their host pegmatites and country rocks from Chumar Bakhoo, Gilgit-Baltistan, Pakistan: implications for the source of gem-forming fluids / A. Hussain, M.T. Shah, M. Arif, M.H. Agheem, M.S. Mughal, Sh. Ullah, S.A. Hussain, I. Sadiq // *Arabian Journal of Geosciences*. – 2021. – V. 14. – Iss. 13. – P. 1303. URL: <https://doi.org/10.1007/s12517-021-07682-3> (дата обращения 15.09.2021).
8. Geochemical contrasts between Late Triassic Rb-rich and barren pegmatites from Ningshan pegmatite district, South Qinling Orogen, China: implications for petrogenesis and rare metal exploration / X. Nie, Z. Wang, L. Chen, G. Wang, Z. Li // *Minerals*. – 2020. – V. 10. – Iss. 7. – P. 10070582.
9. Webber K.L., Simmons W.B., Falster A.U. Pegmatites of the oxford county pegmatite field, Maine, USA // *The Canadian Mineralogist*. – 2019. – V. 57. – P. 811–815.
10. Дурнев В.Ф., Мелентьев Г.Б., Соколов В.А. Первая находка поллуцита в пегматитах Памира // *Доклады АН СССР*. – 1973. – Т. 213. – № 1. – С. 180–183.
11. Первая находка гамбергита в пегматитах СССР / Л.Н. Россковский, С.И. Коноваленко, С.А. Ананьев, Е.П. Петухов // *Доклады АН СССР*. – 1981. – Т. 260. – № 4. – С. 992–995.
12. Коноваленко С.И., Волошин А.В., Пахомовский Я.А. Вольфрамсодержащие разновидности танталониобатов из миароловых гранитных пегматитов Юго-Западного Памира // *Минералогический журнал*. – 1982. – № 1. – С. 65–74.
13. Россковский Л.Н., Коноваленко С.И., Ананьев С.А. Еремеевит – вновь найденный в России минерал // *Записки Всесоюзного минералогического общества*. – 1983а. – Ч. 122. – Вып. 2. – С. 212–217.
14. Коноваленко С.И., Волошин А.В., Пахомовский Я.А. Тусионит MnSn(BO₃)₂ – новый борат из гранитных пегматитов Юго-Западного Памира // *Доклады АН СССР*. – 1983б. – Т. 272. – № 6. – С. 1449–1453.
15. Коноваленко С.И., Волошин А.В., Ананьев С.А. Тетравикманит из миароловых пегматитов Юго-Западного Памира // *Минералогический журнал*. – 1984. – Т. 6. – № 1. – С. 89–92.
16. Коноваленко С.И., Ананьев С.А., Кузнецова И.К. Виитаньмит из миароловых пегматитов Юго-Западного Памира // *Записки Всесоюзного минералогического общества*. – 1991. – Ч. 120. – Вып. 1. – С. 74–79.
17. Находка герценбергита в гранитном миароловом пегматите Вез-Дара на Юго-Западном Памире (Таджикистан) / Л.А. Паутов, М.А. Мираков, М.А. Шодибеков, П.В. Хворов // *Новые данные о минералах*. – 2018. – Т. 52. – Вып. 1. – С. 6–14.
18. Загорский В.Е., Перетяжко И.С., Шмакин Б.М. Гранитные пегматиты. Т. 3. Миароловые пегматиты. – Новосибирск: Изд-во «Наука». Сибирская издательская фирма РАН, 1999. – 488 с.
19. Бакуменко И.Т., Коноваленко С.И. Особенности формирования миароловых пегматитов и их положение среди гранитных пегматитов // *Термобарогеохимические исследования процессов минералообразования*. Вып. 733. – Новосибирск: Наука, 1988. – С. 123–135.
20. Перетяжко И.С. Условия образования минерализованных полостей (миарол) в гранитных пегматитах и гранитах // *Петрология*. – 2010. – Т. 18. – № 2. – С. 195–222.
21. Редкие щелочные металлы в слюдах миароловых пегматитов жилы Шахдаринской (Юго-Западный Памир) / Е.Н. Соколова, С.З. Смирнов, Э.Н. Кунгулова, В.Н. Королюк, С.И. Коноваленко // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2017. – Т. 328. – № 5. – С. 83–96.
22. Cerny P., Ercit T.S. The classification of granitic pegmatites revisited // *Canadian Mineralogist*. – 2005. – V. 43. – P. 2005–2026.
23. Кунгулова Э.Н., Бухарова О.В. Вещественная характеристика пегматитовой жилы Вездаринская (Юго-Западный Памир) // *Геосферные исследования*. – 2019. – № 3. – С. 6–19.
24. Foster M.D. Interpretation of the composition of lithium micas // *Geological survey professional*. – 1960. – V. 354. – P. 115–147.
25. On Li-bearing micas: estimating Li from electron microprobe analyses and an improved diagram for graphical representation / G. Tischendorf, B. Gottesmann, H.J. Forster, R.B. Trumbull // *Mineralogical Magazine*. – 1997. – V. 61. – № 6. – P. 809–834.
26. Соколов П.Б. Расчет кристаллохимических формул минералов по неполным микронзондовым данным (на примере группы турмалина) // *Записки Всесоюзного минералогического общества*. – 1985. – Вып. 4. – С. 496–502.

27. Франк-Каменецкий В.А. Рентгенография основных типов породобразующих минералов (слоистые и каркасные силикаты). – Л.: Недра, 1983. – 359 с.
28. Мельников В.С. Генетическое значение инверсионного перехода санидин/микроклин. 1. Флюидный фактор в трансформации двойниковой структуры щелочных полевых шпатов // Минералогический журнал. – 2009. – Т. 31. – № 4. – С. 16–29.
29. Самаркин Г.И., Самаркина Е.Я., Спиридов Э.М. Состав и условия кристаллизации КПШ их гранитоидов главного гранитного пояса Южного Урала // Известия ФН СССР. Серия геологическая. – 1976. – № 4. – С. 24–34.
30. Graham C.M., Elphick S.C. A re-examination of the role of hydrogen in Al-Si interdiffusion in feldspars // Contrib Mineral Petrol. – 1990. – V. 104. – P. 481–491.
31. Мельников В.С. Трансформация твид-структуры ортоклаза в решетчатый микроклин // Минералогический журнал. – 2005. – Т. 27. – № 2. – С. 9–31.
32. Ферсман А.Е. Избранные труды. – М.: Изд-во АН СССР, 1960. – Т. VI. – 742 с.
33. Перчук Л.Л., Рябчиков И.Д. Фазовое соответствие в минеральных системах. – М.: Недра, 1976. – 287 с.
34. Понаморева Н.И., Гордиенко В.В., Буторин В.В. Физико-химические условия образования литиево-железистых слюд в гранитных пегматитах // Записки Всесоюзного минералогического общества. – 1993. – № 2. – С. 102–106.
35. Webster J.D., Holloway J.R., Hervig R.L. Partitioning of lithophile trace elements between H₂O and H₂O+CO₂ fluids and topaz rhyolite melt // Economic Geology. – 1989. – V. 84. – № 1. – P. 116–134.
36. Краснова Н.И., Петров Т.Г. Генезис минеральных индивидов и агрегатов. – СПб: Изд-во «Невский курьер», 1995. – 228 с.

Поступила: 08.10.2021 г.

Информация об авторах

Бухарова О.В., кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры минералогии и геохимии геолого-географического факультета Национального исследовательского Томского государственного университета.

Кунгулова Э.Н., аспирант геолого-географического факультета Национального исследовательского Томского государственного университета.

UDC 553.21:549.02

TYPOMORPHISM OF MINERALS OF VEIN VEZDARINSKAYA (SOUTHWESTERN PAMIR) AS AN INDICATOR OF PHYSICO-CHEMICAL PROCESSES OF PEGMATITE FORMATION

Oksana V. Bukharova¹,
bukharovagetina@gmail.com

Elvira N. Kungulova¹,
elvirkungulova@mail.ru

¹ National Research Tomsk State University,
36, Lenin avenue, 634050, Tomsk, Russia.

The relevance of the work is caused by the need to clarify the conditions for formation of a unique pegmatite object – the Vezdarinskaya miarolitic pegmatite vein. This object gave the world a large number of rare mineral species, which indicates special physico-chemical parameters of the mineral formation medium.

The main aim of the research is to characterize the formation of structural-material complexes of the pegmatite vein by typomorphic features of feldspar, tourmalines, garnets, micas.

Objects: rock-forming and secondary mineral species of the pegmatite vein Vezdarinskaya.

Methods. Quantitative analysis of the chemical composition of minerals was performed using X-ray spectral microanalysis on the JXA-8100 microprobe and on scanning electron microscopes Tescan Mira 3 LMU and VEGA II LMU, combined with INCA Energy350 Oxford spectrometers, the structural state of feldspars was calculated based on the results of X-ray analysis on the XPert PRO (PANalytical) diffractometer.

Results. The authors have obtained the complex data on the mineral composition of the pegmatite vein Vezdarinskaya (4 mineral species of mica, 4 species of tourmalines, 2 species of plagioclases were identified and refined), generations of mineral species were identified, new minerals for this pegmatite (andalusite, bertierine) were recorded, the association with which is typomorphic. A scenario for formation of a nearmiarolitic vein aggregate is proposed and the role of remobilization of host rocks in the formation of pegmatite (its mineral associations) is analyzed. According to the association of mineral phases, the formation temperatures of the structural-material complexes of the vein were determined. The typochemism of secondary minerals records the presence of a heterogeneous pegmatite-forming medium, which has undergone separation into silicate and silicate-fluid parts. The geochemistry of pegmatite and its mineral set are caused by a change in the chemistry of the pegmatite melt under the influence of the rocks of the Shugnan formation of the Shahdarinskaya series that contains it.

Key words:

Miarolitic pegmatites, Vezdarinskaya vein, mineral associations, generation, pegmatite formation, Southwestern Pamir.

This work was supported by the grant no. 0721-2020-0041 from the Russian Ministry of Science and Higher Education.

REFERENCES

- Dill H.G. Pegmatites and aplites: their genetic and applied ore geology. *Ore Geology Reviews*, 2015, vol. 69, pp. 417–561.
- Hulsbosch N., Hertogen J., Dewaele S., André L., Muchez Ph. Alkali metal and rare earth element evolution of rock-forming minerals from the Gatumba area pegmatites (Rwanda): quantitative assessment of crystal-melt fractionation in the regional zonation of pegmatite groups. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2014, vol. 132, pp. 349–374.
- Zheng-Hang Lv, Zhang H., Tang Y. Anatexis origin of rare metal/earth pegmatites: evidences from the Permian pegmatites in the Chinese Altai. *Lithos*, 2021, vol. 380–381, pp. 105865.
- Yuan Y., Moore L.R., McAleer R.J., Yuan S., Ouyang H., Belkin H.E., Mao J., Sublett D.M., Bodnar R.J. Formation of miarolitic-class, segregation-type pegmatites in the Taishanmiao batholith, China: the role of pressure fluctuations and volatile exsolution during pegmatite formation in a closed, isochoric system. *American Mineralogist*, 2021, vol. 106, Iss. 10, pp. 1559–1573.
- Vanina López de Azarevich, Fulignati P., Gioncada A., Azarevich M. Rare element minerals' assemblage in El Quemado pegmatites (Argentina): insights for pegmatite melt evolution from gahnite, columbite-group minerals and tourmaline chemistry and implications for minerogenesis. *Mineralogy and Petrology*, 2021, vol. 115, pp. 497–518.
- London D., Hunt L.E., Schwing Ch.R., Guttery B.M. Feldspar thermometry in pegmatites: truth and consequences. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2020, vol. 175, Iss. 1, pp. 1617–1636.
- Hussain A., Shah M.T., Arif M., Agheem M.H., Mughal M.S., Ullah Sh., Hussain S.A., Sadiq I. Chemical composition of gemstones and characterization of their host pegmatites and country rocks from Chumar Bakhoor, Gilgit-Baltistan, Pakistan: implications for the source of gem-forming fluids. *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, vol. 14, Iss. 13, article number 1303. Available at: <https://doi.org/10.1007/s12517-021-07682-3> (accessed 15 September 2021).
- Nie X., Wang Z., Chen L., Wang G., Li Z. Geochemical contrasts between Late Triassic Rb-rich and barren pegmatites from Ningshan pegmatite district, South Qinling Orogen, China: implications for petrogenesis and rare metal exploration. *Minerals*, 2020, vol. 10, Iss. 7, pp. 10070582.
- Webber K.L., Simmons W.B., Falster A.U. Pegmatites of the oxford county pegmatite field, MAINE, USA. *The Canadian Mineralogist*, 2019, vol. 57, pp. 811–815.
- Durnev V.F., Melentev G.B., Sokolov V.A. Pervaya nakhodka pollutsita v pegmatitakh Pamira [The first finding of pollucite in the Pamir pegmatites]. *Reports of the AN USSR*, 1973, vol. 213, no. 1, pp. 180–183.
- Rossovskiy L.N., Konovalenko S.I., Ananov S.A., Petukhov E.P. Pervaya nakhodka gambergita v pegmatitakh SSSR [The first finding of gambergite in the pegmatites of the USSR]. *Reports of the AN USSR*, 1981, vol. 260, no. 4, pp. 992–995.
- Konovalenko S.I., Voloshin A.V., Pakhomovskiy Ya.A. Volframsoderzhashchie raznovidnosti tantaloniobatov iz miarolovykh granitnykh pegmatitov Yugo-Zapadnogo Pamira [Tungsten-containing varieties of tantaloniobates from miarolitic

- granite pegmatites of the Southwestern Pamirs]. *Mineralogical Journal*, 1982, no. 1, pp. 65–74.
13. Rossovskiy L.N., Konovalenko S.I., Ananov S.A. Eremeevit – vnov naydenno v Rossii mineral [Eremeevite is a mineral newly found in Russia]. *Notes of the All-Union Mineralogical Society*, 1983a, vol. 122, no. 2, pp. 212–217.
 14. Konovalenko S.I., Voloshin A.V., Pahomovskiy Ya.A. Tusionit $MnSn(BO_3)_2$ – novoy borat iz granitnykh pegmatitov Yugo-Zapadnogo Pamira [Tusionite $MnSn(BO_3)_2$ is a new borate from granite pegmatites of the Southwestern Pamirs]. *Reports of the AN USSR*, 1983b, vol. 272, no. 6, pp. 1449–1453.
 15. Konovalenko S.I., Voloshin A.V., Ananov S.A. Tetravikmanit iz miarolovykh pegmatitov Yugo-Zapadnogo Pamira [Tetravikmanite from miarol pegmatites of the Southwestern Pamirs]. *Mineralogical Journal*, 1984, vol. 6, no. 1, pp. 89–92.
 16. Konovalenko S.I., Ananov S.A., Kuznetsova I.K. Viitanemiit iz miarolovykh pegmatitov Yugo-Zapadnogo Pamira [Viitanemiite from miarol pegmatites of the Southwestern Pamirs]. *Notes of the All-Union Mineralogical Society*, 1991, vol. 120, no. 1, pp. 74–79.
 17. Pautov L.A., Mirakov M.A., Shodibekov M.A., Hvorov P.V. The discovery of herzenbergite in the granite miarol pegmatite of Vezdar in the Southwestern Pamirs (Tajikistan). *New data on minerals*, 2018, vol. 52, no. 1, pp. 6–14. In Rus.
 18. Zagorsky V.E., Peretyazhko I.S., Shmakin B.M. *Granitnye pegmatity. T. 3. Miarolovye pegmatity* [Granite pegmatites. Vol. 3. Miarolitic pegmatites]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1999. 487 p.
 19. Bakumenko I.T., Konovalenko S.I. Osobennosti formirovaniya miarolovykh pegmatitov i ikh polozhenie sredi granitnykh pegmatitov [Features of the formation of miarol pegmatites and their position among granite pegmatites]. *Termobarogeokhimicheskie issledovaniya protsessov mineraloobrazovaniya* [Thermobarogeochemical studies of mineral formation processes]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1988. Vol. 733, pp. 123–135.
 20. Peretyazhko I.S. Conditions for the formation of mineralized cavities (miaroles) in granite pegmatites and granites. *Petrology*, 2010, vol. 18, no. 2, pp. 195–222.
 21. Sokolova E.N., Smirnov S.Z., Kungulova E.N., Korolyuk V.N., Konovalenko S.I. Rare alkali metals in micas from Shakhdarinskaya miarolitic pegmatite (South8Western Pamir). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 5, pp. 83–96. In Rus.
 22. Cerny P., Ercit T.S. The classification of granitic pegmatites revisited. *Canadian Mineralogist*, 2005, vol. 43, pp. 2005–2026.
 23. Kungulova E.N., Bukharova O.V. Composition characteristics of the Vezdarinskaya pegmatite vein (South-Western Pamir). *Geosphere Research*, 2019, no. 3, pp. 6–19. In Rus.
 24. Foster M.D. Interpretation of the composition of lithium micas. *Geological survey professional*, 1960, vol. 354, pp. 115–147.
 25. Tischendorf G., Gottesmann B., Forster H.J., Trumbull R.B. On Li-bearing micas: estimating Li from electron microprobe analyses and an improved diagram for graphical representation. *Mineralogical Magazine*, 1997, vol. 61, no. 6, pp. 809–834.
 26. Sokolov P.B. Raschet kristalokhimicheskikh formul mineralov po nepolnym mikrozonovym dannym (na primere gruppy turmalina) [Calculation of crystal chemical formulas of minerals based on incomplete microprobe data (using the example of the tourmaline group)]. *Notes of the All-Union Mineralogical Society*, 1985, vol. 4, pp. 496–502.
 27. Frank-Kamenetsky V.A. *Rentgenografiya osnovnykh tipov porodoobrazuyushchikh mineralov (sloistye i karkasnye silikaty)* [Radiography of the main types of rock-forming minerals (layered and skeleton silicates)]. Leningrad, Nedra Publ., 1983. 359 p.
 28. Melnikov V.S. The genetic significance of the sanidin/microcline inversion transition. 1. Fluid factor in the transformation of the double structure of alkaline feldspar. *Mineralogical Journal*, 2009, vol. 31, no. 4, pp. 16–29. In Rus.
 29. Samarkin G.I., Samarkina E.Ya., Spiridovov E.M. Sostav i usloviya kristallizatsii KPSH ikh granitoidov glavnogo granitnogo poyasa Yuzhnogo Urala [Composition and conditions of crystallization of CPS of their granitoids of the main granite belt of the Southern Urals]. *Izvestiya FN USSR. Series: Geological*, 1976, no. 4, pp. 24–34.
 30. Graham C.M., Elphick S.C. A re-examination of the role of hydrogen in Al-Si interdiffusion in feldspars. *Contrib Mineral Petrol*, 1990, vol. 104, pp. 481–491.
 31. Melnikov V.S. Transformation of the tweed structure of the orthoclase into a lattice microcline. *Mineralogical Magazine*, 2005, vol. 27, no. 2, pp. 9–31. In Rus.
 32. Fersman A.E. *Izbrannye trudy* [Selected works]. Moscow, AN SSSR Publ., 1960. Vol. VI, 742 p.
 33. Perchuk L.L., Ryabchikov I.D. *Fazovoe sootvetstvie v mineralnykh sistemakh* [Phase matching in mineral systems]. Moscow, Nedra Publ., 1976. 287 p.
 34. Ponamoreva N.I., Gordienko V.V., Butorin V.V. Fiziko-khimicheskie usloviya obrazovaniya litievo-zhelezistykh slyud v granitnykh pegmatitakh [Physico-chemical conditions of formation of lithium-ferruginous micas in granite pegmatites]. *Notes of the All-Union Mineralogical Society*, 1993, no. 2, pp. 102–106.
 35. Webster J.D., Holloway J.R., Hervig R.L. Partitioning of lithophile trace elements between H_2O and H_2O+CO_2 fluids and topaz rhyolite melt. *Economic Geology*, 1989, vol. 84, no. 1, pp. 116–134.
 36. Krasnova N.I., Petrov T.G. *Genesis mineralnykh individov i agregatov* [Genesis of mineral individuals and aggregates]. Saint Petersburg, Nevskii kuryer Publ., 1995. 228 p.

Received: 8 October 2021.

Information about the authors

Oksana V. Bukharova, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk State University.

Elvira N. Kungulova, graduate student, National Research Tomsk State University.

УДК 550.42; 550.47

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ДОННЫХ ОСАДКОВ В ОБЛАСТЯХ РАЗГРУЗКИ МЕТАН-СОДЕРЖАЩИХ ФЛЮИДОВ НА ВНЕШНЕМ ШЕЛЬФЕ МОРЯ ЛАПТЕВЫХ

Рубан Алексей Сергеевич¹,
ruban@tpu.ru

Рудмин Максим Андреевич¹,
rudminma@tpu.ru

Мазуров Алексей Карпович¹,
akm@tpu.ru

Милевский Яков Вадимович¹,
yvm16@tpu.ru

Семилетов Игорь Петрович^{2,1},
ipsemiletov@alaska.edu

Гершелис Елена Владимировна¹,
elenapanova@tpu.ru

Дударев Олег Викторович²,
dudarev@poi.dvo.ru

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

² Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН,
Россия, 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43.

Актуальность. Характерной особенностью шельфа моря Лаптевых является наличие участков массивной разгрузки метан-содержащих флюидов с поверхности морского дна в водную толщу – метановых сипов. Ключевыми биогеохимическими процессами, протекающими при миграции метана через осадочную среду, являются анаэробное окисление метана и бактериальная сульфатредукция. Активность этих процессов приводит к изменению окислительно-восстановительных условий седиментации, что влияет на биогеохимические циклы ряда редокс-чувствительных элементов.

Цель: изучение влияния просачивающихся метан-содержащих флюидов на геохимические циклы железа, углерода и некоторых редокс-чувствительных элементов.

Объект. Были проанализированы данные о концентрациях углерода, железа, и ряда редокс-чувствительных элементов (Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Cr, Ba, Mo, U) в трех ядрах донных осадков, отобранных на внешнем шельфе моря Лаптевых. Два из трех ядер получены на участках с зарегистрированной разгрузкой метан-содержащих флюидов и рассматривались в качестве осадков, подверженных анаэробному окислению метана.

Методы: пиролиз (Rock-Eval 6 Turbo, Vinci Technologies), рентгенофлуоресцентный анализ (HORIBA X-Ray Analytical Microscope XGT 7200), масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС, ELAN DRC-e).

Результаты. Содержания ТОС и Fe в донных осадках не отражают влияния анаэробного окисления на их геохимические циклы и контролируются спецификой пространственного распределения потоков осадочного материала. Во всех изученных ядрах отмечаются повышенные концентрации Mn, приуроченные к поверхностному горизонту осадков. На участках разгрузки метана поверхностный слой донных осадков характеризуется обогащением Mo, Ni и Cr. Избирательное обогащение поверхностного слоя осадков некоторыми редокс-чувствительными элементами может быть вызвано миграцией метан-содержащих флюидов, способствующих переносу элементов в растворенной форме из более глубоких горизонтов. Сорбция этих элементов органическим веществом и окислами/гидроксидами Fe-Mn, по-видимому, является ключевым механизмом, контролирующим осаждение Mo, Ni и Cr.

Ключевые слова:

Геохимия, метановые сипы, анаэробное окисление метана, море Лаптевых.

Введение

Шельф моря Лаптевых, наряду с шельфами других морей Восточной Арктики, является одним из крупнейших и мелководных в Мировом океане. В то же время степень изученности данного района крайне низкая ввиду его труднодоступности и непродолжительного безледного периода (около 2–3 месяцев в году) [1]. Зарегистрированные в последние десятилетия изменения климата, наиболее заметно проявляющиеся в арктическом регионе [2], несомненно, отражаются на направленности осадочных процессов. В первую очередь это выражается в изменении объема и состава поставляемого в бассейн седиментации осадочного материала, его пространственном распределении в акватории, скоростях осадконакопления, активизации различных биохимических процессов и пр. Пе-

речисленные выше факторы могут способствовать изменению окислительно-восстановительных условий на границе «донные осадки – морская вода» [3].

Кроме того, важной особенностью шельфа моря Лаптевых является наличие участков массивной разгрузки метан-содержащих флюидов с поверхности морского дна в водную толщу – метановых сипов (англ. cold methane seep). Последние являются широко распространенным явлением в Мировом океане, проявляющимся в различных морских условиях как на пассивных, так и на активных континентальных окраинах [4, 5 и ссылки в них]. При столкновении восходящего потока метана и нисходящего диффузионного потока сульфата из морской воды создается сульфат-метановая транзитная зона (СМТЗ), положение которой в разрезе контролируется интенсивностью потока метан-содержащего флюида. Доминиру-

ющими биогеохимическими процессами в СМТЗ являются анаэробное окисление метана (АОМ) и бактериальная сульфатредукция, управляемые консорциумом анаэробных метаноокисляющих архей и сульфатредуцирующих бактерий [6, 7]. При высоких флюидных потоках АОМ часто протекает в верхних горизонтах или даже непосредственно на границе донных осадков и морской воды [8]. Активность сульфатредуцирующих бактерий приводит к истощению сульфата не только в поровых, но и в придонных водах и, как следствие, способствует продуцированию сероводорода [9]. Это приводит к изменению окислительно-восстановительных условий седиментации, что влияет на биогеохимические циклы ряда редокс-чувствительных элементов (например, Mn, Mo, U, Ba, Cd и др.), поскольку их накопление в морских осадках контролируется в первую очередь концентрациями кислорода [10]. Поведение таких элементов, как Mo, U, Ba, характеризующихся обогащением в аноксических условиях, детально изучено на примере метановых сипов различных акваторий Мирового океана, что отражено в многочисленных работах [9, 11–15]. Однако поведение других редокс-чувствительных микроэлементов в донных осадках метановых сипов исследовано в значительно меньшей степени. Более того, опубликованные работы, посвященные геохимии «метановых» осадков в морях Северного Ледовитого океана, ограничиваются единичными работами [16]. При этом уровень актуальности данного вопроса с позиции климатических палеореконокструкций, моделирования современных климатических изменений, а также геолого-разведочных работ на углеводородные полезные ископаемые в пределах Арктического шельфа продолжает стремительно расти.

В рамках данной работы было изучено поведение углерода, железа и некоторых редокс-чувствительных микроэлементов в донных осадках, отобранных на двух метановых участках и за их пределами. Целью исследования являлось изучение влияния просачивающихся метан-содержащих флюидов на геохимические циклы перечисленных выше элементов.

Геологические условия

По географическому положению и гидрологическим условиям море Лаптевых относится к типу материковых окраинных морей. Оно ограничено архипелагом Северная Земля и полуостровом Таймыр с запада и Новосибирскими островами с востока. Значительная часть моря представлена шельфом с глубинами не более 100 м. Основными источниками осадочного материала, поставляемого в море Лаптевых, являются речной сток (в первую очередь р. Лена, шлейф которой прослеживается на внешнем шельфе [17]) и продукты эрозии берегового ледового комплекса, скорость которой достигает 18 м/год [18]. Район исследований расположен в пределах внешнего шельфа моря Лаптевых на сочленение трех крупных структур – рифтовой системы моря Лаптевых, срединно-океанического хребта Гаккеля и Северного трансформного разлома (или Хатангско-Ломоносовской зоны разломов [19]). Основ-

ными структурными элементами рифтовой системы моря Лаптевых являются протяженные грабены и разделяющие их поднятия – горсты [20].

В 2011 г. во время экспедиции на НИС «Академик М.А. Лаврентьев» в северной части моря Лаптевых впервые были обнаружены восходящие струи метан-содержащих флюидов (между 76,5–77,5 с.ш. и 121–132 в.д., глубина воды от 52 до 74 м). С помощью многоканального гидроакустического комплекса на площади около 6400 км² было зарегистрировано около 700 отдельных метановых «факелов» [21]. Задокументированные концентрации растворенного метана в придонном горизонте водной толщи достигают 1511 нмоль/л при среднем значении 151 нмоль/л, что отражает перенасыщение на ~3800 % относительно атмосферных равновесных концентраций (~4 нмоль/л [22]). Широко распространенные в этом районе разломы, которые представлены северо-западными взбросами и северо-восточными сдвигами с амплитудами смещения до 2 км [23, 24], могут служить подводящими каналами для миграции углеводородов из глубоких горизонтов [25]. Еще одним фактором, потенциально благоприятствующим восходящей миграции метан-содержащих флюидов, является деградация подводной вечной мерзлоты, которая подстилает Восточно-Сибирский арктический шельф. Миграция метана может происходить через сквозные талики, которые образуются под затопленными термокарстовыми озерами [26]. Кроме того, деградация подводной мерзлоты может способствовать продуцированию метана в талых отложениях [27].

Фактический материал и методы

Фактическим материалом для данного исследования послужили три керна поверхностных донных осадков, отобранных на внешнем шельфе моря Лаптевых (рис. 1). Керна АМК-6027 (длина 18 см) и АМК-6053 (длина 16 см) были получены в 73-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш» (2018 г.) с использованием коробчатого пробоотборника (бокскорера), позволяющего получать ненарушенную вырезку донных осадков в виде куба (рис. 2, б). После подъема пробоотборника на палубу в полученную вырезку вдавливалась пластиковая труба внутренним диаметром 100 мм. Керна АМК-6948 (длина 14 см) был отобран в 82-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш» (2020 г.) с помощью мультикорера Octopus (рис. 2, а), позволяющего получать керны диаметром 95 мм (рис. 2, с). После отбора керны послойно разрезались на пробы с шагом 1 и 2 см, далее пробы упаковывались в пластиковые пакеты, замораживались и хранились при отрицательной температуре до начала лабораторных исследований. Глубина моря на станциях АМК-6027, АМК-6053 и АМК-6948 составляла 64, 65 и 72 м.

Для проведения аналитических исследований пробы донных осадков размораживались, гомогенизировались и высушивались до постоянной массы. Далее высушенные пробы истирались в кольцевой мельнице (ROCKLABS Standard Ring Mill) в течение 2 минут при частоте вращения 700 об/мин до размера частиц ~10 мкм.

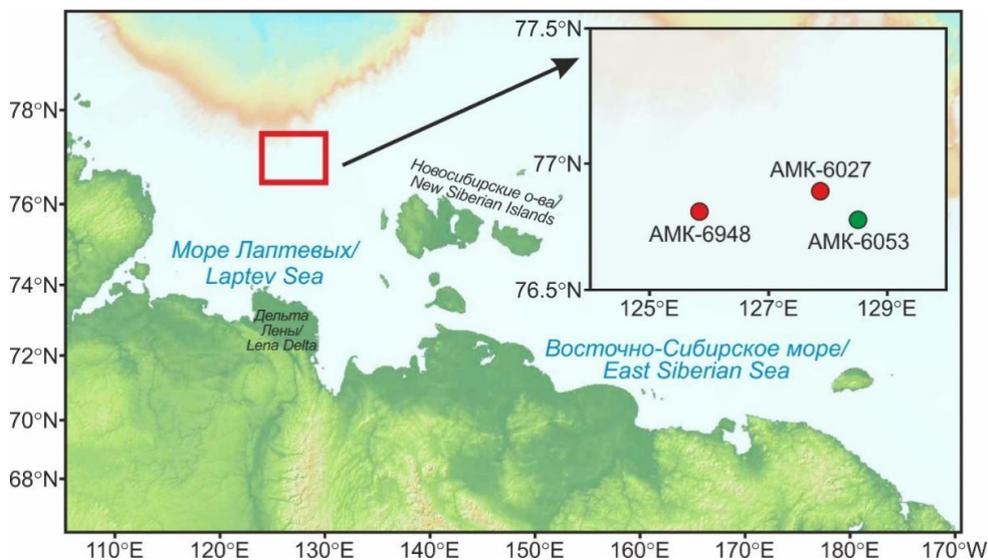


Рис. 1. Карта расположения станций отбора проб донных осадков в море Лаптевых (красным выделены станции, где была зарегистрирована разгрузка метана)

Fig. 1. Map of the sampling stations location for sediments in the Laptev Sea (the red circle symbol represents stations at which methane seeps were registered)

Определение содержаний общего органического и минерального углерода проводилось пиролитическим методом с использованием прибора Rock-Eval 6 Turbo компании Vinci Technologies (Франция). Силикатный анализ выполнялся на рентгенофлуоресцентном микроскопе HORIBA X-Ray Analytical Microscope XGT 7200. Для этого были изготовлены таблетки, спрессованные при давлении 25 МПа и прокаленные при температуре 900 °С. Измерения проводились в 5 точках, равномерно распределенных по площади таблет-

ки, а полученные значения усреднялись методом среднего арифметического. При анализе были заданы следующие параметры: напряжение рентгеновской трубки – 50 кВ, сила тока – 0,5 мА, время измерения – 100 с, площадь луча 1,2 мм. Предел обнаружения основных оксидов – до 0,01 %. Содержания элементов-примесей определялись методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС). Исследования выполнялись с использованием ИСП-масс-спектрометра ELAN (модель DRC-e).

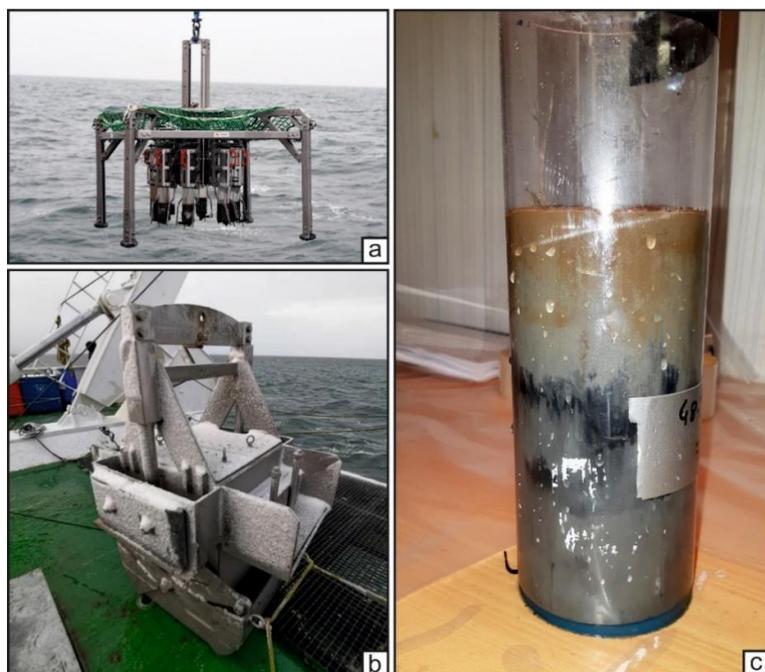


Рис. 2. Глубоководное оборудование, используемое для получения фактического материала: а) мультикорер Octoris; б) коробчатый пробоотборник (бокскорер); в) пример керна донных осадков (АМК-6948), полученного с использованием мультикорера

Fig. 2. Equipment used for sampling: a) Octopus multicorer; b) boxcorer; c) sediment core (AMK-6948) obtained using a multicorer

Фактор обогащения (EF – enrichment factor) рассчитывался по формуле $EF_X = [(X/Al)_{образец} / (X/Al)_{кора}]$, где X и Al представляют собой массовые концентрации X элемента и Al соответственно. Для расчета EF концентрации элементов были нормализованы на Al. $EF > 1$ указывает на аутигенное обогащение элемента относительно его среднего содержания в осадочных породах континентальной коры [28], тогда как $EF > 10$ соответствует умеренной или сильной степени обогащения [8].

Результаты

Керны АМК-6027 и АМК-6948 были отобраны на участках разгрузки метан-содержащих флюидов, и в данной работе они рассматриваются как «метановые» донные осадки. На станции АМК-6053 не было зарегистрировано повышенных содержаний метана ни в донных осадках, ни в водной толще, следовательно, полученный здесь керн принят в качестве «фоновых» донных осадков.

Вертикальное распределение органического (ТОС – total organic carbon) и минерального углерода

(ТИС – total inorganic carbon) в кернах АМК-6027, АМК-6948 и АМК-6053 показано на рис. 3. Концентрации органического углерода в осадках на участках метановой разгрузки и в фоновых донных осадках изменяются в диапазонах от 0,32 до 0,93 % и от 1,02 до 1,19 % соответственно (табл. 1). Для метановых осадков характерно снижение концентраций ТОС с глубиной, в то время как для фоновых осадков подобного снижения не наблюдается. Максимальные содержания органического углерода во всех трех кернах приурочены к приповерхностному горизонту осадков. Содержания минерального углерода в «метановых» осадках варьируют в пределах от 0,08 до 0,23 % (среднее=0,14 %) и увеличивается с глубиной. При этом максимальная концентрация ТИС отмечается в горизонтах 4–5 и 16–18 см (ниже границы «донные осадки – морская вода») керна АМК-6948 и керна АМК-6027 соответственно. Узкий диапазон, содержаний ТИС в фоновых осадках (0,17...0,21 %, среднее 0,19 %), демонстрирует его достаточно низкую вертикальную изменчивость.

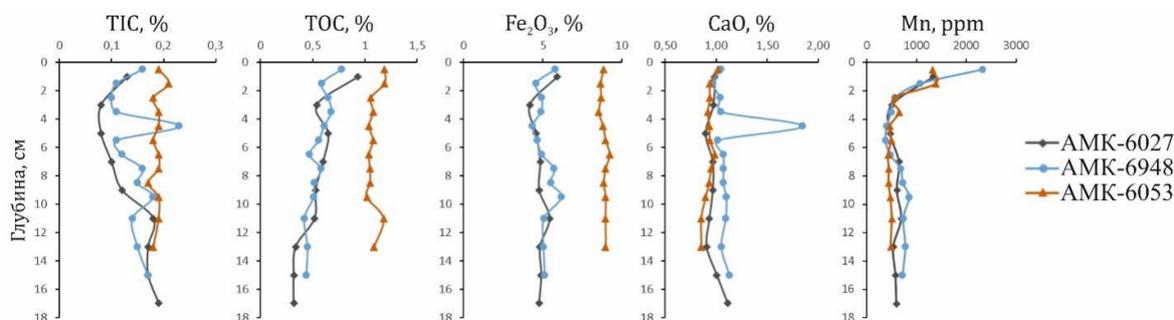


Рис. 3. Профили вертикального распределения концентраций ТИС, ТОС, Fe_2O_3 , CaO и Mn в кернах АМК-6027, АМК-6948 и АМК-6053

Fig. 3. Vertical distributions of TIC, TOC, Fe_2O_3 , CaO and Mn in cores AMK-6027, AMK-6948 and AMK-6053

Вертикальное распределение Mn показывает сходство его поведения как в метановых, так и в фоновых осадках. Поверхностный слой (0–2 см) характеризуется примерно двух–трехкратным обогащением Mn относительно его среднего содержания в каждом из трех кернов. Максимальные концентрации приурочены к горизонту 0–1 см керна АМК-6948 и достигают 2326 ppm. Далее концентрации Mn резко снижаются и с глубины ниже 2 см варьируют в пределах 376–852 ppm. Значения фактора обогащения Mn находятся в диапазонах 0,70...4,34 и 0,80...2,57 для метановых и фоновых осадков соответственно. Содержание Fe_2O_3 изменяется в пределах от 4,2 до 6,2 % в метановых осадках и от 8,6 до 9,2 % в фоновых. Вертикальные профили показывают достаточно равномерное распределение Fe в трех изученных колонках и отсутствие тенденций к увеличению/снижению концентраций с глубиной. Средние значения фактора обогащения Fe составляют 1,09 для керна АМК-6027, 1,12 для керна АМК-6948 и 1,81 для керна АМК-6053. В целом среднее содержание Fe в метановых осадках (3,54 %) равно его среднему содержанию в осадочных породах континента (3,5 % [28]), при этом в фоновых осадках содержание Fe выше почти в 2 раза (табл. 1).

По концентрациям Co, Ni, Cu, Zn, Cr фоновые осадки сопоставимы осадочным породам континента, за исключением несколько пониженного содержания Ni и почти двукратного превышения по Zn. Вертикальное распределение этих элементов в колонке АМК-6053 относительно равномерное. Однако отмечается небольшой рост содержания Co с глубиной и единичные пики в профилях Ni и Zn. В колонке АМК-6948 характер распределения Co, Ni, Cu, Zn, Cr по глубине в целом аналогичен фоновым осадкам, но при этом концентрации всех элементов ниже в 1,5–2 раза (табл. 1). В керне АМК-6027 профили Ni, Cu, Cr демонстрируют относительное превышение концентраций этих элементов в интервале 0–4 см (875 ppm для Ni ($EF_{Ni}=22,2$), 23,9 ppm для Cu ($EF_{Cu}=1,1$) и 265,4 ppm для Cr ($EF_{Cr}=3,6$)). Средние же содержания Co, Cu, Zn, Cr соизмеримы с колонкой АМК-6948.

Содержание Mo изменяется в диапазонах от 1,2 до 187,6 ppm (среднее=15,6 ppm) в метановых осадках и от 1,9 до 16,8 ppm (среднее=5,3 ppm) в фоновых. Профили вертикального распределения Mo показывают разные типы его поведения. В колонке АМК-6027 отмечается резкое снижение содержаний Mo с глубиной, но уже с горизонта ~5 см разброс значений не превышает 3 ppm.

Таблица 1. Сводные данные о концентрациях отдельных химических элементов в кернах АМК-6027, АМК-6948 и АМК-6053

Table 1. Summary data for selected chemical elements of the cores АМК-6027, АМК-6948 and АМК-6053

Элемент Element	«Метановые» донные осадки Cold seep sediments		Фоновые донные осадки Reference sediments	Осадочная кора* Upper crust
	АМК-6027	АМК-6948	АМК-6053	
ТОС (%)	$\frac{0,32 \div 0,93}{0,53}$	$\frac{0,42 \div 0,78}{0,56}$	$\frac{1,02 \div 1,19}{1,09}$	–
ТИС (%)	$\frac{0,08 \div 0,19}{0,14}$	$\frac{0,10 \div 0,23}{0,15}$	$\frac{0,17 \div 0,21}{0,19}$	–
Fe ₂ O ₃ (%)	$\frac{4,2 \div 5,9}{4,9}$	$\frac{4,4 \div 6,2}{5,2}$	$\frac{8,6 \div 9,2}{8,9}$	5,0**
CaO (%)	$\frac{0,90 \div 1,11}{0,97}$	$\frac{0,97 \div 1,85}{1,12}$	$\frac{0,85 \div 1,01}{0,93}$	4,2**
Mn (ppm)	$\frac{473 \div 1335}{663}$	$\frac{376 \div 2326}{785}$	$\frac{429 \div 1380}{636}$	600
Co (ppm)	$\frac{10,2 \div 15,2}{12,4}$	$\frac{11,9 \div 18,3}{14}$	$\frac{22,2 \div 29,0}{24,9}$	17
Ni (ppm)	$\frac{12,2 \div 874}{134}$	$\frac{5,2 \div 26,1}{13,4}$	$\frac{12,2 \div 39,0}{29,3}$	44
Cu (ppm)	$\frac{11,5 \div 23,9}{14,3}$	$\frac{11,9 \div 18,0}{14,5}$	$\frac{23,7 \div 26,5}{25,4}$	25
Zn (ppm)	$\frac{64,6 \div 98,5}{78,3}$	$\frac{72,7 \div 131}{87,6}$	$\frac{113 \div 158}{127,6}$	71
Cr (ppm)	$\frac{43,1 \div 265}{78,7}$	$\frac{47,9 \div 73,2}{55,8}$	$\frac{79,3 \div 95,0}{86,7}$	83
Ba (ppm)	$\frac{568 \div 662}{608}$	$\frac{539 \div 667}{603}$	$\frac{413 \div 488}{449}$	550
Mo (ppm)	$\frac{5,35 \div 187,6}{31,1}$	$\frac{1,16 \div 9,49}{4,97}$	$\frac{1,87 \div 16,8}{5,25}$	1,5
U (ppm)	$\frac{1,48 \div 2,30}{1,76}$	$\frac{1,66 \div 3,24}{2,38}$	$\frac{2,74 \div 3,43}{3,07}$	2,8

*Примечание/Note: в числителе указаны диапазоны концентраций элементов (мин ÷ макс), в знаменателе – средние концентрации в кернах/ranges of element concentrations in cores are in denominator; «–» – нет опубликованных данных/no data available; * – согласно данным (McLennan, 2001)/according to the data (McLennan, 2001); ** – пересчитано в оксидную форму/converted to oxide form.*

Для колонки АМК-6948 также характерно повышенное содержание Мо в верхнем горизонте (5,4 ppm) и его уменьшение до горизонта 4 см, однако ниже этого горизонта наблюдается рост концентраций с глубиной. Профиль АМК-6053 демонстрирует минимальное содержание Мо в поверхностном горизонте и постепенный его рост по мере углубления. Концентрации U в метановых и фоновых осадках варьируют в пределах 1,48...3,24 ppm и 2,74...3,43 ppm, соответственно, и увеличиваются с глубиной во всех трёх

кернах. Средние концентрации U сопоставимы со средним содержанием в осадочных породах континентальной коры (табл. 1). В вертикальных профилях Ва отмечается схожесть его поведения как в метановых, так и в фоновых осадках, а именно широкий разброс концентраций в смежных горизонтах (до 90 ppm) и отсутствие их ярко выраженного увеличения или уменьшения по мере углубления (рис. 5). Одновременно с этим среднее содержание Ва в метановых осадках несколько выше, чем в фоновых, однако в обоих случаях оно соизмеримо со средним в осадочных породах континентов (табл. 1).

Обсуждение результатов

Содержание минерального углерода в метановых и фоновых осадках в исследованных кернах практически одинаково и в обоих случаях не превышает 0,23 % (табл. 1). В отличие от колонки АМК-6053, колонки АМК-6027 и АМК-6948 показывают постепенное увеличение содержания ТИС с глубиной. Как известно, вследствие анаэробного окисления метана возникает избыточная щёлочность поровой воды, а также увеличивается содержание растворенного неорганического углерода в поровой воде, что способствует формированию карбонатов [29]. Однако процесс аутигенного карбонатообразования зависит от множества факторов, таких как: интенсивность потока метана, концентрации метана, скорость седиментации и др., и осаждение карбонатных минералов в метановых сипах происходит только при определенных физико-химических условиях [30–32]. Проведенные ранее исследования показывают наличие аутигенных карбонатных стяжений в виде Mg-кальцита в поверхностных осадках рассматриваемого участка разгрузки метан-содержащих флюидов [33, 34]. Профили вертикального распределения ТИС и CaO в керне АМК-6948 в совокупности с их устойчивой корреляционной зависимостью (R=0,78) косвенно говорят о совместном нахождении этих элементов, предположительно, в форме карбонатных минералов и/или раковин моллюсков. Однако при подготовке проб в керне АМК-6948 карбонатных стяжений обнаружено не было, а визуально наблюдаемые раковины были извлечены. Пик в профилях ТИС и CaO, приуроченный к горизонту 4–5 см, отражающий двукратное увеличение их концентраций, может объясняться наличием в пробе микрообломков раковин моллюсков, которые не были извлечены при подготовке проб ввиду их малых размеров. Рост концентраций ТИС и CaO с глубиной, вероятно, указывает на более глубокое положение зоны осаждения карбонатов на данном сиповом участке.

Содержание органического углерода в донных осадках зависит прежде всего от объема его потоков и от концентраций растворенного кислорода в водной толще [15]. Молекулярный состав органического вещества в данном районе [17] указывает на его преимущественно терригенное происхождение, а основными источниками служат речной сток (прежде всего р. Лена) и продукты разрушения берегового ледового комплекса.

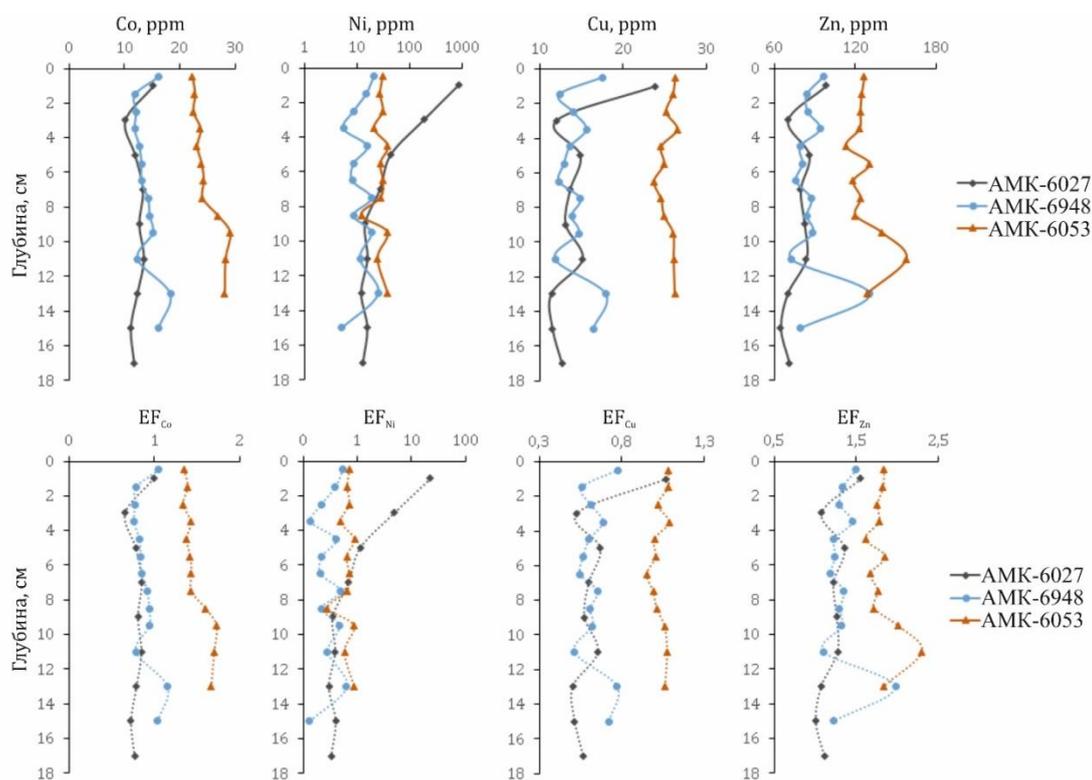


Рис. 4. Профили вертикального распределения концентраций (сверху) и факторов обогащения (снизу) Co, Ni, Cu и Zn в кернах AMK-6027, AMK-6948 и AMK-6053

Fig. 4. Vertical distributions of concentrations (top) and enrichment factors (bottom) of Co, Ni, Cu and Zn in cores AMK-6027, AMK-6948 and AMK-6053

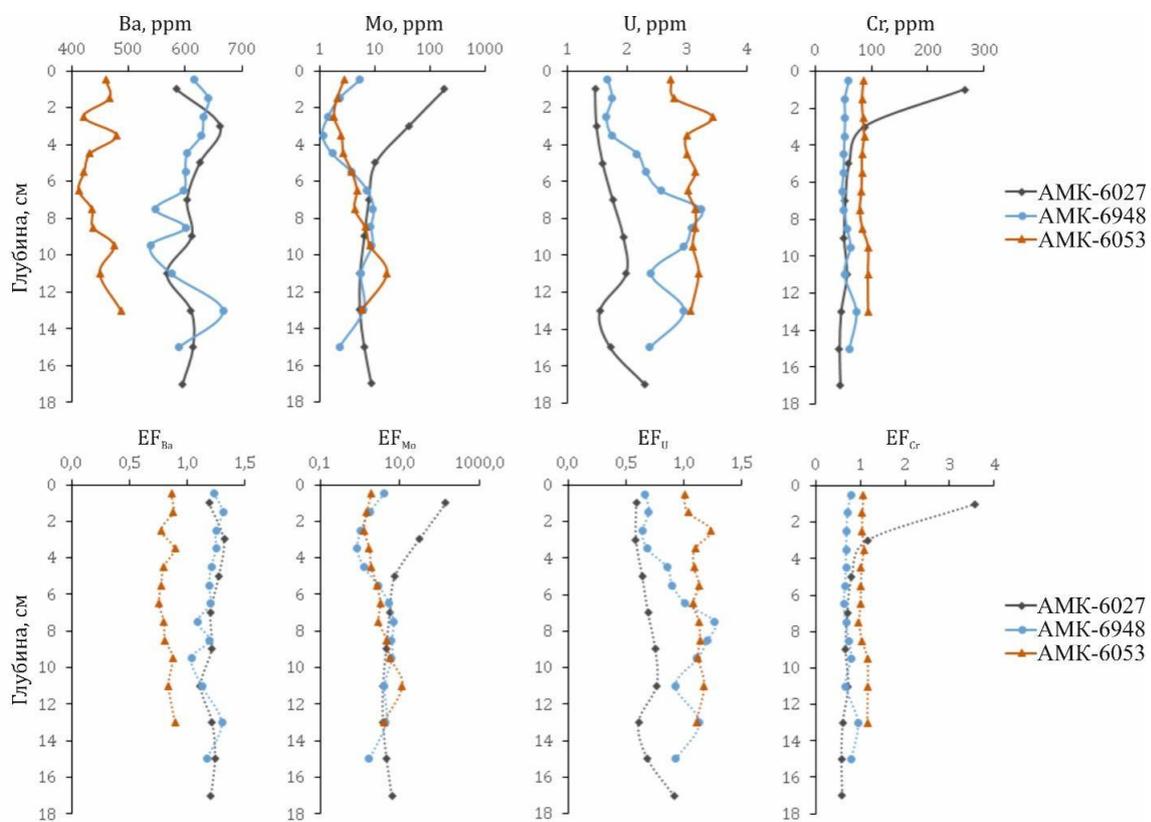


Рис. 5. Профили вертикального распределения концентраций (сверху) и факторов обогащения (снизу) Ba, Mo, U и Cr в кернах AMK-6027, AMK-6948 и AMK-6053

Fig. 5. Vertical distributions of concentrations (top) and enrichment factors (bottom) of Ba, Mo, U and Cr in cores AMK-6027, AMK-6948 and AMK-6053

По-видимому, разброс средних содержаний ТОС между двумя рассматриваемыми выборками проб является следствием неравномерного пространственного распределения потоков органического вещества на внешнем шельфе, что показано в работах [17, 35]. В отличие от керна АМК-6053, где вертикальный профиль ТОС достаточно выдержан, за исключением приповерхностного слоя, керны АМК-6027 и АМК-6948 показывают двукратное снижение концентраций органического углерода с глубиной, что вызвано его окислением в процессе диагенеза.

Как видно из рис. 3, вертикальное распределение Mn сопоставимо во всех колонках и характеризуется

обогащением верхних 2–3 см. Как правило, в окислительной среде Mn осаждается в виде оксидов (например, MnO_2 и $MnO(OH)$), в восстановительной растворяется до ионов Mn^{2+} или $MnCl^{2+}$ [36, 37]. Во время раннего диагенеза в поверхностном горизонте донных осадков образуются оксиды марганца, которые в дальнейшем захороняются и, оказываясь ниже зоны восстановления Mn, мигрируют вверх и окисляются повторно [15]. В итоге мощность обогащённого марганцем слоя зависит от мощности аэробного слоя и в данном случае, предположительно, не превышает 2 см как в осадках метановых сипов, так и на фоновой станции.

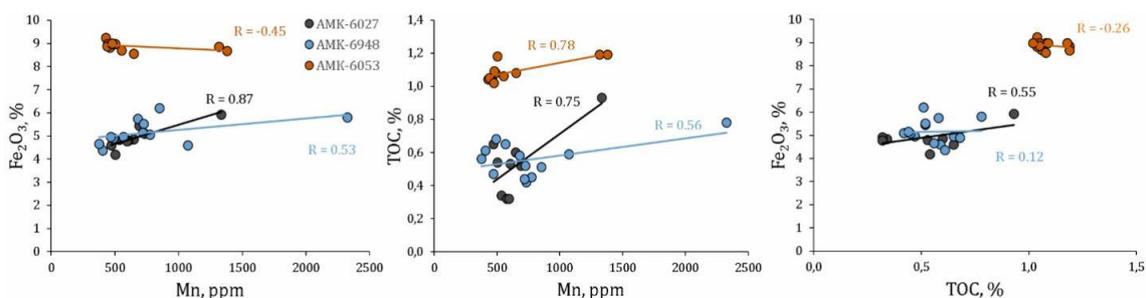


Рис. 6. Разброс содержаний Mn и Fe в зависимости от содержания общего органического углерода (ТОС) в кернах АМК-6027, АМК-6948 и АМК-6053

Fig. 6. Scatter plot of Mn and Fe content versus total organic carbon (TOC) content in cores AMK-6027, AMK-6948 and AMK-6053

Коэффициенты корреляции Mn с другими элементами (табл. 2) демонстрируют устойчивую ($R > 0,7$) прямую связь с ТОС, Fe, Cr, Co, Ni, Cu, Zn и Mo. Однако данные корреляционные связи наблюдаются только в колонке АМК-6027 и отсутствуют в других колонках, за исключением связей между Mn и ТОС. Схожая ситуация наблюдается и с органическим углеродом, поскольку устойчивые связи между ТОС и рассматриваемыми элементами выявлены лишь в колонке АМК-6027. Известно, что перечисленные выше элементы активно адсорбируются из морской воды окислами и гидроокислами железа и марганца и, соответственно, высвобождаются в восстановительных условиях [38]. Часть высвобожденных ионов может быть адсорбирована органическим веществом или образовывать сульфидные формы. Также, благодаря восходящим потокам флюидов, растворенные элементы могут мигрировать из более глубоких горизонтов к поверхности, где, оказываясь в восстановительных условиях, вновь адсорбируются окислами и/или гидроокислами железа и марганца [38, 39]. Характерной особенностью поведения Ni, Cu, Cr является резкое скачкообразное увеличение их содержания в верхней части колонки АМК-6027, что также отражается в значениях факторов обогащения этих элементов (рис. 4, 5). По-видимому, данный рост концентраций является отражением изменения окислительно-восстановительного потенциала, сопровождающегося переходом Ni, Cu, Cr из растворенной формы в твердую. Высокие значения коэффициентов корреляции свидетельствуют о важной роли органического углерода, железа и марганца в поведении Ni, Cu, Cr, что также отмечается другими ис-

следователями [40–42]. В типичных морских условиях сильное обогащение никелем может указывать на (1) высокий поток органического вещества, которое активно сорбирует такие элементы, как Ni, Cu, Zn и др., образуя металлоорганические комплексы, и (2) восстановительные условия, способствующие осаждению Ni и Cu в отложениях [38]. Поскольку концентрации ТОС даже в поверхностном слое колонки АМК-6027 не превышают 1 %, можно предположить, что поступление металлоорганических комплексов не является главной причиной обогащения осадков Ni. Вероятнее всего, восходящий поток метан-содержащего флюида способствует миграции растворенных элементов (Ni и, возможно, Cu) из нижележащих горизонтов к поверхности, где при смене окислительно-восстановительного потенциала происходит их осаждение. Сильные корреляционные связи Cr, Co, Ni, Cu, Zn с органическим углеродом, железом и марганцем могут свидетельствовать о том, что ключевым механизмом, контролирующим осаждение данных элементов в поверхностном слое осадков, является их сорбция органическим веществом и оксигидроксидами Fe и Mn. Однако следует отметить, что в данном случае концентрация ТОС, Fe и Mn не являются определяющим фактором, т. к. содержание Mn сопоставимо во всех кернах, а содержание ТОС и Fe в керне АМК-6053 значительно выше (табл. 1, рис. 6). Предположительно, избирательное обогащение поверхностного слоя осадков некоторыми редокс-чувствительными элементами вызвано миграцией метан-содержащих флюидов, способствующих переносу элементов в растворенной форме из более глубоких горизонтов.

Таблица 2. Коэффициенты корреляция между отдельными химическими элементами в ядрах АМК-6027, АМК-6948 и АМК-6053

Table 2. Correlation coefficient matrix for selected chemical elements of the cores АМК-6027, АМК-6948 and АМК-6053

	TOC	Fe	Mn	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ba	Mo	U
<i>АМК-6027</i>											
TOC	1	0,55	0,75	0,83	0,61	0,81	0,88	0,89	-0,11	0,80	-0,55
Fe		1	0,87	0,67	0,94	0,65	0,83	0,76	-0,84	0,65	-0,01
Mn			1	0,93	0,83	0,92	0,94	0,77	-0,52	0,92	-0,24
Cr				1	0,62	1	0,93	0,73	-0,19	1	-0,49
Co					1	0,58	0,79	0,81	-0,79	0,59	-0,06
Ni						1	0,91	0,69	-0,16	1	-0,49
Cu							1	0,91	-0,45	0,91	-0,32
Zn								1	-0,47	0,69	-0,26
Ba									1	0,73	-0,45
Mo										1	-0,48
U											1
<i>АМК-6948</i>											
TOC	1	0,12	0,56	-0,33	-0,25	0,02	0,30	0,06	0,29	-0,34	-0,75
Fe		1	0,53	0,24	0,34	0,46	0,07	-0,07	-0,64	0,74	0,35
Mn			1	0,17	0,39	0,52	0,46	0,14	0,00	0,22	-0,29
Cr				1	0,93	0,75	0,70	0,79	0,26	0,40	0,54
Co					1	0,68	0,74	0,64	0,18	0,43	0,49
Ni						1	0,49	0,72	0,17	0,55	0,30
Cu							1	0,74	0,51	-0,13	-0,10
Zn								1	0,68	0,13	0,20
Ba									1	-0,10	-0,30
Mo										1	0,79
U											1
<i>АМК-6053</i>											
TOC	1	-0,26	0,78	0,15	-0,18	-0,16	0,57	0,41	0,33	0,19	-0,50
Fe		1	-0,45	0,08	0,44	0,27	-0,52	0,20	-0,35	0,41	0,09
Mn			1	-0,13	-0,49	-0,03	0,48	-0,06	0,35	-0,34	-0,74
Cr				1	0,77	0,27	0,67	0,71	0,64	0,63	0,12
Co					1	0,02	0,25	0,63	0,38	0,78	0,28
Ni						1	-0,01	-0,02	0,13	-0,15	-0,09
Cu							1	0,49	0,87	0,19	-0,28
Zn								1	0,29	0,85	0,21
Ba									1	0,91	-0,42
Mo										1	0,28
U											1

Примечание/Note: полужирным выделены значения коэффициента корреляции, показывающие устойчивые прямые и обратные связи/values of correlation factor, indicating stable direct and indirect links are in bold.

Значение EF молибдена ($EF_{Mo}=139,9$) для горизонта 0–2 см колонки АМК-6027 указывает на высокую степень его аутигенного обогащения. Ниже горизонта 4 см среднее значение EF_{Mo} составляет 5,3. В свою очередь, коэффициенты корреляция Мо с Mn ($R=0,92$) и ТОС ($R=0,8$) подразумевают сильную связь молибдена с гидроокислами марганца и органическим углеродом в поверхностном аэробном слое осадка. В колонке АМК-6948 также отмечается обогащение молибдена в поверхностном слое, но в значительно меньшей степени ($EF_{Mo}=4$). С глубиной значения EF_{Mo} возрастают до 6,9 (горизонт 7–8 см) при среднем по всей колонке 3,6. При этом корреляционный анализ показывает отсутствие связей Мо с ТОС и Mn и наличие устойчивой прямой связи Мо с Fe ($R=0,74$). Данные корреляционные связи в совокупности с характером вертикального распределения Мо (рис. 5) отражают как минимум 2 разных механизма его накопления. В процессе раннего диагенеза осаждение растворенного Мо может происходить как в окислительных, так и в восстановительных условиях [43–45]. В случае с окислительными условиями наиболее известным и хорошо изученным механизмом является адсорбция Мо окислами и гидроокислами марганца [41]. Кроме этого, молибден мо-

жет активно захватываться органическим веществом, в частности гуминовыми кислотами [46, 47]. Точный механизм, с помощью которого растворенный Мо переходит в твердую фазу в восстановительных условиях, остается предметом обсуждения [48, 49]. Принято считать, что при высоких концентрациях сероводорода MoO_4^{2-} трансформируется в тетрагидромолибдат, а затем накапливается в Fe-Mo-S фазах [47, 50]. Таким образом, сильное обогащение молибдена в аэробном слое ядра АМК-6027, по-видимому, связано с его осаждением на поверхности окислов и гидроокислов марганца, а также с сорбцией органическим веществом. В нижней части ядра АМК-6027, а также в ядре АМК-6948 переход растворенного Мо в твердую форму, вероятно, связан с образованием сульфидных фаз в условиях насыщения H_2S .

Выводы

Было исследовано поведение углерода, железа, марганца и отдельных редокс-чувствительных микроэлементов в донных осадках внешнего шельфа моря Лаптевых, подверженных просачиванию метан-содержащих флюидов. Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

- 1) миграция метан-содержащих флюидов не оказывает существенного влияния на содержание органического углерода в донных осадках на количественном уровне. Разные концентрации ТОС в метановых и фоновых осадках могут объясняться спецификой пространственного распределения потоков органического вещества в исследуемом районе. Рост содержания ПИС с глубиной в метановых осадках является следствием анаэробного окисления метана, способствующего продуцированию растворенного неорганического углерода, что ранее отмечалось другими исследователями;
- 2) на участках разгрузки метана поверхностный слой донных осадков характеризуется обогащением Мо, Ni и Cr. Сорбция этих элементов органическим веществом и окислами/гидроксидами Fe-Mn, по-видимому, является ключевым механизмом, контролирующим осаждение Мо, Ni и Cr, на что указывают тесные корреляционные связи. Однако необходимо учитывать, что небольшой объем выборок проб по кернам (n=9...14) и узкий диапазон

концентраций ТОС и Fe могут значимо влиять на результаты корреляционного анализа;

- 3) обогащение поверхностного слоя осадков некоторыми редокс-чувствительными элементами характерно только для одного из участков разгрузки метана. Вероятно, это вызвано разными физико-химическими параметрами миграции метан-содержащих флюидов (прежде всего интенсивностью потока и концентрациями CH_4), способствующих переносу элементов в растворенной форме из более глубоких горизонтов.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ (аналитические исследования проведены в рамках реализации проекта № МК-1774.2021.1.5). Часть фактического материала для проведения исследований была получена в ходе экспедиции на НИС «Академик Мстислав Келдыш» (рейс 73, 2018 г.), организованной при поддержке Правительства Российской Федерации (грант № 14.Z.50.31.0012). И.П. Семилетов и О.В. Дударев выражают благодарность Российскому научному фонду (проект № 21-77-30001).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Early diagenesis and accumulation of redox-sensitive elements in East Siberian Arctic Shelves / L. Li, Y. Liu, X. Wang, L. Hu, G. Yang, H. Wang, A.A. Bosin, A.S. Astakhov, X. Shi // *Marine Geology*. – 2020. – V. 429. – 106309.
2. IPCC Special report on the ocean and cryosphere in a changing climate / Eds. H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer // *IPCC*. – 2019. URL: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/3/2019/11/07_SROCC_Ch03_FINAL.pdf (дата обращения 15.09.2021).
3. Increased fluxes of shelf-derived materials to the Central Arctic Ocean / L.E. Kipp, M.A. Charette, W.S. Moore, P.B. Henderson, I.G. Rigor // *Science Advances*. – 2018. – V. 4 – Article № eaao 1302.
4. Redox conditions and authigenic mineralization related to cold seeps in central Guaymas Basin, Gulf of California / F. Núñez-Useche, C. Canet, V. Liebetrau, T.P. Puig, A.C. Ponciano, P. Alfonso, C. Berndt, C. Hensen, C. Mortera-Gutierrez, A.A. Rodríguez-Díaz // *Marine Petroleum Geology*. – 2018. – V. 95. – P. 1–15.
5. The formation of authigenic carbonates at a methane seep site in the northern part of the Laptev sea / A. Ruban, M. Rudmin, O. Dudarev, A. Mazurov // *Minerals*. – 2020. – V. 10. – Article № 948.
6. Methane-consuming archaeobacteria in marine sediments / K.-U. Hinrichs, J.M. Hayes, S.P. Sylva, P.G. Brewer, E.F. DeLong // *Nature*. – 1999. – V. 398. – P. 802–805.
7. Geochemistry of cold seepage-impacted sediments: per-ascensum or per-descensum trace metal enrichment? / N. Tribovillard, E.A. du Châtelet, A. Gay, F. Barbecot, P. Sansjofre, J.L. Potdevin // *Chemical Geology*. – 2013. – V. 340. – P. 1–12.
8. Gas seeps at the edge of the gas hydrate stability zone on Brazil's continental margin / M. Ketzer, D. Praeg, M.A.G. Pivel, A.H. Augustin, L.F. Rodrigues, A.R. Viana, J.A. Cupertino // *Geosciences*. – 2019. – V. 9. – Article № 193.
9. Impact of anaerobic oxidation of methane on the geochemical cycle of redox-sensitive elements at cold-seep sites of the northern South China Sea / Y. Hu, D. Feng, Q. Liang, Z. Xia, L. Chen, D. Chen // *Deep-Sea Research II*. – 2015. – V. 122. – P. 84–94.
10. Early diagenesis of redox-sensitive trace metals in the Peru upwelling area – response to ENSO-related oxygen fluctuations in the water column / F. Scholz, C. Hensen, A. Noffke, A. Rohde, V. Liebetrau, K. Wallmann // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2011. – V. 75. – P. 7257–7276.
11. Evidence of intense methane seepages from molybdenum enrichments in gas hydrate-bearing sediments of the northern South China Sea / F. Chen, Y. Hu, D. Feng, X. Zhang, S. Cheng, J. Cao, H. Lu, D. Chen // *Chemical Geology*. – 2016. – V. 443. – P. 173–181.
12. Dickens G.R. Sulfate profiles and barium fronts in sediment on the Blake Ridge: present and past methane fluxes through a large as hydrate reservoir // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2001. – V. 65. – P. 529–543.
13. New insights into cerium anomalies and mechanisms of trace metal enrichment in authigenic carbonate from hydrocarbon seeps / Y. Hu, D. Feng, J. Peckmann, H.H. Roberts, D. Chen // *Chemical Geology*. – 2014. – V. 381. – P. 55–66.
14. Contribution of cold seep barite to the barium geochemical budget of a marginal basin / E.L. McQuay, M.E. Torres, R.W. Collier, C.A. Huh, J. McManus // *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. – 2008. – V. 55. – P. 801–811.
15. Geochemistry of deep sea sediments at cold seep sites in the Nankai Trough: insights into the effect of anaerobic oxidation of methane / H. Sato, K.I. Hayashi, Y. Ogawa, K. Kawamura // *Marine Geology*. – 2012. – V. 323–325. – P. 47–55.
16. Geochemical signatures of intense episodic anaerobic oxidation of methane in near-surface sediments of a recently discovered cold seep (Kveithola trough, NW Barents Sea) / M. Bazzaro, N. Ogrinc, F. Relitti, R.G. Lucchi, M. Giani, G. Adami, E. Pavoni, C. De Vittor // *Marine Geology*. – 2020. – V. 425. – 106189.
17. Contrasting composition of terrigenous organic matter in the dissolved, particulate and sedimentary organic carbon pools on the outer East Siberian Arctic Shelf / J.A. Salvadó, T. Tesi, M. Sundbom, E. Karlsson, M. Kruså, I.P. Semiletov, E. Panova, Ö. Gustafsson // *Biogeosciences*. – 2016. – V. 13. – P. 6121–6138.
18. Razumov S.O., Grigoriev M.N. Modeling of coastal dynamics of the Laptev and East Siberian seas in the second half of Holocene // *Earth's Cryosphere*. – 2017. – V. 21. – P. 36–45.
19. Methane seeps on the outer shelf of the Laptev Sea: characteristic features, structural control, and benthic fauna / B. Baranov, S. Galkin, A. Vedenin, K. Dozorova, A. Gebruk, M. Flint // *Geo-Marine Letters*. – 2020. – V. 40. – P. 541–557.
20. Mechanisms responsible for gas emission and underwater permafrost degradation on Laptev Sea shelf / L.I. Lobkovskiy, S.L. Nikiforov, N.N. Dmitrevskiy, N.V. Libina, I.P. Semiletov, R.A. Ananiev, A.A. Meluzov, A.G. Roslyakov // *Oceanology*. – 2015. – V. 55. – P. 312–320.
21. The East Siberian Arctic Shelf: towards further assessment of permafrost-related methane fluxes and role of sea ice / N. Shakhova, I. Semiletov, V. Sergienko, L. Lobkovsky, V. Yusupov, A. Salyuk, A. Salomatina, D. Chernykh, D. Kosmach, G. Panteleev, D. Nicolsky, V. Samarkin, S. Joye, A. Charkin, O. Dudarev, A. Meluzov, Ö. Gustafsson // *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. – 2015. – V. 373. – 20140451.
22. Source apportionment of methane escaping the subsea permafrost system in the outer Eurasian Arctic Shelf / J. Steinbach,

- H. Holmstrand, K. Shcherbakova, D. Kosmach, V. Brüchert, N. Shakhova, A. Salyuk, C.J. Sapart, D. Chernykh, R. Noormets, I. Semiletov, Ö. Gustafsson // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. – 2021. – V. 118. – № 10. – e2019672118.
23. Драчев С.С. О тектонике фундамента шельфа моря Лаптевых // *Геотектоника*. – 2002. – № 6. – P. 60–76.
24. Sekretov S.B. Structure and tectonic evolution of the Southern Eurasia Basin, Arctic Ocean // *Tectonophysics*. – 2002. – V. 351. – P. 193–243.
25. Деградация подводной мерзлоты и разрушение гидратов шельфа морей Восточной Арктики как возможная причина «метановой катастрофы»: некоторые результаты комплексных исследований 2011 года / В.И. Сергиенко, Л.И. Лобковский, И.П. Семилетов, О.В. Дударев, Н.Н. Дмитриевский, Н.Е. Шахова, Н.Н. Романовский, Д.А. Космач, Д.Н. Никольский, С.Л. Никифоров, А.С. Саломатин, П.А. Ананьев, А.Г. Росляков, А.Н. Салюк, В.В. Карнаух, Д.Б. Черных, В.Е. Тумской, В.И. Юсупов, А.В. Куриленко, Е.М. Чувиллин, Б.А. Буханов // *Доклады Академии наук*. – 2012. – Т. 446. – № 3. – С. 330–335.
26. Thermokarst and land-ocean interactions, Laptev Sea region, Russia / N.N. Romanovskii, H.W. Hubberten, A.V. Gavrillov, V.E. Tumskoy, G.S. Tipenko, M.N. Grigoriev, C. Siegert // *Permafrost and Periglacial Processes*. – 2000. – V. 11. – P. 137–152.
27. Shakhova N., Semiletov I. Methane release and coastal environment in the East Siberian Arctic shelf // *Journal of Marine Systems*. – 2007. – V. 66. – P. 227–243.
28. McLennan S.M. Relationships between the trace element composition of sedimentary rocks and upper continental crust // *Geochemistry, Geophys. Geosystems*. – 2001. – V. 2. – 2000GC000109.
29. Methane-related authigenic carbonates of Eastern Mediterranean Sea mud volcanoes and their possible relation to gas hydrate destabilisation / G. Aloisi, C. Pierre, J.M. Rouchy, J.P. Foucher, J. Woodside // *Earth and Planetary Science Letters*. – 2000. – V. 184. – P. 321–338.
30. Sr/Ca and Mg/Ca ratios in Niger Delta sediments: implications for authigenic carbonate genesis in cold seep environments / G. Bayon, C. Pierre, J. Etoubleau, M. Voisset, E. Cauquil, T. Marsset, N. Sultan, E. Le Drezzen, Y. Fouquet // *Marine Geology*. – 2007. – V. 241. – P. 93–109.
31. Using sediment geochemistry to infer temporal variation of methane flux at a cold seep in the South China Sea / N. Li, D. Feng, L. Chen, H. Wang, D. Chen // *Marine Petroleum Geology*. – 2016. – V. 77. – P. 835–845.
32. Luff R., Wallmann K., Aloisi G. Numerical modeling of carbonate crust formation at cold vent sites: significance for fluid and methane budgets and chemosynthetic biological communities // *Earth and Planetary Science Letters*. – 2004. – V. 221. – P. 337–353.
33. Methane-derived authigenic carbonates on the seafloor of the Laptev Sea shelf / M.D. Kravchishina, A.Y. Lein, M.V. Flint, B.V. Baranov, A.Y. Miroshnikov, E.O. Dubinina, O.M. Dara, A.G. Boev, A.S. Savvichev // *Frontiers in Marine Science*. – 2021. – V. 8. – 690304.
34. Аутигенные минералы в донных осадках силовых областей моря Лаптевых / А.С. Рубан, М.А. Рудмин, Е.В. Гершелис, А.А. Леонов, А.К. Мазуров, О.В. Дударев, И.П. Семилетов // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2020. – Т. 331. – № 7. – С. 24–36.
35. Carbon geochemistry of plankton-dominated samples in the Laptev and East Siberian shelves: contrasts in suspended particle composition / T. Tesi, M.C. Geibel, C. Pearce, E. Panova, J.E. Vonk, E. Karlsson, A.J. Salvado, M. Kruså, L. Bröder, C. Humborg, I. Semiletov, Ö. Gustafsson // *Ocean Science*. – 2017. – V. 13. – P. 735–748.
36. Early oxidation of organic matter in pelagic sediments of the eastern equatorial Atlantic: suboxic diagenesis / P.N. Froelich, G.P. Klinkhammer, M.L. Bender, N.A. Luedtke, G.R. Heath, D. Cullen, P. Dauphin, D. Hammond, B. Hartman, V. Maynard // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1979. – V. 43. – P. 1075–1090.
37. Bruland K.W. Trace metals in sea-water // *Chemical Oceanographic / Eds. J.P. Riley, R. Chester*. – London: Academic Press, 1983. – V. 8. – P. 157–220.
38. Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies: an update / N. Tribouillard, T.J. Algeo, T. Lyons, A. Riboulleau // *Chemical Geology*. – 2006. – V. 232. – P. 12–32.
39. Geochemistry and mineralogy of sediments and authigenic carbonates from the Malta Plateau, Strait of Sicily (Central Mediterranean): relationships with mud/fluid release from a mud volcano system / M. Cangemi, R. Di Leonardo, A. Bellanca, A. Cundy, R. Neri, M. Angelone // *Chemical Geology*. – 2010. – V. 276. – P. 294–308.
40. Enrichment of Trace Metals (V, Cu, Co, Ni, and Mo) in Arctic Sediments – From Siberian Arctic Shelves to the Basin / L. Li, X. Wang, Y. Ren, H. Su, L. Hu, G. Yang, Z. Li, A.A. Bosin, A.S. Astakhov, J. Chen, Y. Liu, X. Shi // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. – 2021. – V. 126. – e2020JC016960.
41. Sundby B., Martinez P., Gobeil C. Comparative geochemistry of cadmium, rhenium, uranium, and molybdenum in continental margin sediments // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2004. – V. 68. – P. 2485–2493.
42. Formation of authigenic carbonates at a methane seep site in the middle Okinawa Trough, East China Sea / M. Wang, Q. Li, F. Cai, J. Liang, G. Yan, Z. Wang, Y. Sun, D. Luo, G. Dong, Y. Cao // *Journal of Asian Earth Sciences*. – 2019. – V. 185. – 104028.
43. Calvert S.E., Pedersen T.F. Geochemistry of recent oxic and anoxic marine sediments: implications for the geological record // *Marine Geology*. – 1993. – V. 113. – P. 67–88.
44. The distribution of Mo, U, and Cd in relation to major redox species in muddy sediments of the Bay of Biscay / G. Chaillou, P. Anschutz, G. Lavaux, J. Schafer, G. Blanc // *Marine Chemistry*. – 2002. – V. 80. – P. 41–59.
45. Diagenesis of oxyanions (V, U, Re, and Mo) in pore waters and sediments from a continental margin / J.L. Morford, S.R. Emerson, E.J. Breckel, S.H. Kim // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2005. – V. 69. – P. 5021–5032.
46. Algeo T.J., Lyons T.W. Mo–total organic carbon covariation in modern anoxic marine environments: implications for analysis of paleoredox and paleohydrographic conditions // *Paleoceanography*. – 2006. – V. 21. – PA1016.
47. Mechanism of molybdenum removal from the sea and its concentration in black shales: EXAFS evidence / G.R. Helz, C.V. Miller, J.M. Charnock, J.F.W. Mosselmans, R.A.D. Patrick, C.D. Garner, D.J. Vaughan // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1996. – V. 60. – P. 3631–3642.
48. Does pyrite act as an important host for molybdenum in modern and ancient euxinic sediments? / A. Chappaz, T.W. Lyons, D.D. Gregory, C.T. Reinhard, B.C. Gill, C. Li, R.R. Large // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2014. – V. 126. – P. 112–122.
49. Early diagenesis and trace element accumulation in North American Arctic margin sediments / Z.Z.A. Kuzyk, C. Gobeil, M.A. Goñi, R.W. Macdonald // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2017. – V. 203. – P. 175–200.
50. Multiple sulfur isotope constraints on sulfate-driven anaerobic oxidation of methane: evidence from authigenic pyrite in seepage areas of the South China Sea / Z. Lin, X. Sun, H. Strauss, Y. Lu, J. Gong, L. Xu, H. Lu, B.M.A. Teichert, J. Peckmann // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2017. – V. 211. – P. 153–173.

Поступила 24.11.2021 г.

Информация об авторах

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

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

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

Милевский Я.В., студент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Семилетов И.П., член-корреспондент РАН, доктор географических наук, заведующий лабораторией арктических исследований Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева ДВО РАН; профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

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

Дударев О.В., доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник лаборатории арктических исследований Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева ДВО РАН.

UDC 550.42; 550.47

GEOCHEMICAL SPECIFIC OF SEDIMENTS AT METHANE COLD SEEP SITE ON THE LAPTEV SEA OUTER SHELF

Alexey S. Ruban¹,
ruban@tpu.ru

Maxim A. Rudmin¹,
rudminma@tpu.ru

Yakov V. Milevsky¹,
yvm16@tpu.ru

Alexey K. Mazurov¹,
akm@tpu.ru

Igor P. Semiletov^{2,1},
ipsemiletov@alaska.edu

Elena V. Gershelis¹,
elenapanova@tpu.ru

Oleg V. Dudarev²,
dudarev@poi.dvo.ru

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

² Pacific Oceanological Institute FEB RAS,
43, Baltiyskaya street, Vladivostok, 690041, Russia.

Relevance. A specific feature of the Laptev Sea shelf is the sites of discharge of methane-containing fluids from the surface of the seabed into the water column (methane cold seeps). The key biogeochemical processes occurring during methane migration through the sedimentary environment are anaerobic oxidation of methane and bacterial sulfate reduction. The activity of these processes encourages a change in the redox conditions of sedimentation, which affects the biogeochemical cycles of some redox-sensitive elements.

The aim of the research is to study the influence of methane-containing fluids on the geochemical cycles of iron, carbon and some redox-sensitive elements.

Objects. The data of the concentrations of carbon, iron, and some of redox-sensitive elements (Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Cr, Ba, Mo, U) in three bottom sediment cores sampled on the outer shelf of the Laptev Sea were analyzed. Two of the three cores were obtained at methane cold seep sites and were considered as sediments subject to anaerobic methane oxidation.

Methods: pyrolysis (Rock-Eval 6 Turbo, Vinci Technologies), X-Ray analysis (HORIBA X-Ray Analytical Microscope XGT 7200), Inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS, ELAN DRC-e).

Results. TOC and Fe contents in sediments do not reflect the impact of anaerobic oxidation on their geochemical cycles and controlled by the specifics of the spatial distribution of sedimentary material. In all the studied cores, there are elevated Mn concentrations confined to the surface layer of sediments. At methane cold seep sites, the surface layer of bottom sediments is characterized by enrichment in Mo, Ni and Cr. The selective enrichment of the surface layer of sediments with some redox-sensitive elements can be caused by the migration of methane-containing fluids, which facilitate the transport of elements in dissolved form from deeper horizons. The sorption of these elements by organic matter and Fe-Mn oxihydroxides appears to be the key mechanism controlling the deposition of Mo, Ni, and Cr.

Key words:

Geochemistry, methane seeps, anaerobic methane oxidation, Laptev Sea.

The research was supported by the grant from the President of the Russian Federation to support young Russian scientists (laboratory investigations were carried out within the framework of the project no. MK-1774.2021.1.5). Part of material for research was obtained during expedition on the R/V «Akademik Mstislav Keldysh» (cruise no. 73, 2018), organized with the support of the Russian Federation Government (grant no. 14.Z.50.31.0012). I.P. Semiletov and O.V. Dudarev thank the Russian Science Foundation (project No. 21-77-30001).

REFERENCES

- Li L., Liu Y., Wang X., Hu L., Yang G., Wang H., Bosin A.A., Astakhov A.S., Shi X.. Early diagenesis and accumulation of redox-sensitive elements in East Siberian Arctic Shelves. *Marine Geology*, 2020, vol. 429, 106309.
- IPCC special report on the ocean and cryosphere in a changing climate. Eds. H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer. *IPCC*, 2019. Available at: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/3/2019/11/07_SROCC_Ch03_FINAL.pdf (accessed 15 September 2021).
- Kipp L.E., Charette M.A., Moore W.S., Henderson P.B., Rigor I.G. Increased fluxes of shelf-derived materials to the Central Arctic Ocean. *Science Advances*, 2018, 4, eaao 1302.
- Núñez-Useche F., Canet C., Liebetrau V., Puig T.P., Ponciano A.C., Alfonso P., Berndt C., Hensen C., Mortera-Gutierrez C., Rodríguez-Díaz A.A. Redox conditions and authigenic mineralization related to cold seeps in central Guaymas Basin, Gulf of California. *Marine Petroleum Geology*, 2018, vol. 95, pp. 1–15.
- Ruban A., Rudmin M., Dudarev O., Mazurov A. The formation of authigenic carbonates at a methane seep site in the northern part of the Laptev Sea. *Minerals*, 2020, vol. 10, article no. 948.
- Hinrichs K.-U., Hayes J.M., Sylva S.P., Brewer P.G., DeLong E.F. Methane-consuming archaeobacteria in marine sediments. *Nature*, 1999, vol. 398, pp. 802–805.
- Tribouillard N., du Châtelet E.A., Gay A., Barbecot F., Sansjofre P., Potdevin J.L. Geochemistry of cold seepage-impacted sediments: Per-ascension or per-descension trace metal enrichment? *Chemical Geology*, 2013, vol. 340, pp. 1–12.
- Ketzer M., Praeg D., Pivel M.A.G., Augustin A.H., Rodrigues L.F., Viana A.R., Cupertino J.A. Gas seeps at the edge of the gas

- hydrate stability zone on Brazil's continental margin. *Geosciences*, 2019, vol. 9, article no. 193.
9. Hu Y., Feng D., Liang Q., Xia Z., Chen L., Chen D. Impact of anaerobic oxidation of methane on the geochemical cycle of redox-sensitive elements at cold-seep sites of the northern South China Sea. *Deep-Sea Research II*, 2015, vol. 122, pp. 84–94.
 10. Scholz F., Hensen C., Noffke A., Rohde A., Liebetrau V., Wallmann K. Early diagenesis of redox-sensitive trace metals in the Peru upwelling area – response to ENSO-related oxygen fluctuations in the water column. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2011, vol. 75, pp. 7257–7276.
 11. Chen F., Hu Y., Feng D., Zhang X., Cheng S., Cao J., Lu H., Chen D. Evidence of intense methane seepages from molybdenum enrichments in gas hydrate-bearing sediments of the northern South China Sea. *Chemical Geology*, 2016, vol. 443, pp. 173–181.
 12. Dickens G.R. Sulfate profiles and barium fronts in sediment on the Blake Ridge: Present and past methane fluxes through a large as hydrate reservoir. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2001, vol. 65, pp. 529–543.
 13. Hu Y., Feng D., Peckmann J., Roberts H.H., Chen D. New insights into cerium anomalies and mechanisms of trace metal enrichment in authigenic carbonate from hydrocarbon seeps. *Chemical Geology*, 2014, vol. 381, pp. 55–66.
 14. McQuay E.L., Torres M.E., Collier R.W., Huh C.A., McManus J. Contribution of cold seep barite to the barium geochemical budget of a marginal basin. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2008, vol. 55, pp. 801–811.
 15. Sato H., Hayashi K.I., Ogawa Y., Kawamura K. Geochemistry of deep sea sediments at cold seep sites in the Nankai Trough: insights into the effect of anaerobic oxidation of methane. *Marine Geology*, 2012, vol. 323–325, pp. 47–55.
 16. Bazzaro M., Ogrinc N., Relitti F., Lucchi R.G., Giani M., Adami G., Pavoni E., De Vittor C. Geochemical signatures of intense episodic anaerobic oxidation of methane in near-surface sediments of a recently discovered cold seep (Kveithola trough, NW Barents Sea). *Marine Geology*, 2020, vol. 425, 106189.
 17. Salvadó J.A., Tesi T., Sundbom M., Karlsson E., Krusá M., Semiletov I.P., Panova E., Gustafsson Ö. Contrasting composition of terrigenous organic matter in the dissolved, particulate and sedimentary organic carbon pools on the outer East Siberian Arctic Shelf. *Biogeosciences*, 2016, vol. 13, pp. 6121–6138.
 18. Razumov S.O., Grigoriev M.N. Modeling of coastal dynamics of the Laptev and East Siberian seas in the second half of Holocene. *Earth's Cryosphere*, 2017, vol. 21, pp. 36–45.
 19. Baranov B., Galkin S., Vedenin A., Dozorova K., Gebruk A., Flint M. Methane seeps on the outer shelf of the Laptev Sea: characteristic features, structural control, and benthic fauna. *Geo-Marine Letters*, 2020, vol. 40, pp. 541–557.
 20. Lobkovskiy L.I., Nikiforov S.L., Dmitrevskiy N.N., Libina N.V., Semiletov I.P., Ananiev R.A., Meluzov A.A., Roslyakov A.G. Mechanisms Responsible for Gas Emission and Underwater Permafrost Degradation on Laptev Sea Shelf. *Oceanology*, 2015, vol. 55, pp. 312–320.
 21. Shakhova N., Semiletov I., Sergienko V., Lobkovsky L., Yusupov V., Salyuk A., Salomatin A., Chernykh D., Kosmach D., Pantelev G., Nicolsky D., Samarkin V., Joye S., Charkin A., Dudarev O., Meluzov A., Gustafsson Ö. The East Siberian Arctic Shelf: towards further assessment of permafrost-related methane fluxes and role of sea ice. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2015, vol. 373, 20140451.
 22. Steinbach J., Holmstrand H., Shcherbakova K., Kosmach D., Brüchert V., Shakhova N., Salyuk A., Sapart C.J., Chernykh D., Noormets R., Semiletov I., Gustafsson Ö. Source apportionment of methane escaping the subsea permafrost system in the outer Eurasian Arctic Shelf. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2021, vol. 118, no. 10, e2019672118.
 23. Drachev S.S. On the basement tectonics of the Laptev Sea shelf. *Geotectonics*, 2002, vol. 36, pp. 483–497.
 24. Sekretov S.B. Structure and tectonic evolution of the Southern Eurasia Basin, Arctic Ocean. *Tectonophysics*, 2002, vol. 351, pp. 193–243.
 25. Sergienko V.I., Lobkovskii L.I., Semiletov I.P., Dudarev O.V., Dmitrievskii N.N., Shakhova N.E., Romanovskii N.N., Kosmach D.A., Nikol'skii D.N., Nikiforov S.I., Salomatin A.S., Anan'ev R.A., Roslyakov A.G., Salyuk A.N., Karnaukh V.V., Chernykh D.V., Tumskoï V.E., Yusupov V.I., Kurilenko A.V., Chuvilin E.M., Bukhanov B.A. The degradation of submarine permafrost and the destruction of hydrates on the shelf of east arctic seas as a potential cause of the Methane Catastrophe: Some results of integrated studies in 2011. *Doklady Earth Sciences*, 2012, vol. 446, pp. 1132–1137.
 26. Romanovskii N.N., Hubberten H.W., Gavrilov A.V., Tumskoï V.E., Tipenko G.S., Grigoriev M.N., Siegert C. Thermokarst and land-ocean interactions, Laptev Sea region, Russia. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2000, vol. 11, pp. 137–152.
 27. Shakhova N., Semiletov I. Methane release and coastal environment in the East Siberian Arctic shelf. *Journal of Marine Systems*, 2007, vol. 66, pp. 227–243.
 28. McLennan S.M. Relationships between the trace element composition of sedimentary rocks and upper continental crust. *Geochemistry, Geophys. Geosystems*, 2001, vol. 2, 2000GC000109.
 29. Aloisi G., Pierre C., Rouchy J.M., Foucher J.P., Woodside J. Methane-related authigenic carbonates of Eastern Mediterranean Sea mud volcanoes and their possible relation to gas hydrate destabilisation. *Earth and Planetary Science Letters*, 2000, vol. 184, pp. 321–338.
 30. Bayon G., Pierre C., Etoubleau J., Voisset M., Cauquil E., Marsset T., Sultan N., Le Drezen E., Fouquet Y. Sr/Ca and Mg/Ca ratios in Niger Delta sediments: Implications for authigenic carbonate genesis in cold seep environments. *Marine Geology*, 2007, vol. 241, pp. 93–109.
 31. Li N., Feng D., Chen L., Wang H., Chen D. Using sediment geochemistry to infer temporal variation of methane flux at a cold seep in the South China Sea. *Marine Petroleum Geology*, 2016, vol. 77, pp. 835–845.
 32. Luff R., Wallmann K., Aloisi G. Numerical modeling of carbonate crust formation at cold vent sites: significance for fluid and methane budgets and chemosynthetic biological communities. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, vol. 221, pp. 337–353.
 33. Kravchishina M.D., Lein A.Y., Flint M.V., Baranov B.V., Miroshnikov A.Y., Dubinina E.O., Dara O.M., Boev A.G., Savvichev A.S. Methane-derived authigenic carbonates on the seafloor of the Laptev Sea shelf. *Frontiers in Marine Science*, 2021, vol. 8, 690304.
 34. Ruban A.S., Rudmin M.A., Gershelis E.V., Leonov A.A., Mazurov A.K., Dudarev O.V., Semiletov I.P. Authigenic minerals in the bottom sediments from seeps of the Laptev Sea. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 7, pp. 24–36. In Rus.
 35. Tesi T., Geibel M.C., Pearce C., Panova E., Vonk J.E., Karlsson E., Salvadó A.J., Krusá M., Bröder L., Humborg C., Semiletov I., Gustafsson Ö. Carbon geochemistry of plankton-dominated samples in the Laptev and East Siberian shelves: contrasts in suspended particle composition. *Ocean Science*, 2017, vol. 13, pp. 735–748.
 36. Froelich P.N., Klinkhammer G.P., Bender M.L., Luedtke N.A., Heath G.R., Cullen D., Dauphin P., Hammond D., Hartman B., Maynard V. Early oxidation of organic matter in pelagic sediments of the eastern equatorial Atlantic: suboxic diagenesis. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1979, vol. 43, pp. 1075–1090.
 37. Bruland K.W. Trace metals in sea-water. *Chemical Oceanographic*. Eds. J.P. Riley, R. Chester. London, Academic Press, 1983. Vol. 8, pp. 157–220.
 38. Tribouillard N., Algeo T.J., Lyons T., Riboulleau A. Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies: an update. *Chemical Geology*, 2006, vol. 232, pp. 12–32.
 39. Cangemi M., Di Leonardo R., Bellanca A., Cundy A., Neri R., Angelone M. Geochemistry and mineralogy of sediments and authigenic carbonates from the Malta Plateau, Strait of Sicily (Central Mediterranean): relationships with mud/fluid release from a mud volcano system. *Chemical Geology*, 2010, vol. 276, pp. 294–308.
 40. Li L., Wang X., Ren Y., Su H., Hu L., Yang G., Li Z., Bosin A.A., Astakhov A.S., Chen J., Liu Y., Shi X. Enrichment of trace metals (V, Cu, Co, Ni, and Mo) in Arctic sediments –from Siberian Arctic shelves to the basin. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2021, vol. 126, e2020JC016960.
 41. Sundby B., Martinez P., Gobeil C. Comparative geochemistry of cadmium, rhenium, uranium, and molybdenum in continental

- margin sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2004, vol. 68, pp. 2485–2493.
42. Wang M., Li Q., Cai F., Liang J., Yan G., Wang Z., Sun Y., Luo D., Dong G., Cao Y. Formation of authigenic carbonates at a methane seep site in the middle Okinawa Trough, East China Sea. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2019, vol. 185, 104028.
 43. Calvert S.E., Pedersen T.F. Geochemistry of recent oxic and anoxic marine sediments: Implications for the geological record. *Marine Geology*, 1993, vol. 113, pp. 67–88.
 44. Chaillou G., Anschutz P., Lavaux G., Schafer J. and Blanc G. The distribution of Mo, U, and Cd in relation to major redox species in muddy sediments of the Bay of Biscay. *Marine Chemistry*, 2002, vol. 80, pp. 41–59.
 45. Morford J.L., Emerson S.R., Breckel E.J. and Kim S.H. Diagenesis of oxyanions (V, U, Re, and Mo) in pore waters and sediments from a continental margin. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2005, vol. 69, pp. 5021–5032.
 46. Algeo T.J., Lyons T.W. Mo–total organic carbon covariation in modern anoxic marine environments: Implications for analysis of paleoredox and paleohydrographic conditions. *Paleoceanography*, 2006, vol. 21, PA1016.
 47. Helz G.R., Miller C.V., Charnock J.M., Mosselmans J.F.W., Patrick R.A.D., Garner C.D., Vaughan D.J. Mechanism of molybdenum removal from the sea and its concentration in black shales: EXAFS evidence. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1996, vol. 60, pp. 3631–3642.
 48. Chappaz A., Lyons T.W., Gregory D.D., Reinhard C.T., Gill B.C., Li C., Large R.R. Does pyrite act as an important host for molybdenum in modern and ancient euxinic sediments? *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2014, vol. 126, pp. 112–122.
 49. Kuzyk Z.Z.A., Gobeil C., Goñi M.A., Macdonald R.W. Early diagenesis and trace element accumulation in North American Arctic margin sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2017, vol. 203, pp. 175–200.
 50. Lin Z., Sun X., Strauss H., Lu Y., Gong J., Xu L., Lu H., Teichert B.M.A., Peckmann J. Multiple sulfur isotope constraints on sulfate-driven anaerobic oxidation of methane: Evidence from authigenic pyrite in seepage areas of the South China Sea. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2017, vol. 211, pp. 153–173.

Received: 24 November 2021.

Information about the authors

Alexey S. Ruban, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

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

Yakov V. Milevsky, student, National Research Tomsk Polytechnic University.

Alexey K. Mazurov, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Igor P. Semiletov, Dr. Sc., corresponding member of the Russian Academy of Sciences, head of the Laboratory, Pacific Oceanological Institute FEB RAS; professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Elena V. Gershelis, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Oleg V. Dudarev, Dr. Sc., chief researcher, Pacific Oceanological Institute FEB RAS.

УДК 624.131

ОЦЕНКА ЭРОЗИОННОЙ ОПАСНОСТИ ВОДОСБОРА Р. КАРАБУЛА КРАСНОЯРСКОГО КРАЯ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬНОГО ОСВОЕНИЯ

Строкова Людмила Александровна,
sla@tpu.ru

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

Актуальность. Осуществление хозяйственной деятельности в южнотаежных районах Красноярского края сталкивается с серьезными трудностями в плане почти полного отсутствия актуальной, точной геопространственной информации об опасных процессах и явлениях. Получение такой информации о современном состоянии опасных геологических процессов, характере их пространственного распределения, интенсивности развития является крайне необходимым в процессе хозяйственного освоения региона.

Цель: оконтурить зоны с разной степенью восприимчивости к водной эрозии.

Методы. На первом этапе в ArcGIS подготовлена электронная векторная карта границ водосбора. Далее был разработан перечень геоморфологических, гидрологических, геологических, климатических факторов, определяющих интенсивность эрозионных процессов. По этим параметрам составлены тематические карты. Затем выполнена оценка веса каждого фактора в возникновении и развитии эрозионных процессов методом анализа иерархий. В результате наложения взвешенных тематических карт по каждому фактору была создана итоговая прогнозная карта, с выделением зон с разной степенью предрасположенности к эрозии.

Результаты работы и область их применения. Наиболее предрасположены к эрозии верховья реки, занятое преимущественно лиственными лесами, средней восприимчивостью характеризуется территория левобережья средней части реки, более освоенной в хозяйственном отношении, наименее предрасположено к эрозии низовья реки, занятое преимущественно лиственнично-сосновыми лесами. Полученные данные рекомендуются использовать при проектировании противоэрозионных мероприятий. Для исследуемой территории была создана цифровая модель рельефа для инженерно-геологического районирования. Выбраны, рассчитаны и проанализированы основные параметры рельефа, геологии, тектоники, растительного покрова, распределения осадков, определяющие развитие эрозионных процессов. Создана карта инженерно-геологического районирования территории по степени восприимчивости к эрозии.

Ключевые слова:

Эрозия, инженерно-геологическое районирование, цифровая модель рельефа, предрасположенность, метод анализа иерархий, картографирование.

Введение

Осуществление хозяйственной деятельности в малонаселенных районах затруднено в связи с практически полным отсутствием актуальной, точной геопространственной информации об опасных процессах и явлениях. Получение такой информации о современном состоянии опасных геологических процессов, характере их пространственного распределения, интенсивности развития является крайне необходимым при освоении.

При изучении такого процесса как водная эрозия, принято проводить исследования на бассейновом уровне. По мнению С.В. Пьянкова, А.Н. Шихова и др. [1–3], именно речной бассейн является элементарной геосистемой, в которой отражаются природные закономерности, такие как целостность, уникальность, иерархичность, устойчивость и саморегулирование. Функциональная целостность бассейнов обуславливается существующими вертикальными и горизонтальными связями, а также балансом между ними. С конца XX в. созданы различные модели эрозии почвенного покрова, такие как AGNPS (Agricultural Non-Point-Source Pollution Model), WEPP (Water erosion prediction project), USLE (Universal Soil Loss Equation), RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) и MUSLE (Modification Universal Soil Loss Equation). Результаты моделирования на базе ГИС-

технологий были адаптированы для различных речных бассейнов в Бангладеш, Венесуэле, Зимбабве, Индии, Иране, Кении, Марокко, Нигерии, Пакистане, Перу, Сирии, Тунисе, Египте, Эфиопии [4–37].

Для оценки значимости факторов при определении пространственных закономерностей распространения геологических опасностей в зависимости от региональных геологических, морфометрических, климатических, техногенных условий используются различные статистические и детерминированные подходы [38–63]. Методы, основанные на анализе иерархий (АНР), применялись во многих недавних исследованиях [14, 16, 21, 33, 38, 42] в области инженерной геологии и гидрогеологии, особенно при оценке подверженности территории склоновым процессам, суффозии, загрязнению подземных вод и другим. Однако этот метод все еще является новым для изучения подверженности территории водной эрозии. В настоящем исследовании предпринята попытка оценить восприимчивость территории водосбора реки Карабула к водной эрозии с помощью метода анализа иерархий АНР. Актуальность исследования обусловлена активным освоением данного района в связи со строительством здесь Богучанского алюминиевого завода. Результаты этой работы могут быть полезны лицам, принимающим решения по землепользованию и природообустройству района.

Характеристика инженерно-геологических условий территории

Участок расположен в Богучанском районе Красноярского края, в 500 км северо-восточнее г. Красноярск.

В *геоморфологическом* отношении район исследования располагается в южной части Средне-Сибирского плоскогорья на Приангарском плато и представляет собой холмисто-грядовое густо расчлененное плато с абсолютными отметками от 124 до 493 м. По генетическим особенностям рельефа в районе выделяются два основных типа: структурно-денудационный и эрозионно-аккумулятивный. В пределах структурно-денудационного рельефа по степени и характеру расчлененности выделяются следующие морфологические типы: горно-холмистый рельеф на ордовикских отложениях; полого-холмистый рельеф на верхнепалеозойских и юрских отложениях; останцовый рельеф на трапповых полях. Эрозионно-аккумулятивный рельеф приурочен к долине р. Карабула и ее притоков.

Гидрографическая сеть Богучанского района принадлежит бассейну р. Ангара. Река Карабула берет начало в отрогах Бирюсинского плато (Иркутская область) и впадает в Ангару на 288 км от устья. Длина реки Карабула 212 км, площадь водосбора 5060 км². Общее падение реки 274 м, средневзвешенный уклон 1,1 ‰. Долина реки в верховьях широкая, V-образной формы, глубоко врезана (120...150 м), склоны высокие, но пологие. Склоны долины террасированы почти на всем протяжении. При выходе из приподнятого участка плато долина расширяется до 8...10 км. Пойма, шириной от 1 до 4 км, прерывистая, местами заболочена, сложена песками и супесями. Русло р. Карабула частично зарастает водной растительностью. Дно илистое и илисто-песчаное. Основными правыми притоками р. Карабула являются: р. Тандакея (длина 165 км), р. Андуиха (143 км), р. Чельчет (119 км), левыми притоками – р. Кунчеть (86 км), р. Кежма (78 км). Ширина долин мелких рек и ручьев, впадающих в Карабулу, обычно не превышает 1 км.

По данным многолетних режимных наблюдений за расходом и уровнем воды в р. Карабула (водопост д. Карабула) за 1951–2013 гг. установлено, что по условиям питания р. Карабула относится к смешанному типу с преобладанием снегового питания – 72 %, дождевое питание составляет 21 %, питание подземными водами – 7 %; уровни воды и расходы в зимний и весенний периоды минимальны, в осенний период достигают средних величин, а во время весеннего паводка, в мае–июне, резко возрастают. Максимальные расходы воды в этот период достигали значений 454 м³/с, при среднем многолетнем значении расходов 11,4 м³/с; среднегодовой модуль стока равен 3,41 л/с с 1 км².

Климат рассматриваемой территории резко континентальный с холодной продолжительной зимой, коротким относительно жарким летом и затяжной дождливой осенью. В любой сезон года возможны резкие изменения погоды, переход от тепла к холоду, резкие колебания температуры воздуха от месяца к месяцу, от суток к суткам и в течение суток. Годовая сумма осадков составляет 400...450 мм, из них жид-

ких – 234...253 мм, твердых – 110...159 мм, смешанных – 33...45 мм. Твердые осадки выпадают с октября по апрель, жидкие – с мая по сентябрь. Распределение осадков в течение года происходит неравномерно: на холодный период года приходится 25...40 % годовой суммы осадков, на теплый – 60...75 %. Месячный максимум осадков приходится на август.

В *геологическом* строении района принимают участие терригенные отложения нижнего и верхнего палеозоя, мезозоя и рыхлые образования кайнозоя. Палеозойские и мезозойские породы состоят в основном из песчаников, алевролитов, аргиллитов и представлены породами *верхоленской* E_{2vl} , *усть-кутской* O_{1up} , *ийской* O_{1is} , *бадарановской* O_{2bd} , *листвяжинской* C_{2-3ls} , *рыжковской* P_{1rz} , *ингамбинской* P_{1-2i} , *учамской* T_{1uc} , *перяясловской* J_{1pr} , *камалинской* J_{2kt} свит. Кайнозойские образования представлены дисперсными связными и несвязными грунтами *бельской* свиты Pg_3-N_{1bl} и четвертичными грунтами аллювиального генезиса (aQ_{III-n} , $a^{4-5}Q_{II}$), приуроченными к долине р. Карабула и ее притоков и делювиально-элювиального генезиса, приуроченными к водораздельным пространствам и пологим склонам.

Интрузивные образования представлены породами трапповой формации, отнесенной к *катангскому* комплексу (β - βT_{1kt}). Слагают они пластовые, реже дайкообразные секущие тела. Пластовые интрузии залегают почти горизонтально и, согласно слоистости отложений ордовика, карбона и перми, прослеживаются по берегам рек без перерыва на десятки километров, повторяя структурные особенности района. Мощность их варьирует от 2 до 160 м. Всего в вертикальном разрезе выделяется до четырех пластовых интрузий. Мощность даек варьирует от 6 до 20 м. Характерной особенностью траппов является их слабая дифференциация. Все они сходны по внешнему облику и минералогическому составу и представлены долеритами, оливиновыми долеритами, габбро-долеритами, долерит-порфиритами, микродолеритами и т. п.

В *тектоническом* отношении территория приурочена к северному борту Мурского прогиба Сибирской платформы. Выделяется два структурных этажа: нижний этаж, сложенный интенсивно дислоцированными верхнепротерозойскими породами фундамента платформы; верхний этаж, представленный палеозойскими, мезозойскими и кайнозойскими отложениями платформенного чехла. Разрывные нарушения в районе подразделяются на разломы донижнетриасового возраста (верхнепермская эпоха), предшествовавшие трапповому магматизму, и мезозойские нарушения.

По схеме *гидрогеологического* районирования территория работ расположена в пределах гидрогеологической структуры I порядка – Ангаро-Ленского артезианского бассейна в краевой северо-западной части Мурского артезианского бассейна, структуры II порядка. Мурский артезианский бассейн пластовых и блоково-пластовых вод приурочен к крупной тектонической впадине, выполненной отложениями кембрия, ордовика, силура, карбона, перми, триаса и

юры. По условиям залегания и характеру водовмещающих пород в пределах исследуемой территории выделяются семь водоносных комплексов. Минерализация изменяется от 0,5 до 10 г/л, по химическому составу встречаются воды: гидрокарбонатные, гидрокарбонатные кальциевые, сульфатные кальциевые.

Экзогенные геологические процессы и явления связаны главным образом с деятельностью подземных и поверхностных вод, которые проявились в формировании болот, оврагов, подмыве и обрушении берегов, суффозии и карста. Как правило, болота имеют кочкарный облик с частыми выходами воды на поверхность.

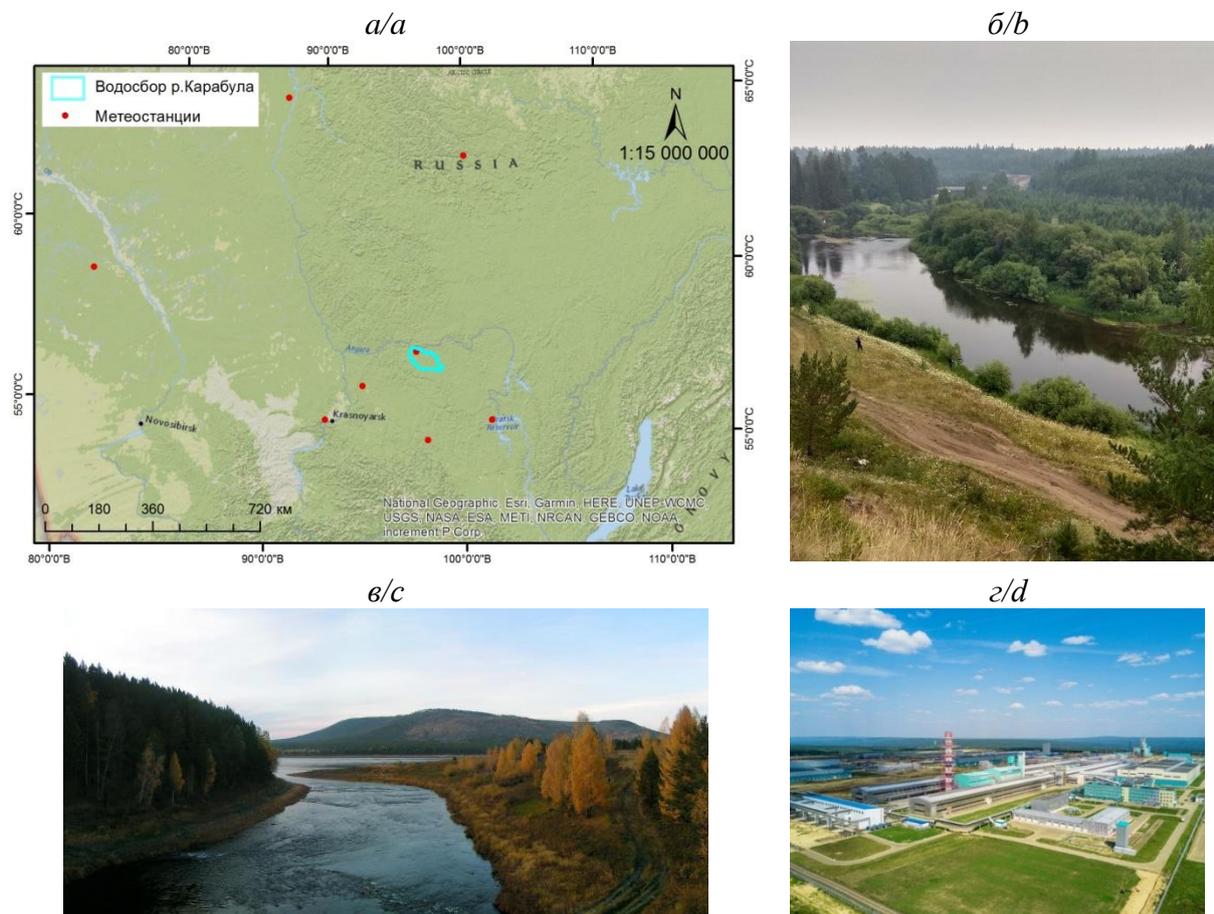


Рис. 1. Положение изучаемой территории (а); река Карабула в средней части (б) и перед впадением в Ангару (в); Богучанский алюминиевый завод возле п. Таежный (г)

Fig. 1. Location of the studied area (a); the Karabula River in the middle (b) and lower (c) parts; the Boguchany Aluminium Smelter/Boguchanskiy Aluminiumy Zavod near place Tazhnyy (d)

Методика работ

Построение карт восприимчивости осуществляется в следующей последовательности. Вначале выполняется подготовка тематических слоев факторов, обуславливающих возникновение геологического процесса и интенсивности его развития. Затем производится определение веса каждого фактора. В данной работе для определения веса использовался метод анализа иерархий. Далее тематические карты умножаются на соответствующие веса каждого фактора и объединяются в одну средствами наложения. После этого карта дифференцируется на категории с разной степенью восприимчивости в светофорной раскраске, и проводится проверка (рис. 2).

Подготовка тематических карт

Для построения тематических карт использовались данные открытых источников:

- 1) метеорологические данные по атмосферным осадкам на 2010–2019 гг. по восьми метеостанциям (их расположение показано на рис. 1, а)
- 2) карта наземного покрова России Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг»;
- 3) цифровая модель рельефа (ЦМР): а) шесть смежных снимков SRTM (n57_e096_1arc_v3; n57_e097_1arc_v3; n57_e098_1arc_v3; n58_e096_1arc_v3; n58_e097_1arc_v3; n58_e098_1arc_v3); б) два смежных снимка Landsat 8 с покрытием 141 колонка 19 ряд и 139 колонка 20 ряд на конец февраля и начало июня 2021 г. (LC08_L1GT_141019_20210225_20210304_02_T2; LC08_L1TP_141019_20210601_20210608_02_T1; LC08_L1TP_139020_20210227_20210304_02_T1; LC08_L1TP_139020_20210603_20210608_02_T1);
- 4) единая цифровая модель комплекта листа государственной геологической карты О-47 (Братск) масштаба 1:1000000 (ВСЕГЕИ, 2012 г.).

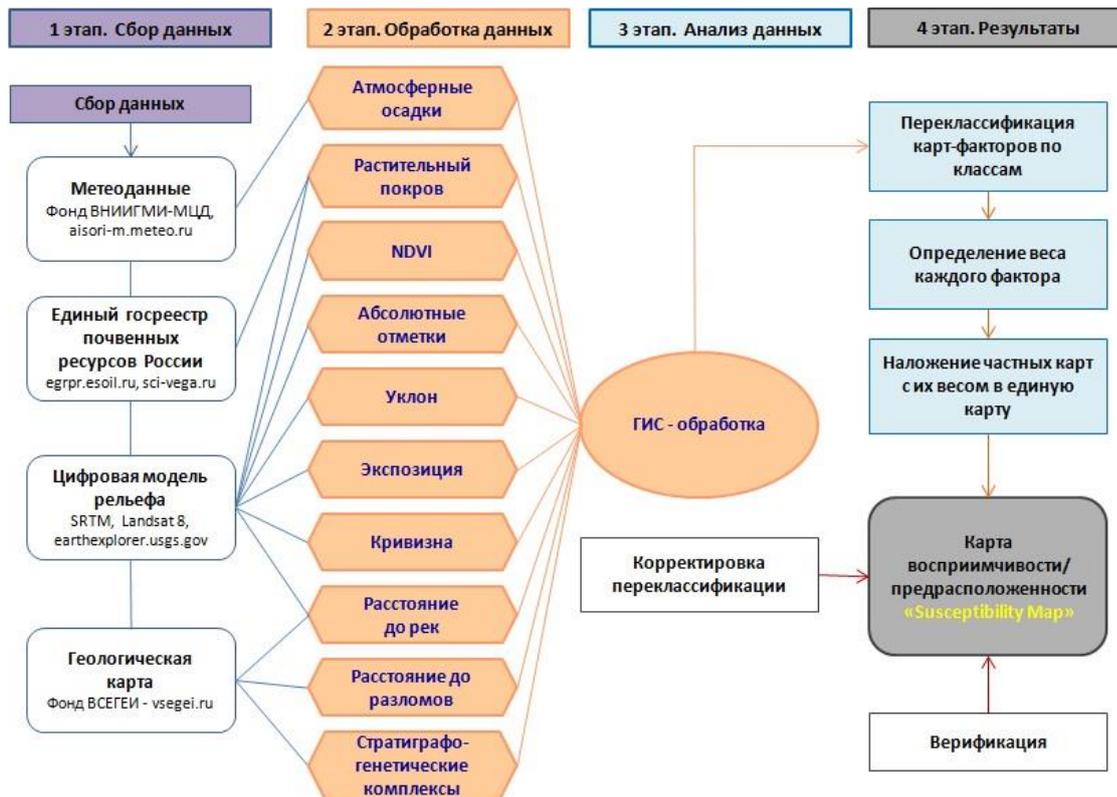


Рис. 2. Схема разработки карты

Fig. 2. Flowchart of mapping

В табл. 1 представлены перечни тематических слоев, источники получения и способы их ГИС-обработки в данном исследовании. Для обработки и

анализа использовалась географическая проекция UTM, Zone 47N, и все исходные данные были переведены в эту проекцию.

Таблица 1. Технология создания различных тематических слоев данных

Table 1. Techniques for production of various thematic data layers

Тематический слой Thematic layer	Источник Source	Инструменты ГИС-обработки Tools of Geoprocessing	Использование Usage
Абсолютные отметки Elevation	Радиолокационная топографическая миссия шаттла Shuttle Radar Topographic Mission – SRTM	Классификация ЦМР Classified from the DEM	Характеристика рельефа Terrain characteristics
Угол склона Slope angle		Пространственный анализ, Уклон Spatial Analyst, Slope	
Кривизна Curvature		Пространственный анализ, Кривизна Spatial Analyst, Curvature	
Экспозиция склона Slope aspect		Пространственный анализ, Экспозиция Spatial Analyst, Aspect	
Направление стока Flow direction	Цифровая модель листа O-47 Digital elevation model	Пространственный анализ, направление стока, кумулятивный сток, границы водосбора Spatial Analyst, Flow direction, Flow Accumulation, Watershed	Границы водосбора. Речная сеть Catchment boundaries. Drainage network
Расстояние до рек Distance to streams		Анализ близости, буфер Proximity analysis, buffer	Распределение рек Drainage network
Атмосферные осадки Mean annual precipitation	ВНИИГМИ-МЦД, aisori-m.meteo.ru	Пространственный анализ, интерполяция, кригинг Spatial analyst, interpolation, kriging	Распределение осадков Rainfall distribution
Вегетационный индекс NDVI Normalized Difference Vegetation Index	Снимки дистанционного зондирования Земли LANDSAT	Калькулятор растра Raster calculator	Характеристика плотности растительности Characteristics of vegetation density
Типизация подстилающей поверхности Land cover	LANDSAT sci-vega.ru	Пространственный анализ, многомерность, Неконтролируемая классификация изокластеров Spatial Analyst, Iso Cluster	Распределение типов подстилающей поверхности Land cover
Геология Geology	Геологическая карта O-47 Geological map vsegei.ru	Переклассификация Reclassification	Стратиграфо-генетические комплексы и состав пород Geological formations and lithology
Расстояние до разломов Distance to faults	Геологическая карта Geological map	Анализ близости, буфер Proximity analysis, buffer	Распределение разломов Faults distribution

Метод анализа иерархий (АНР)

Процедура АНР подразделяется на три этапа: определение иерархии целей, критериев и альтернатив; попарное сравнение значимости отдельных частных показателей для каждого уровня иерархии; ранжирование результатов попарного сравнения на общих уровнях иерархии. Первоначально этот подход подразумевает разделение вопроса принятия решений в последовательность важности критериев и альтернатив. В соответствии с важностью каждого фактора назначаются значения предпочтений по шкале Саати [16]. Парные сравнения заключаются в определении степеней доминирования (предпочтения) одного из критериев над другим. На следующем шаге определяются веса приоритетов каждого фактора путем вычисления нормализованного собственного вектора. После получения данных (обработки матриц суждений) следует определить их согласованность. Приемлемым является отношение согласованности (CR) не более 10 %.

Результаты

Наиболее значимыми факторами при оценке геологических процессов являются морфометрические характеристики поверхности.

Абсолютные отметки поверхности получены с цифровой модели рельефа путем классификации растра SRTM (рис. 3, а).

Уклон поверхности закономерно связан с экзогенными процессами и характеристиками ландшафта следующим образом: поверхностный сток и дренирование – чем круче склон, тем интенсивнее поверхностный сток и меньше инфильтрация влаги в почву; интенсивность эрозии растет экспоненциально с увеличением уклона; мощность почвенного профиля на склоне закономерно изменяется в соответствии с уклоном и относительной высотой; количество поступающей солнечной энергии также зависит от уклона, поскольку он определяет угол падения солнечных лучей на земную поверхность (рис. 3, б).

Экспозиция поверхности – угол по часовой стрелке между направлением на север и проекцией уклона на горизонтальную плоскость; фиксирует направление (азимут) максимального уклона (градиента) земной поверхности. Экспозиция характеризует основное направление линий тока, т. е. вода (или другой способный к перемещению материал) движется под действием силы тяжести вниз по склону в направлении, которое определяется экспозицией [1]. Эта зависимость положена в основу алгоритма моделирования направления поверхностного стока (Flow direction, рис. 3, в). Кроме того, экспозиция определяет ориентацию участка по отношению к потоку солнечных лучей и количество радиации, получаемой земной поверхностью, – инсоляцию. Экспозиция существенно влияет на микроклимат участка. В северном полушарии склоны южной экспозиции прогреваются лучше, чем северные склоны. Кроме того, южные склоны суше северных [2, 3].

Кривизна склона является основным морфометрическим параметром, рассчитываемым на основе производной второго порядка по ЦМР. Если уклон и экспозиция характеризуют градиент поверхности (его величину и направление), то кривизна фиксирует меру изменений этого градиента, т. е. является градиентом первой производной в заданном направлении. В общем, кривизну в некоторой точке поверхности можно описать как кривизну линии, образованной пересечением земной поверхности с плоскостью определенной ориентации, проходящей через заданную точку. Положительные значения характеризуют выпуклые участки склона, отрицательные – вогнутые (рис. 3, в).

Атмосферные осадки считаются важным фактором эрозии. Там, где скорость выпадения осадков высока, скорость эрозии также возрастает [16]. Тип осадков, их продолжительность и экстремальность в течение сезона и года влияют на процесс эрозии [2, 3]. На рис. 3, д показано распределение среднегодового количества осадков за десятилетний период в пределах водосборного бассейна р. Карабула, построенное методом крикинга.

Вегетационный индекс NDVI (рис. 3, е) показывает количество фотосинтетически активной биомассы. Открытые земли более уязвимы к эрозии, чем зеленые лесные зоны. Растительность сводит к минимуму потенциал эрозии. Положительные значения (0,44) в NDVI показывают леса, кустарники, в то время как отрицательные значения (–0,25) соответствуют воде, (–0,5) – бетону, асфальту.

Тип растительности (рис. 3, з). Покров поверхности определяет ее устойчивость к процессу эрозии [1–3, 16]. Тематический слой получен по снимкам Landsat-8 OLI (от Earth Explorer с разрешением 30 м). Для оценки землепользования использовался алгоритм неконтролируемой классификации изокластеров в ArcGIS, т. к. не было полевой проверки растительного покрова. По рекомендациям [64] для дешифрирования типов растительного покрова были созданы три RGB-композиции: два летних композита, состоящих из SWIR1-NIR-RED (синтез 6-5-4 каналов LANDSAT) и NIR-RED-GREEN (красные цвета, синтез 5-4-3 каналов LANDSAT), и один мультисезонный из ближнего инфракрасного (NIR) канала летнего снимка, ближнего инфракрасного (NIR) канала зимнего снимка и красного канала летнего снимка.

В синтезе каналов SWIR1-NIR-RED хвойные леса имеют темно-зеленый цвет, лиственные леса – ярко-зеленый (салатовый), смешанные леса отличаются различными переходными оттенками, в зависимости от доли хвойных (рис. 4). Смешанный лес со значительным участием широколиственных пород в этом синтезе может иметь слегка желтоватый оттенок, который и будет его отличительным признаком. В синтезе каналов NIR-RED-GREEN (красные цвета) на летнем снимке хвойные леса имеют темно-красный оттенок, мелколиственные леса – ярко-красный, а смешанные леса – переходные цвета. По композиту летнего и зимнего снимка лучше разделяются мелколиственный и смешанный лес.

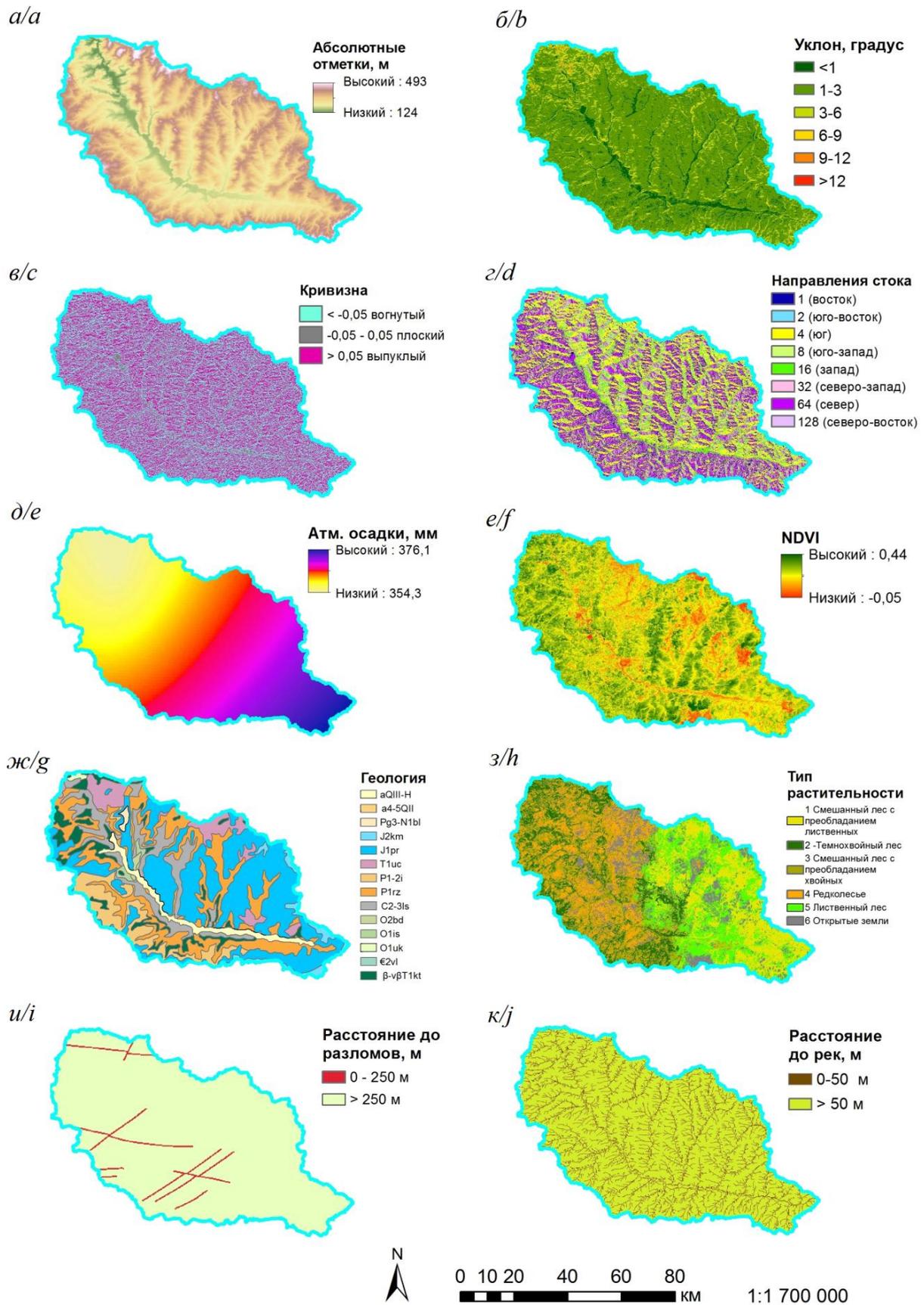


Рис. 3. Исходные слои для оценки эрозии
 Fig. 3. Data layers for erosion assessment

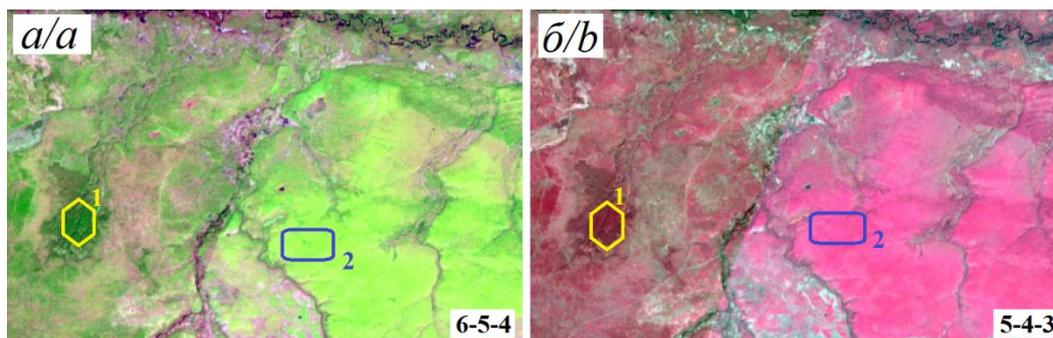


Рис. 4. Ареалы хвойного леса (1), лиственного леса (2) на снимке Landsat-8 летнего периода в синтезе SWIR1-NIR-RED (а) и в синтезе NIR-RED-GREEN (б)

Fig. 4. Areal of evergreen forest (1), deciduous forest (2) in the Landsat-8 in summer in the synthesis of SWIR1-NIR-RED (a) and in the synthesis of NIR-RED-GREEN (b)

Выделенные типы растительности на территории уточнены по карте сервиса ВЕГА-PRO Института космических исследований Земли [65].

Геология (рис. 3, ж). Этот тематический слой отражает распространение стратиграфо-генетических комплексов, сложенных породами с характерными физико-механическими и фильтрационными свойствами.

Расстояние до разломов (рис. 3, и). Слой отражает тектонические нарушения, разломы, т. к. они способ-

ствуют большей скорости инфильтрации осадков, эрозии.

Расстояние до рек (рис. 3, к). Дренажная сеть местности является показателем, объясняющим приуроченность эрозионных участков.

Изучение значимости факторов, обуславливающих эрозию, проводилось методом анализа иерархий (АНР), предложенным Т.Л. Саати в 1970 г. Веса каждого фактора, определенные по методу АНР, представлены в табл. 2.

Таблица 2. Матрица парного сравнения и веса причинных факторов эрозии на основе метода АНР

Table 2. Erosion causative factors' pair-wise comparison matrix and weights based on the AHP method

Критерии /Criteria	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	Вес/Weight
Угол склона/Slope angle (1)	1	3	3	3	5	5	5	7	7	7	0,25
Геология/Geology (2)	1/3	1	1	2	2	2	5	7	7	9	0,15
Атмосферные осадки/Mean annual precipitation (3)	1/3	1	1	2	3	3	3	5	8	7	0,15
Вегетационный индекс/NDVI (4)	1/3	1/2	1/2	1	3	3	5	5	7	7	0,13
Растительный покров/Land cover (5)	1/5	1/2	1/3	1/3	1	3	5	5	9	7	0,11
Кривизна/Curvature (6)	1/5	1/2	1/3	1/3	1/3	1	3	5	9	7	0,09
Экспозиция склона/Slope aspect (7)	1/5	1/5	1/3	1/5	1/5	1/3	1	2	5	5	0,05
Расстояние до разломов/Distance to faults (8)	1/7	1/7	1/5	1/5	1/5	1/5	1/2	1	2	2	0,03
Расстояние до рек/Distance to streams (9)	1/7	1/7	1/8	1/7	1/9	1/9	1/5	1/2	1	2	0,02
Абсолютные отметки поверхности/Elevation (10)	1/7	1/9	1/7	1/7	1/7	1/7	1/5	1/2	1/2	1	0,02

Отношение согласованности (Consistency Ratio) $CR=0,058$.

Проведенное сравнение влияния факторов на эрозию показало, что наибольшее значение, или вес, имеет уклон (вес 0,25), также значимыми являются стратиграфо-генетический комплекс пород (0,15), количество атмосферных осадков (0,15) и покров подстилающей поверхности (0,11), менее значимы кривизна (0,09) и экспозиция (0,05) склона. Остальные факторы имеют еще меньший вес ($\leq 0,03$).

Растровые тематические карты с присвоенными значениями для их классов были умножены на соответствующие веса и суммированы, чтобы получить простую карту, где каждая ячейка имеет определенное значение суммарного индекса восприимчивости к эрозии (рис. 5), проведено классифицирование раstra методом «Естественные границы» на пять категорий: очень низкая, низкая, средняя, повышенная и высокая.

Обсуждение результатов исследования

Для определения взаимосвязи природных и антропогенных факторов с эрозией было рассмотрено 10 факторов.

Ранжирование факторов по методу анализа иерархий (АНР) показало, что наибольшее значение, или вес, имеет уклон, также значимыми являются стратиграфо-генетический комплекс (СГК) пород, количество атмосферных осадков и покров подстилающей поверхности, менее значимы кривизна и экспозиция склона, остальные факторы имеют меньший вес. Анализ карты районирования (рис. 5) свидетельствует, что очень низкая степень восприимчивости к эрозии характерна для нижней части водосбора. Здесь в условиях практически сплошной залесенности эрозия возможна в виде небольших ареалов. Средняя часть реки отчетливо делится на две зоны: правобережную, с низкой степенью восприимчивости, и левобережную, с преобладанием средней степени и более освоенную в хозяйственном отношении. Повышенная восприимчивость к эрозии проявляется здесь по зонам разломов и размещения инженерных сооружений. Повышенная и высокая восприимчивость к эрозии, обусловленные изменениями растительного покрова, проявляются в верховьях р. Карабула.

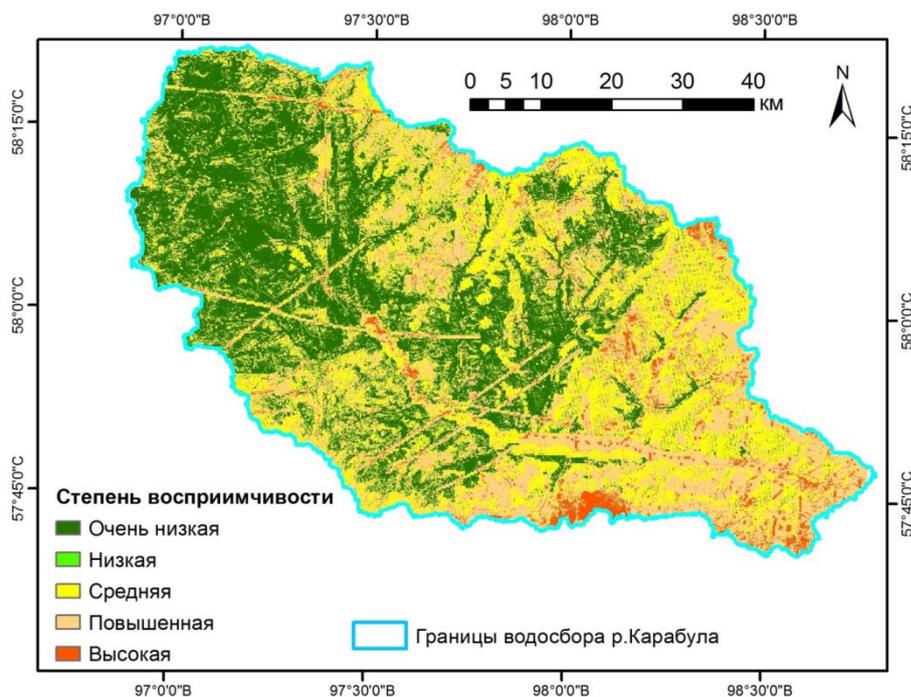


Рис. 5. Карта восприимчивости территории к эрозии с использованием АНР метода
Fig. 5. Erosion susceptibility map of the study area using the AHP model

Несмотря на то, что полученные результаты требуют валидации и возможного уточнения, созданная карта наглядно демонстрирует местоположение эрозионно-опасных участков. Анализ фона, на котором формируется пространственное распределение эрозии в районе, дает основание утверждать, что основными контролирующими факторами процесса являются рельеф, гидроклиматические факторы и тип растительности. Следует также отметить, что земледельческая активность здесь слабо развита, так как территория района входит в зону рискованного земледелия.

Выводы

1. Территория водосбора р. Карабула характеризуется сложными инженерно-геологическими условиями, что является фактором, благоприятствующим развитию опасных геологических процессов и явлений, таких как эрозия, суффозия, заболачивание, карст и другие. Эти процессы осложняют хозяйственное освоение территории и снижают эксплуатационную надежность зданий и сооружений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шихов А.Н., Черепанова Е.С., Пьянков С.В. Геоинформационные системы: методы пространственного анализа. – Пермь: Перм. гос. нац. исслед. ун-т, 2017. – 88 с.
2. Калинин В.Г., Пьянков С.В. Гидрография. Определение гидрографических характеристик рек и их водосборов с применением цифрового картографического моделирования. – Пермь: Перм. гос. нац. исслед. ун-т, 2013. – Ч. 2. – 71 с.
3. Шихов А.Н., Черепанова Е.С., Пономарчук А.И. Геоинформационные системы: применение ГИС-технологий при решении гидрологических задач: практикум. – Пермь: Перм. гос. нац. исслед. ун-т, 2014. – 91 с.
4. Thakur P.K., Laha C., Aggarwal S.P. River bank erosion hazard study of river Ganga, upstream of Farakka barrage using remote sensing and GIS // *Natural Hazards*. – 2012. – V. 61. – № 3. –

2. Для анализа пространственных закономерностей, обуславливающих развитие эрозии, выбрано десять факторов: уклон поверхности, экспозиция склона, кривизна, абсолютные отметки поверхности, количество атмосферных осадков, вегетационный индекс NDVI, типы растительности, геологическое строение территории, расстояние до разломов, расстояние до реки.
3. Проведено ранжирование факторов, способствующих развитию эрозии. Значимость факторов оценена методом анализа иерархий.
4. Составлена карта инженерно-геологического районирования территории по степени восприимчивости к эрозии, которую рекомендуется использовать при разработке противоэрозионных мероприятий.

Исследование выполнено в Томском политехническом университете в рамках программы повышения конкурентоспособности Томского политехнического университета (средства ВИУ).

- P. 967–987. URL: <https://doi.org/10.1007/s11069-011-9944-z> (дата обращения 15.07.2021).
5. Soil erosion hazard mapping in central Zab Basin using EPM model in gis environment / H. Shahabi, M. Salari, B.B. Ahmad, A. Mohammadi // *International Journal of Geography and Geology*. – 2016. – V. 5. – № 11. – P. 224–235.
 6. Rahman M.R., Shi Z.H., Chongfa C. Soil erosion hazard evaluation – an integrated use of remote sensing, GIS and statistical approaches with biophysical parameters towards management strategies // *Ecological Modelling*. – 2009. – V. 220. – № 13–14. – P. 1724–1734.
 7. Mandal S. Assessing the instability and shifting character of the river bank ganga in Manikchak Diara of Malda district, west Bengal using bank erosion hazard index (BEHI), RS & GIS // *European Journal of Geography*. – 2017. – V. 8. – № 4. – P. 6–25.

8. Mujabar P.S., Chandrasekar N. Coastal erosion hazard and vulnerability assessment for southern coastal Tamil Nadu of India by using remote sensing and GIS // *Natural Hazards*. – 2013. – V. 69. – № 3. – P. 1295–1314.
9. Moses A.N. GIS-RUSLE interphase modelling of soil erosion hazard and estimation of sediment yield for river Nzoia basin in Kenya // *J Remote Sens GIS*. – 2017. – V. 6. – № 3. – P. 1–13.
10. Andrade O., Kappas M., Erasmi S. Assessment of erosion hazard in Torres municipality of Lara State (Venezuela) based on GIS // *Interciencia*. – 2010. – V. 35. – № 5. – P. 348–356.
11. Assessment of erosion hazard with the USLE and GIS: A case study of the Upper Ewaso Ng'iro North basin of Kenya / B.M. Mati, R.P. Morgan, F.N. Gichuki, J.N. Quinton, T.R. Brewer, H.P. Liniger // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. – 2000. – V. 2. – № 2. – P. 78–86.
12. Winterbottom S.J., Gilvear D.J. A GIS-based approach to mapping probabilities of river bank erosion: regulated River Tummel, Scotland // *Regulated Rivers: Research & Management: an International Journal Devoted to River Research and Management*. – 2000. – V. 16. – № 2. – P. 127–140.
13. Potential of weight of evidence modelling for gully erosion hazard assessment in Mbire District–Zimbabwe / F. Dube, I. Nhapi, A. Murwira, W. Gumindoga, J. Goldin, D.A. Mashauri // *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*. – 2014. – V. 67. – P. 145–152.
14. Neji N., Ayed R.B., Abida H. Water erosion hazard mapping using analytic hierarchy process (AHP) and fuzzy logic modeling: a case study of the Chaffar Watershed (Southeastern Tunisia) // *Arabian Journal of Geosciences*. – 2021. – V. 14. – № 13. – P. 1–15.
15. Pambudi A.S., Moersidik S.S., Karuniasta M. Analysis of recent erosion hazard levels and conservation policy recommendations for Lesti Subwatershed, Upper Brantas Watershed // *Jurnal Perencanaan Pembangunan: the Indonesian Journal of Development Planning*. – 2021. – V. 5. – № 1. – P. 71–93.
16. Soil erosion susceptibility mapping using a GIS-based multi-criteria decision approach: case of district Chitral, Pakistan / B. Aslam, A. Maqsoom, W.S. Alaloul, M.A. Musarat., T. Jabbar, A. Zafar // *Ain Shams Engineering Journal*. – 2021. – V. 12. – № 2. – P. 1637–1649.
17. Ghosh A., Maiti R. Soil erosion susceptibility assessment using logistic regression, decision tree and random forest: study on the Mayurakshi river basin of Eastern India // *Environmental Earth Sciences*. – 2021. – V. 80. – № 8. – P. 1–16.
18. Mapping soil erosion-prone sites through GIS and remote sensing for the Tifnout Askouan watershed, southern Morocco / A. Tairi, A. Elmouden, L. Bouchaou, M. Aboulouafa // *Arabian Journal of Geosciences*. – 2021. – V. 14. – № 9. – P. 1–22.
19. GIS-based hazard and vulnerability assessment of a torrential watershed / P. Kumar, V. Garg, S. Mittal, Y.K. Murthy // *Environment, Development and Sustainability*. – 2021. – C. 1–31. URL: <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01476-z> (дата обращения 11.07.2021).
20. Agnihotri D., Kumar T., Jhariya D. Intelligent vulnerability prediction of soil erosion hazard in semi-arid and humid region // *Environment, Development and Sustainability: a Multidisciplinary Approach to the Theory and Practice of Sustainable Development*. – 2021. – V. 23. – № 2. – P. 2524–2551.
21. Abdullahi A.I. et al. Application of remote sensing and geoinformatics techniques in erosion mapping and groundwater management in the river Amba Watershed, Central Nigeria // *Journal of the Nigerian Society of Physical Sciences*. – 2021. – V. 3. – № 2. – P. 59–65.
22. Soil erosion modelling using GIS and revised universal soil loss equation approach: a case study of Guna-Tana landscape, Northern Ethiopia / A. Teshome, A. Halefom, M. Teshome, I. Ahmad, Y. Taddele, M. Dananto, P. Szucs // *Modeling Earth Systems and Environment*. – 2021. – V. 7. – № 1. – P. 125–134.
23. Predicting soil erosion hazard in Lattakia Governorate (W Syria) / M. Safwan, K. Alaa, A. Omran, B.P. Quoc, T.T.L. Nguyen, N.T. Van, H. Endre // *International Journal of Sediment Research*. – 2021. – V. 36. – № 2. – P. 207–220.
24. Hoseinzadeh M.M., Barkhordari N. Zonation of bank erosion vulnerability (case study: haft Cheshmeh river, Qazvin) // *Physical Geography Research Quarterly*. – 2021. – V. 53. – № 1. – P. 123–140.
25. Akbari G., Amani M. Investigation of important and effective factors in soil erosion and sedimentation of Shirin Darreh river using remote sensing and GIS approaches // *Iranian journal of Ecohydrology*. – 2021. – V. 8. – № 1. – P. 283–293.
26. Kolli M.K., Opp C., Groll M. Estimation of soil erosion and sediment yield concentration across the Kolleru Lake catchment using GIS // *Environmental Earth Sciences*. – 2021. – V. 80. – № 4. – P. 1–14.
27. Kumar N., Singh S.K. Soil erosion assessment using earth observation data in a trans-boundary river basin // *Natural Hazards*. – 2021. – V. 107. – № 1. – P. 1–34.
28. Batool S., Shirazi S.A., Mahmood S.A. Appraisal of soil erosion through RUSLE model and hypsometry in Chakwal Watershed (Potwar-Pakistan) // *Sarhad Journal of Agriculture*. – 2021. – V. 37. – № 2. – P. 594–606.
29. Applying different resampling strategies in machine learning models to predict head-cut gully erosion susceptibility / F. Wang, M. Sahana, B. Pahlevanzadeh, S.C. Pal, P.K. Shit, M.J. Piran, A. Mosavi // *Alexandria Engineering Journal*. – 2021. – V. 60. – № 6. – P. 5813–5829.
30. Effects of extreme floods on fluvial changes: the Khorramabad River as case study (western Iran) / S. Sharafi, H. Kamangir, S.A. King, R. Safaierad // *Arabian Journal of Geosciences*. – 2021. – V. 14. – № 12. – P. 1–11.
31. Getnet T., Mulu A. Assessment of soil erosion rate and hotspot areas using RUSLE and multi-criteria evaluation technique at Jedeb watershed, Upper Blue Nile, Amhara Region, Ethiopia // *Environmental Challenges*. – 2021. V. 4. – № 8. – P. 100174.
32. Ghosh B., Mukhopadhyay S. Erosion susceptibility mapping of sub-watersheds for management prioritization using MCDM-based ensemble approach // *Arabian Journal of Geosciences*. – 2021. – V. 14. – № 1. – P. 1–18.
33. Ghosh A., Maiti R. Development of new composite index on channel sensitivity using AHP, FR and ensemble model and its application on the Mayurakshi river of Eastern India // *International Journal of River Basin Management*. – 2021. – V. 80. – № 8. – P. 1–18. DOI: 10.1080/15715124.2021.1879092
34. Soil conservation assessment via climate change and vegetation growth scenarios in the Nile River basin / H. Liu, Y.X. Liu, W.W. Zhao, D. Peng // *Journal of Mountain Science*. – 2021. – V. 18. – № 4. – P. 863–877.
35. Geologic hazards of the Ocoña river valley, Peru and the influence of small-scale mining / P. Santi, J. Manning, W. Zhou, P. Meza, P. Colque // *Natural Hazards*. – 2021. – V. 108. – № 9. – P. 2679–2700. URL: <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04794-7> (дата обращения 15.06.2021).
36. Gebreegziabher T., Suryabhadra K.V., Kumar Raghuvanshi T. WebGIS-based decision support system for soil erosion assessment in Legedadi watershed, Oromia Region, Ethiopia // *Geology, Ecology, and Landscapes*. – 2021. – P. 1–18. URL: <https://doi.org/10.1080/24749508.2021.1924441> (дата обращения 11.07.2021).
37. Khademalrasoul A., Amerikhah H. Assessment of soil erosion patterns using RUSLE model and GIS tools (case study: the border of Khuzestan and Chaharmahal Province, Iran) // *Modeling Earth Systems and Environment*. – 2021. – V. 7. – № 2. – P. 885–895.
38. Ghorbanzadeh O., Feizzadeh B., Blaschke T. An interval matrix method used to optimize the decision matrix in AHP technique for land subsidence susceptibility mapping. *Environmental Earth Sciences*. – 2018. – V. 77. – Article number 584.
39. Landslide susceptibility mapping for Austria using Geons and optimization with the Dempster-Shafer theory / T. Gudiyangada Nachappa, S. Tavakkoli Pirailiou, O. Ghorbanzadeh, H. Shahabi, T. Blaschke // *Applied Sciences*. – 2019. – V. 9 (24). – Article number 5393.
40. Comparison and validation of per-pixel and object-based approaches for landslide susceptibility mapping / T. Gudiyangada Nachappa, S. Kienberger, S.R. Meena, D. Hölbling, T. Blaschke // *Geomatics, Natural Hazards and Risk*. – 2020. – V. 11. – № 1. – P. 572–600.
41. Estimating the quality of landslide susceptibility models / F. Guzzetti, P. Reichenbach, F. Ardizzone, M. Cardinali, M. Galli // *Geomorphology*. – 2006. – V. 81. – P. 166–184.
42. Ivanova E. Landslide susceptibility mapping using Frequency Ratio and Analytic Hierarchy Process (AHP): comparative study

- of two areas in Bulgaria // Proceedings of the International Conference Analysis and Management of Changing Risk for Natural Hazards. – Padua, Italy, 18–19 November, 2014. – P. AP23-1–AP23-9.
43. Rasyid A.R., Bhandary N.P., Yatabe R. Performance of frequency ratio and logistic regression model in creating GIS based landslides susceptibility map at Lompobattang Mountain, Indonesia. *Geoenvironmental Disasters*. – 2016. – V. 3. – Article number 19.
44. Optimizing the frequency ratio method for landslide susceptibility assessment: a case study of the Caiyuan Basin in the southeast mountainous area of China / Y.X. Zhang, H.X. Lan, L.P. Li, Y.M. Wu, J.H. Chen, N.M. Tian // *Journal of Mountain Science*. – 2020. – VI. 17. – Article number 2.
45. Spatial distribution and susceptibility zoning of geohazards along the Silk Road, Xian-Lanzhou / J. Zhuang, J. Peng, X. Zhu, W. Li, P. Ma, T. Liu // *Environmental Earth Sciences*. – 2016. – V. 75. – Article number 711.
46. Wang M., Qiao J., He S. GIS-based earthquake-triggered landslide hazard zoning using contributing weight model // *Journal of Mountain Science*. – 2010. – V. 7. – P. 339–352. DOI: 10.1007/s11629-010-2054-7
47. Cheng J., Tao J.P. Fuzzy comprehensive evaluation of drought vulnerability based on the analytic hierarchy process – an empirical study from Xiaogan City in Hubei Province // *Agriculture and Agricultural Science Procedia*. – 2010. – V. 1. – P. 126–135.
48. Classification of the type of eco-geological environment of a coal mine district: a case study of an ecologically fragile region in Western China / Z. Yang, W. Li, Y. Pei, W. Qiao, Y. Wu // *Journal of Cleaner Production*. – 2018. – V. 174. – P. 1513–1526.
49. Liu S., Li W. Indicators sensitivity analysis for environmental engineering geological patterns caused by underground coal mining with integrating variable weight theory and improved matter-element extension model // *Science of the Total Environment*. – 2019. – V. 686. – P. 606–618.
50. Liu S., Li W., Wang Q. Zoning method for environmental engineering geological patterns in underground coal mining areas // *Science of the Total Environment*. – 2018. – V. 634. – P. 1064–1076.
51. Строкова Л.А., Ежкова А.В., Леонова А.В. Применение линейного анализа для оценки карстоопасности при проектировании магистрального газопровода в южной Якутии // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2020. – Т. 331. – № 11. – С. 117–126.
52. Строкова Л.А. Районирование участков строительства прудовотстойников Эльгинского каменноугольного месторождения в Якутии // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2021. – Т. 332. – № 1. – С. 97–106.
53. Опыт инженерно-геологического районирования по несущей способности грунтов промплощадки Эльгинского ГОК в Якутии / Л.А. Строкова, С.А. Дмитриева, Н.В. Осьмушкина, А.В. Осьмушкин // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2019. – Т. 330. – № 2. – С. 175–185.
54. Strokova L. Recognition of geological processes in permafrost conditions // *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. – 2019. – V. 78 (8). – P. 5517–5530.
55. Фи Х.Т., Строкова Л.А. Типизация грунтовых толщ территории города Ханой (Вьетнам) при изучении оседания земной поверхности из-за извлечения подземных вод // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2017. – Т. 328. – № 4. – С. 6–17.
56. Строкова Л.А., Галеева Э.И., Леонова А.В. Районирование инженерно-геокриологических условий трассы трубопровода на Восточно-Мессояхском нефтегазоконденсатном месторождении // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2020. – Т. 331. – № 10. – С. 14–22.
57. Strokova L.A., Teterin E. A. Identification, diagnosis and ranking of risks of geohazard in pipeline and urbanized territories // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2016. – V. 43. – 6 p. – Article number 012051.
58. Строкова Л.А., Надеждина Ю.Ю. Типизация инженерно-геологических условий территории трассы проектируемой железной дороги Элегест–Кызыл–Курагино // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2020. – Т. 331. – № 2. – С. 64–77.
59. Строкова Л.А., Епифанова Е.А., Коржнева Т.Г. Численный анализ поведения основания опоры моста на старой железнодорожной линии // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2017. – Т. 328. – № 5. – С. 125–139.
60. Епифанова Е.А., Строкова Л.А. Оценка деформаций исторического здания в Томске с помощью комплексного подхода, основанного на сочетании наземного лазерного сканирования и конечно-элементного моделирования // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2018. – Т. 329. – № 5. – С. 27–41.
61. Епифанова Е.А., Строкова Л.А. Анализ деформаций проекторной мачты при помощи наземного лазерного сканирования и метода конечных элементов // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2019. – Т. 330. – № 5. – С. 7–17.
62. Сахаровский А.В., Строкова Л.А., Определение устойчивости оползневого склона при проектировании моста через р. Пошнарку в Чувашии // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2020. – Т. 331. – № 1. – С. 125–134.
63. Оценка инженерно-геокриологических условий Берегового нефтегазоконденсатного месторождения / Л.А. Строкова, Д.В. Пургина, Э.И. Галеева, А.Н. Курчатова // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2018. – Т. 329. – № 12. – С. 6–19.
64. Тематическое дешифрирование и интерпретация космических снимков среднего и высокого пространственного разрешения / А.Н. Шихов, А.П. Герасимов, А.И. Пономарчук, Е.С. Перминова. – Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2020. 191 с. URL: <http://www.psu.ru/files/docs/science/books/uchebnie-posobiya/shikhov-gerasimov-ponomarchuk-perminova-tematicheskoe-deshifrovaniye-i-interpretaciya-kosmicheskikh-snimkov.pdf> (дата обращения 15.07.2021).
65. ВЕГА-PRO спутниковый сервис анализа вегетации. URL: <http://sci-vega.ru/maps/> (дата обращения 27.07.2021).

Поступила 30.07.2021 г.

Информация об авторах

Строкова Л.А., доктор геолого-минералогических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета

UDC 624.131

ASSESSMENT OF EROSION HAZARD OF THE WATERSHED OF THE KARABULA RIVER IN THE KRASNOYARSK KRAI FOR CONSTRUCTION DEVELOPMENT

Lyudmila A. Strokova,
sla@tpu.ru

National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance. The implementation of economic activities in the southern taiga regions of the Krasnoyarsk Krai faces serious difficulties in terms of almost complete lack of up-to-date, accurate geospatial information about hazardous processes and phenomena. Obtaining such information about the current state of dangerous geological processes, the nature of their spatial distribution, the intensity of development is extremely necessary in the process of economic development of the region.

The main aim of the research is to outline zones with different degrees of susceptibility to water erosion.

Methods. Firstly, we prepared the electronic vector map of the catchment boundaries. Secondly, we developed the list of geomorphological, hydrological, geological, and climatic factors determining the intensity of erosion processes. We compiled thematic maps according to these parameters. Thirdly, we carried out the assessment of the weight of each factor in the occurrence and development of erosion processes by the Analytical hierarchy process. Finally, as a result of the overlay of weighted thematic maps for each factor, we created the final forecast map with the allocation of zones with different degrees of susceptibility to erosion.

Results. The upper reaches of the river, occupied mainly by deciduous forests, are the most prone to erosion, the territory of the left bank of the middle part of the river is characterized by moderate susceptibility, the lower reaches of the river, occupied mainly by larch-pine forests, are the least prone to erosion. The obtained data is recommended to be used in the design of anti-erosion measures. A digital relief model for engineering and geological zoning was created for the studied territory. The main parameters of the relief, geology, tectonics, vegetation, land cover, precipitation distribution that determine the development of erosion processes are selected, calculated and analyzed. A map of the engineering and geological zoning of the territory according to the degree of susceptibility to erosion was developed.

Key words:

Erosion, engineering geological zoning, digital elevation model, susceptibility, analytical hierarchy process, mapping.

The research was carried out at Tomsk Polytechnic University within the Program of Tomsk Polytechnic University Competitiveness Enhancement (VIU funds).

REFERENCES

- Shikhov A.N., Cherepanova E.S., Pyankov S.V. *Geoinformatsionnye sistemy: metody prostranstvennogo analiza* [Geoinformation systems: methods of spatial analysis]. Perm, Perm State National University, 2017. 88 p.
- Kalinin V.G., Pyankov S.V. *Gidrografiya. Opredelenie gidrograficheskikh kharakteristik rek i ikh vodosborov s primeneniem tsifrovogo kartograficheskogo modelirovaniya* [Hydrography. Determination of hydrographic characteristics of rivers and their catchments using digital cartographic modeling]. Perm, Perm State National University, 2013. P. 2, 71 p.
- Shikhov A.N., Cherepanova E.S., Ponomarchuk A.I. *Geoinformatsionnye sistemy: primeneniye GIS-tehnologiy pri reshenii gidrologicheskikh zadach* [Geoinformation systems: the use of GIS technologies in solving hydrological problems]. Perm, Perm State National University, 2014. 91 p.
- Thakur P.K., Laha C., Aggarwal S.P. River bank erosion hazard study of river Ganga, upstream of Farakka barrage using remote sensing and GIS. *Natural Hazards*, 2012, vol. 61, pp. 967–987. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11069-011-9944-z> (accessed 15 July 2021).
- Shahabi H., Salari M., Ahmad B.B., Mohammadi A. Soil erosion hazard mapping in central Zab Basin using EPM model in gis environment. *International Journal of Geography and Geology*, 2016, vol. 5, no. 11, pp. 224–235.
- Rahman M.R., Shi Z.H., Chongfa C. Soil erosion hazard evaluation – an integrated use of remote sensing, GIS and statistical approaches with biophysical parameters towards management strategies. *Ecological Modelling*, 2009, vol. 220, no. 13–14, pp. 1724–1734.
- Mandal S. Assessing the instability and shifting character of the river bank Ganga in Manikchak Diara of Malda district, west Bengal using bank erosion hazard index (BEHI), RS & GIS. *European Journal of Geography*, 2017, vol. 8, no. 4, pp. 6–25.
- Mujabar P.S., Chandrasekar N. Coastal erosion hazard and vulnerability assessment for southern coastal Tamil Nadu of India by using remote sensing and GIS. *Natural Hazards*, 2013, vol. 69, no. 3, pp. 1295–1314.
- Moses A.N. GIS-RUSLE interphase modelling of soil erosion hazard and estimation of sediment yield for river Nzoia basin in Kenya. *J Remote Sensing & GIS*, 2017, vol. 6, no. 3, pp. 1–13.
- Andrade O., Kappas M., Erasmis S. Assessment of erosion hazard in Torres municipality of Lara State (Venezuela) based on GIS. *Interciencia*, 2010, vol. 35, no. 5, pp. 348–356.
- Mati B.M., Morgan R.P., Gichuki F.N., Quinton J.N., Brewer T.R., Liniger H.P. Assessment of erosion hazard with the USLE and GIS: a case study of the Upper Ewaso Ng'iro North basin of Kenya. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2000, vol. 2, no. 2, pp. 78–86.
- Winterbottom S.J., Gilvear D.J. A GIS-based approach to mapping probabilities of river bank erosion: regulated River Tummel, Scotland. *Regulated Rivers: Research & Management: an International Journal Devoted to River Research and Management*, 2000, vol. 16, no. 2, pp. 127–140.
- Dube F., Nhapi I., Murwira A., Gumindoga W., Goldin J., Mashauri D.A. Potential of weight of evidence modelling for gully erosion hazard assessment in Mbire District – Zimbabwe. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2014, vol. 67, pp. 145–152.
- Neji N., Ayed R.B., Abida H. Water erosion hazard mapping using analytic hierarchy process (AHP) and fuzzy logic modeling: a case study of the Chaffar Watershed (Southeastern Tunisia). *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, vol. 14, no. 13, pp. 1–15.
- Pambudi A.S., Moersidik S.S., Karuniasa M. Analysis of recent erosion hazard levels and conservation policy recommendations for Lesti Subwatershed, Upper Brantas Watershed. *Jurnal Perencanaan Pembangunan: the Indonesian Journal of Development Planning*, 2021, vol. 5, no. 1, pp. 71–93.

16. Aslam B., Maqsoom A., Alaloul W.S., Musarat M.A., Jabbar T., Zafar A. Soil erosion susceptibility mapping using a GIS-based multi-criteria decision approach: case of district Chitral, Pakistan. *Ain Shams Engineering Journal*, 2021, vol. 12, no. 2, pp. 1637–1649.
17. Ghosh A., Maiti R. Soil erosion susceptibility assessment using logistic regression, decision tree and random forest: study on the Mayurakshi river basin of Eastern India. *Environmental Earth Sciences*, 2021, vol. 80, no. 8, pp. 1–16.
18. Tairi A., Elmouden A., Bouchaou L., Aboulouafa M. Mapping soil erosion-prone sites through GIS and remote sensing for the Tifnout Askaoun watershed, southern Morocco. *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, vol. 14, no. 9, pp. 1–22.
19. Kumar P., Garg V., Mittal S., Murthy Y.K. GIS-based hazard and vulnerability assessment of a torrential watershed. *Environment, Development and Sustainability*, 2021. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01476-z> (accessed 11 July 2021).
20. Agnihotri D., Kumar T., Jhariya D. Intelligent vulnerability prediction of soil erosion hazard in semi-arid and humid region. *Environment, Development and Sustainability: a Multidisciplinary Approach to the Theory and Practice of Sustainable Development*, 2021, vol. 23, no. 2, pp. 2524–2551.
21. Abdullahi A.I. Application of Remote Sensing and Geoinformatics Techniques in erosion mapping and groundwater management in the River Amba Watershed, Central Nigeria. *Journal of the Nigerian Society of Physical Sciences*, 2021, vol. 3, no. 2, pp. 59–65.
22. Teshome A., Halefom A., Teshome M., Ahmad I., Taddele Y., Dananto M., Szucs P. Soil erosion modelling using GIS and revised universal soil loss equation approach: a case study of Guna-Tana landscape, Northern Ethiopia. *Modeling Earth Systems and Environment*, 2021, vol. 7, no. 1, pp. 125–134.
23. Safwan M., Alaa K., Omran A., Quoc B.P., Nguyen T.T.L., Van N.T., Andre H. Predicting soil erosion hazard in Lattakia Governorate (W Syria). *International Journal of Sediment Research*, 2021, vol. 36, no. 2, pp. 207–220.
24. Hoseinzadeh M.M., Barkhordari N. Zonation of bank erosion vulnerability (case study: haft Cheshmeh river, Qazvin). *Physical Geography Research Quarterly*, 2021, vol. 53, no. 1, pp. 123–140.
25. Akbari G., Amani M. Investigation of important and effective factors in soil erosion and sedimentation of Shirin Darreh river using remote sensing and GIS approaches. *Iranian journal of Ecohydrology*, 2021, vol. 8, no. 1, pp. 283–293.
26. Kolli M.K., Opp C., Groll M. Estimation of soil erosion and sediment yield concentration across the Kolleru Lake catchment using GIS. *Environmental Earth Sciences*, 2021, vol. 80, no. 4, pp. 1–14.
27. Kumar N., Singh S.K. Soil erosion assessment using earth observation data in a trans-boundary river basin. *Natural Hazards*, 2021, vol. 107, no. 1, pp. 1–34.
28. Batool S., Shirazi S.A., Mahmood S.A. Appraisal of soil erosion through RUSLE model and hypsometry in Chakwal Watershed (Potwar–Pakistan). *Sarhad Journal of Agriculture*, 2021, vol. 37, no. 2, pp. 594–606.
29. Wang F., Sahana M., Pahlevanzadeh B., Pal S.C., Shit P.K., Piran M.J., Mosavi A. Applying different resampling strategies in machine learning models to predict head-cut gully erosion susceptibility. *Alexandria Engineering Journal*, 2021, vol. 60, no. 6, pp. 5813–5829.
30. Sharafi S., Kamangir H., King S.A., Safaierad R. Effects of extreme floods on fluvial changes: the Khorramabad River as case study (western Iran). *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, vol. 14, no. 12, pp. 1–11.
31. Getnet T., Mulu A. Assessment of soil erosion rate and hotspot areas using RUSLE and multi-criteria evaluation technique at Jedeb watershed, Upper Blue Nile, Amhara Region, Ethiopia. *Environmental Challenges*, 2021, vol. 4, no. 8, Article number 100174.
32. Ghosh B., Mukhopadhyay S. Erosion susceptibility mapping of sub-watersheds for management prioritization using MCDM-based ensemble approach. *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, vol. 14, no. 1, pp. 1–18.
33. Ghosh A., Maiti R. Development of new composite index on channel sensitivity using AHP, FR and ensemble model and its application on the Mayurakshi river of Eastern India. *International Journal of River Basin Management*, 2021, vol. 80, no. 8, pp. 1–18.
34. Liu H., Liu Y.X., Zhao W.W., Peng D. Soil conservation assessment via climate change and vegetation growth scenarios in the Nile River basin. *Journal of Mountain Science*, 2021, vol. 18, no. 4, pp. 863–877.
35. Santi P., Manning J., Zhou W., Meza P., Colque P. Geologic hazards of the Ocoña river valley, Peru and the influence of small-scale mining. *Natural Hazards*, 2021, vol. 108, no. 9, pp. 2679–2700. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04794-7> (accessed 15 June 2021).
36. Gebreegziabher T., Suryabhadgavan K.V., Kumar Raghuvanshi T. WebGIS-based decision support system for soil erosion assessment in Legedadi watershed, Oromia Region, Ethiopia. *Geology, Ecology, and Landscapes*, 2021, AHEAD-OF-PRINT. pp. 1–18. Available at: <https://doi.org/10.1080/24749508.2021.1924441> (accessed 11 July 2021).
37. Khademalrasoul A., Amerikhah H. Assessment of soil erosion patterns using RUSLE model and GIS tools (case study: the border of Khuzestan and Chaharmahal Province, Iran). *Modeling Earth Systems and Environment*, 2021, vol. 7, no. 2, pp. 885–895.
38. Ghorbanzadeh O., Feizizadeh B., Blaschke T. An interval matrix method used to optimize the decision matrix in AHP technique for land subsidence susceptibility mapping. *Environmental Earth Sciences*, 2018, vol. 77, Article number 584.
39. Gudiyangada Nachappa T., Tavakkoli Piralilou S., Ghorbanzadeh O., Shahabi H., Blaschke T. Landslide susceptibility mapping for Austria using Geons and optimization with the Dempster–Shafer theory. *Applied Science*, 2019, vol. 9 (24), Article number 5393.
40. Gudiyangada Nachappa T., Kienberger S., Meena S.R., Hölbling D., Blaschke T. Comparison and validation of per-pixel and object-based approaches for landslide susceptibility mapping. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2020, vol. 11, no. 1, pp. 572–600.
41. Guzzetti F., Reichenbach P., Ardizzone F., Cardinali M., Galli M. Estimating the quality of landslide susceptibility models. *Geomorphology*, 2006, vol. 81, pp. 166–184.
42. Ivanova E. Landslide susceptibility mapping using Frequency Ratio and Analytic Hierarchy Process (AHP): comparative study of two areas in Bulgaria. *Proceedings of the International Conference Analysis and Management of Changing Risk for Natural Hazards*. Padua, Italy, 18–19 November, 2014. pp. AP23-1–AP23-9.
43. Rasyid A.R., Bhandary N.P., Yatabe R. Performance of frequency ratio and logistic regression model in creating GIS based landslides susceptibility map at Lompobattang Mountain, Indonesia. *Geoenvironmental Disasters*, 2016, vol. 3, Article number 19.
44. Zhang Y.X., Lan H.X., Li L.P., Wu Y.M., Chen J.H., Tian N.M. Optimizing the frequency ratio method for landslide susceptibility assessment: A case study of the Caiyuan Basin in the southeast mountainous area of China. *Journal of Mountain Science*, 2020, vol. 17, Article number 2.
45. Zhuang J., Peng J., Zhu X., Li W., Ma P., Liu T. Spatial distribution and susceptibility zoning of geohazards along the Silk Road, Xian-Lanzhou. *Environmental Earth Sciences*, 2016, vol. 75, Article number 711.
46. Wang M., Qiao J., He S. GIS-based earthquake-triggered landslide hazard zoning using contributing weight model. *Journal of Mountain Science*, 2010, vol. 7, pp. 339–352. DOI: 10.1007/s11629-010-2054-7.
47. Cheng J., Tao J.P. Fuzzy comprehensive evaluation of drought vulnerability based on the analytic hierarchy process – an empirical study from Xiaogan City in Hubei Province. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 2010, vol. 1, pp. 126–135.
48. Yang Z., Li W., Pei Y., Qiao W., Wu Y. Classification of the type of eco-geological environment of a coalmine district: a case study of an ecologically fragile region in Western China. *Journal of Cleaner Production*, 2018, vol. 174, pp. 1513–1526.
49. Liu S., Li W. Indicators sensitivity analysis for environmental engineering geological patterns caused by underground coal mining with integrating variable weight theory and improved matter-element extension. *Science of the Total Environment*, 2019, vol. 686, pp. 606–618.
50. Liu S., Li W., Wang Q. Zoning method for environmental engineering geological patterns in underground coal mining areas. *Science of the Total Environment*, 2018, vol. 634, pp. 1064–1076.

51. Strokova L.A., Ezhkova A.V., Leonova A.V. The application of lineament analysis to assess the karst hazard in the design of the main gas pipeline in South Yakutia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 11, pp. 117–126. In Rus.
52. Strokova L.A. Zoning of construction sites of the settling ponds of the Elginsky coal Deposit in Yakutia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 1, pp. 97–106. In Rus.
53. Strokova L.A., Dmitrieva S.A., Osmushkina N.V., Osmushkin A.V. Experience of engineering-geological zoning on bearing capacity of soils of the industrial site of Elga coal-preparation plant in Yakutia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 2, pp. 175–185. In Rus.
54. Strokova L. Recognition of geological processes in permafrost conditions. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2019, vol. 78, no. 8, pp. 5517–5530.
55. Phi H.T., Strokova L.A. Classification of soil types for Hanoi (Vietnam) when studying land subsidence at groundwater extraction. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 4, pp. 6–17. In Rus.
56. Strokova L.A., Galeeva E.I., Leonova A.V. Zoning of engineering-geocryological conditions of the pipelines on Vostochno-Messoyakhskoye field oil and gas condensate field. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 10, pp. 14–22. In Rus.
57. Strokova L.A., Teterin E. A. Identification, diagnosis and ranking of risks of geohazard in pipeline and urbanized territories. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016, vol. 43, Article number 012051. Available at: <http://iopscience.iop.org/1755-1315/43/1/012051> (accessed 11 July 2021).
58. Strokova L.A., Nadezhkina Yu.Yu. Typification of engineering and geological conditions of the territory of the route of the projected railway Elegest–Kyzyl–Kuragino. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 2, pp. 64–77. In Rus.
59. Strokova L.A., Epifanova E.A., Korzhneva T.G. Numerical analysis of bridge foundation behaviour on the old railway line. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 5, pp. 125–139. In Rus.
60. Epifanova E.A., Strokova L.A. Evaluation of deformation of a historic building in Tomsk by an Integrated Approach Based on Terrestrial Laser Scanner and Finite Element Modeling. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 5, pp. 27–41. In Rus.
61. Epifanova E.A., Strokova L.A. Numerical analysis of deformations of the lighting mast by ground laser scanning and finite elements method. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 5, pp. 7–17. In Rus.
62. Saharovskij A.V., Strokova L.A. Determining landslide slope stability when designing a bridge over the river Posnarka in the Chuvash Republic. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 1, pp. 125–134. In Rus.
63. Strokova L.A., Purgina D.V., Galeeva E.I., Kurchatova A.N. Evaluation of engineering-geocryological conditions of the Beregovoe oil and gas condensate field. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 12, pp. 6–19. In Rus.
64. Shikhov A.N., Gerasimov A.P., Ponomarchuk A.I., Perminova E.S. *Tematicheskoe deshifirovanie i interpretatsiya kosmicheskikh snimkov srednego i vysokogo prostranstvennogo razresheniya* [Thematic decoding and interpretation of satellite images of medium and high spatial resolution]. Perm, Perm State National Research University, 2020, 191 p. Available at: <http://www.psu.ru/files/docs/science/books/uchebnie-posobiya/shikhov-gerasimov-ponomarchuk-perminova-tematicheskoe-deshifirovanie-i-interpretatsiya-kosmicheskikh-snimkov.pdf> (accessed 15 July 2021).
65. *VEGA-RRO sputnikovy servis analiza vegetatsii* [Satellite service for vegetation analysis]. Available at: <http://sci-vega.ru/maps/> (accessed 27 July 2021).

Received: 30 July 2021.

Information about the authors

Lyudmila A. Strokova, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 622.233.63

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ГИДРОИМПУЛЬСНОГО МЕХАНИЗМА ДЛЯ БУРЕНИЯ ПИЛОТНЫХ СКВАЖИН ПРИ ПРОКЛАДКЕ ТРУБОПРОВОДОВ

Саруев Лев Алексеевич¹,
sarujevla@tpu.ru

Шадрина Анастасия Викторовна¹,
kr_nas_sh@tpu.ru

Мельнов Кирилл Вячеславович¹,
kvm11@tpu.ru

Саруев Алексей Львович¹,
sarujev@tpu.ru

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

Актуальность. В горном деле и в других отраслях промышленности широко применяются гидравлические ударные механизмы, которые в настоящее время продолжают активно совершенствоваться. В частности, появляются публикации по возможности управления амплитудой и длительностью формируемых гидромеханическими системами импульсов давления в замкнутых камерах, через которые поршни-ударники передают энергию удара буровому породоразрушающему инструменту. При этом увеличивается длительность силовых импульсов, что существенно повышает эффективность использования их энергии на разрушение грунта, а также сглаживаются чрезмерные динамические нагрузки на элементы бурового инструмента. Однако в таких ударных механизмах остаются поршни-ударники, в процессе работы которых происходят основные динамические потери энергии, связанные с возвратно-поступательными движениями бойков в гидроцилиндре ударного механизма. Был разработан принципиально новый безбойковый гидроимпульсный механизм, который в зависимости от твердости разрушаемой среды регулирует амплитуду и длительность формируемых им силовых импульсов в автоматическом режиме без привлечения каких-либо средств управления. Однако для научного обоснования взаимосвязи его основных параметров и работоспособности в целом необходимо провести специальные экспериментальные исследования, результаты которых позволили бы рекомендовать гидроимпульсный механизм для бурения пилотных скважин при прокладке трубопроводов, что, безусловно, является актуальной научно-технической задачей.

Цель: обоснование и экспериментальная проверка в лабораторных условиях работы физической модели принципиально нового гидроимпульсного механизма для интенсификации процесса разрушения горных пород или грунта с возможными включениями повышенной твердости при бурении пилотных скважин с бестраншейной прокладкой трубопроводов.

Объектом данного исследования является безбойковый гидроимпульсный механизм с замкнутым объемом жидкости, в котором формируются силовые импульсы, повышающие эффективность разрушения грунта и горных пород с включениями повышенной твердости за счет автоматического управления их амплитудой и длительностью.

Предмет: закономерности и взаимосвязи основных кинематических и динамических параметров физической модели гидроимпульсного механизма с целью оценки его работоспособности и преимуществ перед другими ударными механизмами, включающими замкнутый объем жидкости в качестве промежуточного тела, передающего ударные импульсы в буровой инструмент.

Методы: анализ научно-технической информации по повышению производительности бурильных машин ударного действия; моделирование динамических процессов гидроимпульсного механизма и проведение экспериментальных исследований его физической модели для выявления взаимосвязей его основных параметров и работоспособности; сравнение разработанного гидроимпульсного механизма с известными гидроударными механизмами, использующими возможности управления амплитудой и длительностью ударных импульсов при передаче их энергии через замкнутый объем жидкости и бурильную колонну на породоразрушающий инструмент для интенсификации процесса разрушения горных пород повышенной твердости.

Результаты. Дана оценка работоспособности гидромеханического механизма и его преимущества по сравнению с существующими гидроударными механизмами. Поскольку в предлагаемом гидроимпульсном механизме нет бойка, в нем отсутствуют основные динамические потери энергии, которые имеют место при возвратно-поступательном движении поршня-бойка в гидроцилиндре. Кроме того, благодаря возможности работы гидроимпульсного механизма без маслостанции, отсутствуют потери энергии на перекачивание жидкости. Коэффициент полезного действия гидроимпульсного механизма выше, чем у других существующих гидроударных систем ещё и потому, что он формирует силовые импульсы с частотным спектром, в котором практически отсутствуют высокочастотные составляющие, не способствующие интенсификации процесса разрушения горных пород, при этом увеличивается доля энергии силовых импульсов в продольных волнах деформации, что обеспечивает повышение механической скорости бурения скважин. Установлено, что гидроимпульсный механизм автоматически регулирует амплитуду и длительность силовых импульсов в зависимости от твердости разрушаемой среды и не требует дополнительной системы управления этим процессом.

Ключевые слова:

Силовой импульс, рукав высокого давления, гидроимпульсный механизм, система с замкнутым контуром, импульсы давления, амплитуда и длительность импульсов, бестраншейная прокладка трубопроводов.

Введение

Бестраншейная прокладка трубопроводов обычно предусматривает бурение пилотных скважин. При этом нередко встречаются горные породы с перемежающейся твердостью, для эффективного бурения которых рационально применять установки, оснащенные ударными механизмами [1–3]. В результате нанесения ударов по торцу хвостовика бурильной колонны в последней формируются волны деформации сжатия, которые, распространяясь со скоростью звука к породоразрушающему инструменту, воздействуют на него в виде силовых импульсов, обеспечивая эффективное разрушение горных пород. В то же время силовые импульсы создают чрезмерные динамические нагрузки на буровой инструмент. Известно, что формируемые напряжения в результате ударов бойка прямо пропорциональны его предударной скорости и допустимая величина её составляет не более 10–12 м/с. Эти ограничения скорости бойка вынуждают разработчиков ударных механизмов повышать энергию ударов за счёт увеличения массы бойков, что приводит к увеличению габаритов и массы всего вращательно-ударного механизма бурильных установок [4–11]. Для решения проблемы повышения энергии удара путём увеличения предударной скорости бойка фирмой Джой (США) был создан молот, в котором передача энергии удара бойка на буровой инструмент осуществлялась через замкнутый столбик жидкости [12]. Учитывая положительный опыт передачи энергии удара через промежуточный элемент в виде замкнутого столбика жидкости, в настоящее время активно продолжаются исследования, связанные с разработкой и совершенствованием ударных систем с жидкостными камерами [13–15]. Авторы этих исследований убедительно доказывают целесообразность повышения таким образом эффективности разрушения горных пород благодаря возможности управления амплитудой и длительностью формируемых силовых импульсов.

Увеличенная длительность силовых импульсов существенно повышает эффективность использования их энергии на разрушение грунта, а также сглаживаются чрезмерные динамические нагрузки на элементы бурового инструмента. Однако в таких ударных механизмах остаются поршни-ударники, в процессе работы которых происходят основные динамические потери энергии, связанные с возвратно-поступательными движениями бойков в гидроцилиндре ударного механизма.

В Томском политехническом университете (ТПУ) разработан принципиально новый безбойковый гидроимпульсный механизм, который в зависимости от твердости разрушаемой среды регулирует амплитуду и длительность формируемых им силовых импульсов в автоматическом режиме без привлечения каких-либо средств управления. Новизна и оригинальность гидроимпульсного механизма подтверждена патентами на полезную модель [16, 17].

Исследования профессора А.С. Сердечного показали [18], что даже при передаче удара через замкну-

тый столбик жидкости формируются силовые импульсы со сложным частотным спектром, в котором значительную долю представляют высокочастотные составляющие (поперечные волны), скорость распространения которых по бурильной колонне в 1,5 раза ниже скорости продольных волн деформации, и, дойдя до породоразрушающего инструмента, поперечные волны не оказывают влияния на внедрение его в обрабатываемую среду, то есть не совершают полезной работы при бурении скважин.

Отличительная особенность предложенного гидроимпульсного механизма

Отличительной особенностью разработанного в ТПУ гидроимпульсного механизма является отсутствие в нём бойка (ударника). Принципиальная схема работы такого механизма формирования силовых импульсов представлена на рис. 1, где F_{oc} – усилие, создаваемое податчиком бурильной установки.

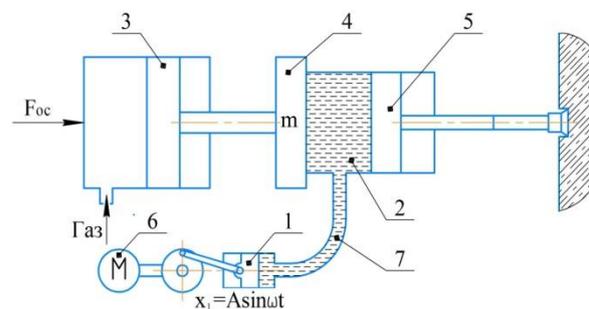


Рис. 1. Обобщенная схема работы гидромеханической системы: 1 – гидропульсатор; 2 – жидкость в замкнутой системе; 3 – поршень пневмоцилиндра, обеспечивающий упругое поджатие активной инерционной массы; 4 – инерционная масса m с корпусом силового цилиндра; 5 – поршень, связанный с хвостовиком бурильной колонны и формирующий силовые импульсы, которые распространяются по ней к породоразрушающему инструменту; 6 – электродвигатель гидропульсатора; 7 – рукав высокого давления (РВД)

Fig. 1. Schematic view of the hydromechanical system operation: 1 – pulsator; 2 – liquid in a closed-loop system; 3 – plunger air feeder; 4 – inertial mass m with the power cylinder; 5 – plunger connected to the drill string shank and forming power pulses that propagate along it to the rock drill tool; 6 – electric motor of pulsator; 7 – high-pressure hose

Упругие характеристики рукавов высокого давления представлены на рис. 2. Они свидетельствуют о нелинейности зависимости давления, создаваемого в них, от объема закачиваемой жидкости.

Импульсы давления формируются в гидроцилиндре в результате взаимодействия колебания давления жидкости в замкнутой полости гидросистемы механизма, создаваемого гидропульсатором, а также колебания инерционной активной массы, жестко связанной с корпусом гидроцилиндра (рис. 1). Формирование импульсов давления жидкости в гидросистеме, включая давление в силовом гидроцилиндре, осуществляется следующим образом.

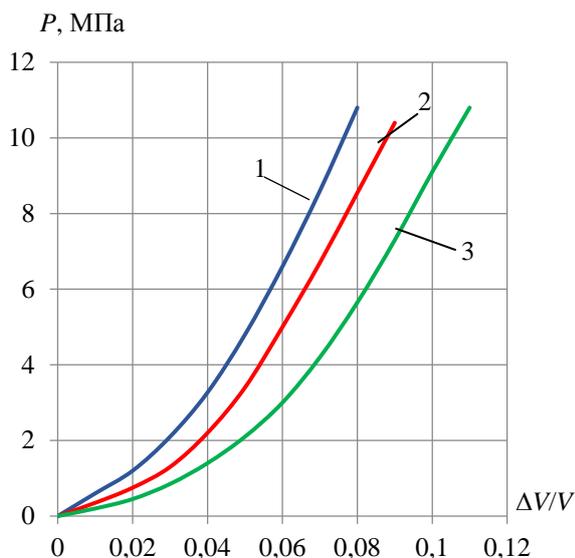


Рис. 2. Упругие характеристики рукавов высокого давления, имеющих внутренний диаметр 20 мм различной длины и объема: 1 – $L=0,95$ м; $V=298$ см³; 2 – $L=1,16$ м; $V=364$ см³; 3 – $L=1,45$ м; $V=455$ см³

Fig. 2. Elastic characteristics of high-pressure hoses with inner diameter 20 mm and various lengths and volumes: 1 – $L=0,95$ m; $V=298$ cm³; 2 – $L=1,16$ m; $V=364$ cm³; 3 – $L=1,45$ m; $V=455$ cm³

Плунжер вытесняет из полости гидропульсатора жидкость, которая повышает давление во всем замкнутом объеме гидросистемы на величину $\Delta P = f\left(\frac{\Delta V}{V}\right)$, где ΔV – изменение объема жидкости в замкнутом объеме гидросистемы гидроимпульсного механизма (рис. 1). Поршень – 3 пневмоцилиндра, поджатый давлением воздуха, работает как пневмо-

пружина, жесткость которой существенно меньше жесткости замкнутого объема жидкости гидросистемы. В этих условиях при работе гидропульсатора происходит раскочка активной инерционной массы m с корпусом гидроцилиндра и сдвиг по фазе колебаний массы m по отношению к вынужденным движениям плунжера гидропульсатора. Причём при одновременной работе двух колебательных контуров в режиме близком к резонансному движение массы m в сторону хвостовика бурильной колонны происходит во время движения плунжера на вытеснение жидкости из полости гидропульсатора объемом ΔV в замкнутую полость гидросистемы, которую можно рассматривать как гидропружину. Рукав высокого давления, входящий в состав гидросистемы гидроимпульсного механизма, обладает нелинейной характеристикой изменения давления от объема вытесненной в него жидкости из гидромеханической системы. В силовом гидроцилиндре происходят изменения давления, воздействующие на поршень – 5 гидроцилиндра, который, в свою очередь, создает силовые импульсы в виде волн деформации сжатия в бурильной колонне. Последние распространяются по ней на забой скважины, обеспечивая интенсификацию разрушения встречающихся включений повышенной твердости. Это позволяет увеличить механическую скорость бурения (рис. 1). При этом предварительно давление в силовом гидроцилиндре создается податчиком бурильной установки. Как показали экспериментальные исследования, в данной гидромеханической системе силовые импульсы формируются только в направлении на забой скважины, и бурильная установка при устойчивой работе гидроимпульсного механизма защищена им от силовых импульсных воздействий (рис. 3).

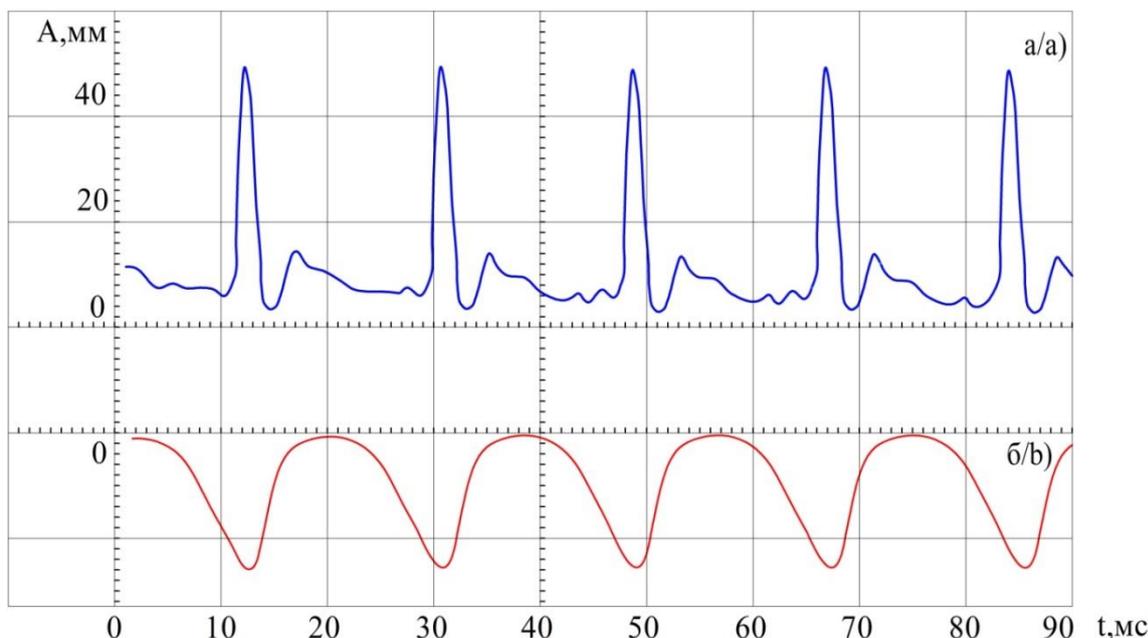


Рис. 3. Осциллограммы: а) силовые импульсы в колонне труб; б) характер линейных перемещений корпуса силового цилиндра, жестко связанного с инерционной массой

Fig. 3. Oscillograms: а) power impulses in the drill rod; б) movement of the active mass of the hydropulse mechanism

Методика и результаты экспериментальных исследований

Для проведения исследований гидроимпульсного механизма была разработана и изготовлена экспериментальная установка, общий вид и основные элементы которой приведены на рис. 4.

Три рукава высокого давления с длиной от 0,67 до 4,5 м были приняты в эксперименте, при этом их диаметры составили 12, 16 и 20 мм. Инерционная

масса установки принимала значения от 30 до 270 кг. Осевое усилие подачи использовалось для оценки влияния создания предварительного давления жидкости в гидросистеме гидроимпульсного механизма на нелинейные характеристики различных РВД и задавалась в пределах от нуля до 12 кН. Вынужденные частоты гидропульсатора в эксперименте составляли 25 и 50 Гц (без учета величины скольжения ротора электродвигателя).

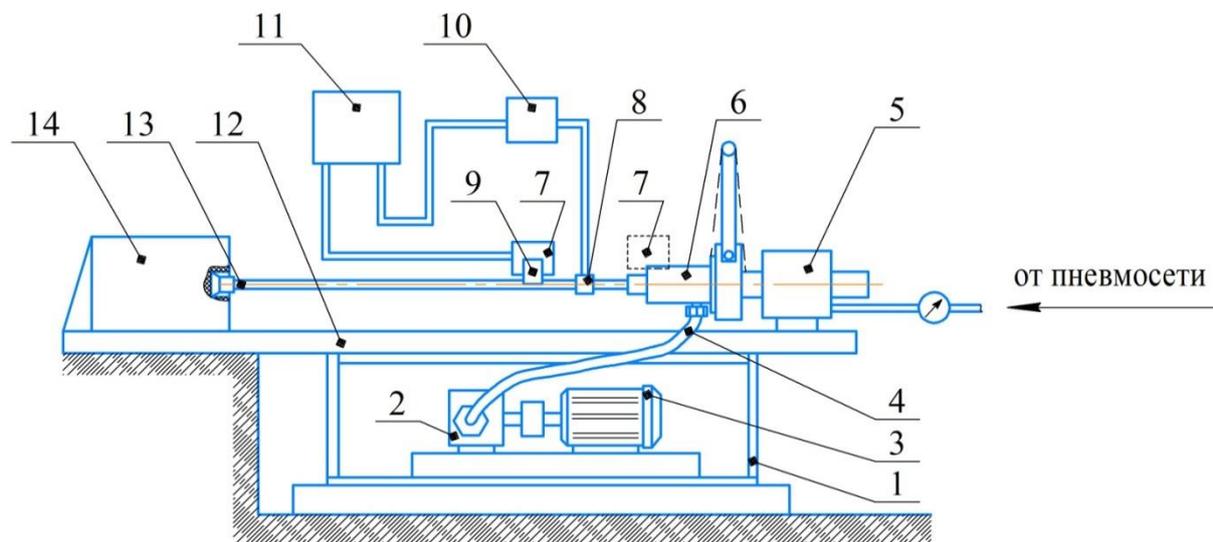


Рис. 4. Лабораторная установка для исследования гидроимпульсного силового механизма: 1 – сварная несущая рама; 2 – пульсатор; 3 – электродвигатель; 4 – рукав высокого давления; 5 – пневмоподатчик, обеспечивающий постоянное поджатие активной инерционной массы; 6 – силовой гидроцилиндр; 7 – датчики линейных перемещений; 8 – тензодатчики сопротивления для записи силовых импульсов в бурильной трубе; 9 – шторка датчика линейных перемещений, жестко связанная с бурильной колонной; 10 – усилитель постоянного тока; 11 – осциллограф; 12 – направляющая рама; 13 – бурильная труба с породоразрушающим инструментом; 14 – горная порода

Fig. 4. Test bench for the study of hydraulic mechanism: 1 – bed frame; 2 – pulsator; 3 – pulsator's motor; 4 – high pressure hose; 5 – pneumatic feeder; 6 – hydraulic power cylinder; 7 – linear displacement transducer; 8 – resistive strain gages; 9 – curtain of the linear displacement sensor, rigidly connected with the drill pipe; 10 – DC amplifier; 11 – oscilloscope; 12 – guide frame; 13 – drill pipe; 14 – rock

Увеличение амплитуды и энергии силовых импульсов в бурильной колонне наблюдается при уменьшении длины РВД и увеличении его диаметра (рис. 5).

Эксперимент показал, что при постоянном значении объема жидкости ΔV , вытесняемом плунжером пульсатора в гидросистему гидроимпульсного механизма, чем меньше отношение этого объема к общему замкнутому объему гидросистемы, тем меньше амплитудное значение давления в гидросистеме, в том числе в силовом гидроцилиндре. При уменьшении диаметра РВД в нём повышается сопротивление пульсирующим движениям жидкости, что оказывает негативное влияние на процесс формирования силовых импульсов, снижая их амплитуду и энергию. Исследования показали, что осевое усилие подачи, воздействуя на пневмопружину и через неё на инерционную массу m , закреплённую на силовом гидроцилиндре, создаёт в последнем предварительное начальное давление, составляющее во время экспериментов в среднем 3 МПа. В эксперименте отмечалась нелинейная зависимость давления в силовом

гидроцилиндре от величины вытесняемой плунжером пульсатора объема жидкости ΔV в общий замкнутый объем V гидросистемы, который остаётся постоянной величиной. Установлено, что чем выше осевое усилие подачи, тем эффективнее формируется амплитуда силовых импульсов в бурильной колонне.

Осциллограммы на рис. 6 показывают, что время между двумя соседними силовыми импульсами составляет 40 мс, то есть частота колебательного контура с инерционной массой m составит 25 Гц, что в 2 раза ниже вынужденной частоты гидропульсатора. Согласно теории колебаний [19] в данном случае этот контур становится захватывающим парциальную частоту автоколебательной системы и благодаря снижению частоты формируемых силовых импульсов позволяет повышать их амплитуду и энергию. Вместе с тем, как следует из представленных на рис. 7 зависимостей импульсной силы от усилия подачи, на амплитуду импульса существенно влияет инерционная масса m . Амплитуда силовых импульсов растёт с увеличением активной инерционной массы (рис. 7).

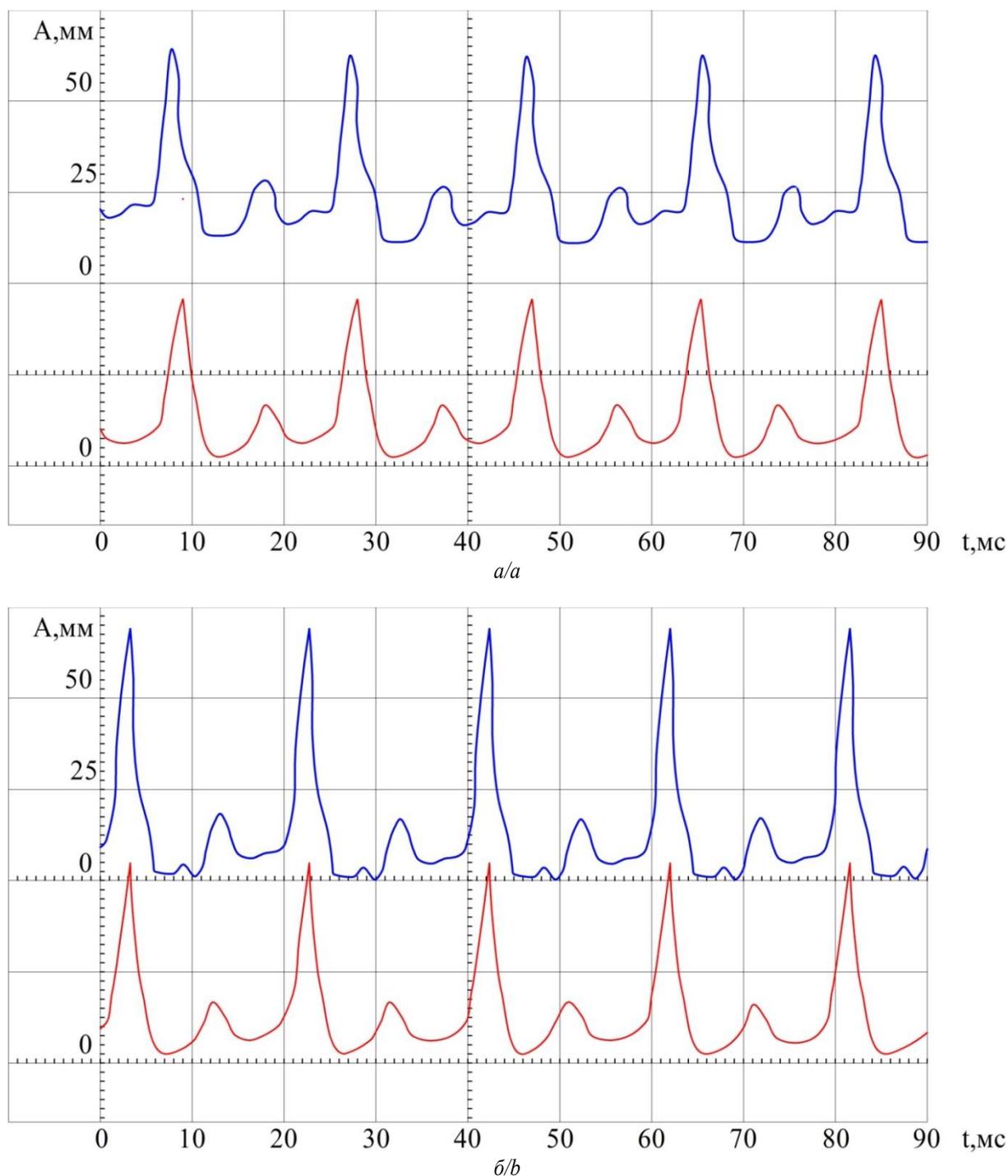


Рис. 5. Формируемые силовые импульсы: верхние осциллограммы – усилие в бурильной трубе; нижние осциллограммы – давление в гидроцилиндре: а) диаметр РВД 16 мм, длина РВД 2,5 м; б) диаметр РВД 20 мм, длина РВД 0,95 м. Вынужденная частота гидропульсатора 25 Гц (развертка осциллографа 25 мс/см экрана)

Fig. 5. Power pulses: upper oscillograms – axial load in the drill pipe; lower oscillograms – pressure in the hydraulic cylinder: а) high-pressure hose diameter 16 mm, high-pressure hose length 2,5 m; б) high-pressure hose diameter 20 mm, high-pressure hoses length 0,95 m. Forcing frequency of the hydraulic pulsator 25 Hz (oscilloscope sweep 25 ms/cm of screen)

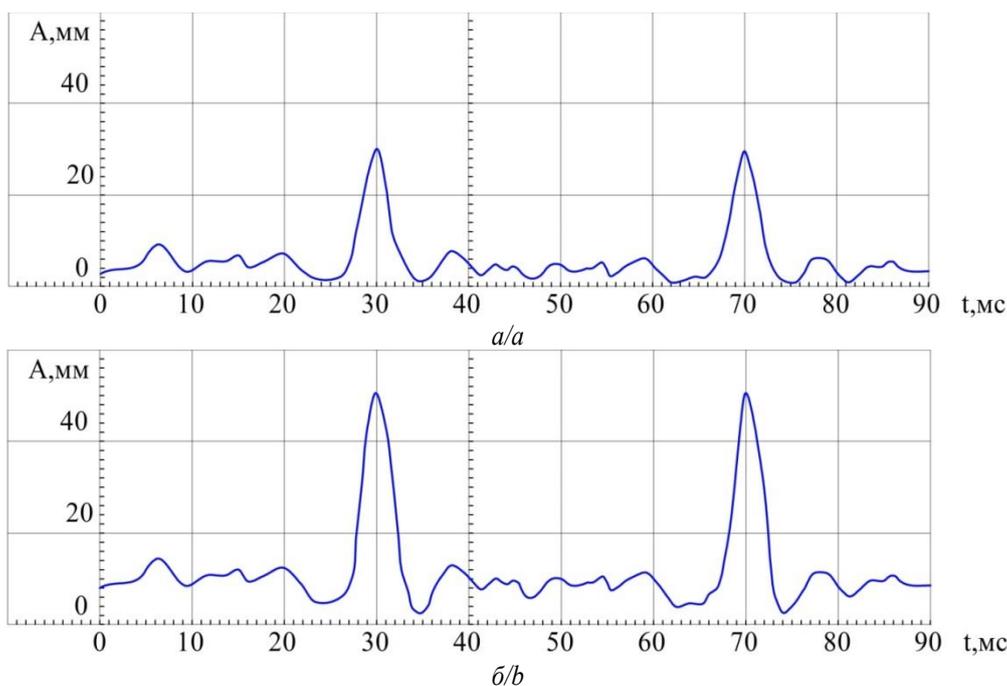


Рис. 6. Осциллограммы импульсов, формируемых в буровой колонне при разном значении осевого усилия податчика буровой установки: а) 9,4 кН; б) 11,75 кН; диаметр РВД 20 мм, длина РВД 1,16 м. Частота вынужденных колебаний гидропульсатора $\omega_s=50$ Гц; масштаб $\mu_t=10$ мс/см экрана осциллографа

Fig. 6. Oscillograms of pulses generated in the drill string at different values of the axial load: а) 9,4 kN; б) 11,75 kN; high-pressure hose diameter 20 mm, high-pressure hose length 1,16 m. Forcing frequency of the hydraulic pulsator 50 Hz; scale $\mu_t=10$ ms/cm of the oscilloscope screen

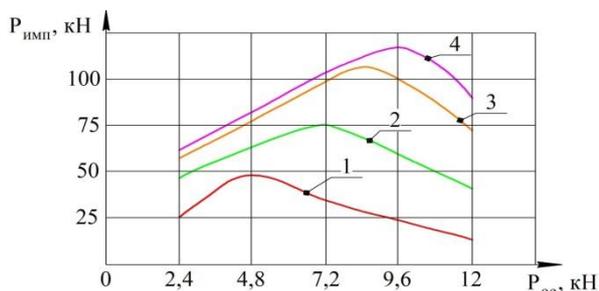


Рис. 7. Характеристика, показывающая влияние усилия подачи и активной инерционной массы на амплитуду силовых импульсов в колонне труб при объёме рукава высокого давления: $V=455$ см³ ($d=20$ мм, $L=1,45$ м): 1 – $m=30$ кг; 2 – $m=70$ кг; 3 – $m=110$ кг; 4 – $m=230$ кг

Fig. 7. Characteristic showing the influence of the axial load and inertial mass on the amplitude of the power pulses in the drill string at the volume of the high-pressure hose: $V=455$ cm³ ($d=20$ mm, $L=1,45$ m): 1 – $m=30$ kg; 2 – $m=70$ kg; 3 – $m=110$ kg; 4 – $m=230$ kg

Выявлено, что представленная система работает устойчиво со сдвигом фаз колебаний активной массы и вынужденных колебаний плунжера пульсатора в диапазоне от 120 до 150 градусов. Таким образом, варьируя частоту колебаний плунжера и величину активной массы m , можно определить требуемую жесткость отдельных элементов системы. В частности, можно определить жесткости гидро- и пневмопружины гидроимпульсного механизма, что позволит формировать силовые импульсы с параметрами, необходимыми для эффективного разрушения твердых включений, кото-

рые могут встречаться в процессе бурения пилотных скважин, а также благодаря пологому переднему фронту снизить уровень динамических нагрузок на резьбовые соединения бурильных колонн, повышая надежность их работы. Кроме того, ряд исследователей отмечают, что силовые импульсы с пологим передним фронтом в большей степени используют свою энергию на разрушение горной породы [20].

Взаимосвязь энергии силовых импульсов и осевого усилия подачи представлены на рис. 8.

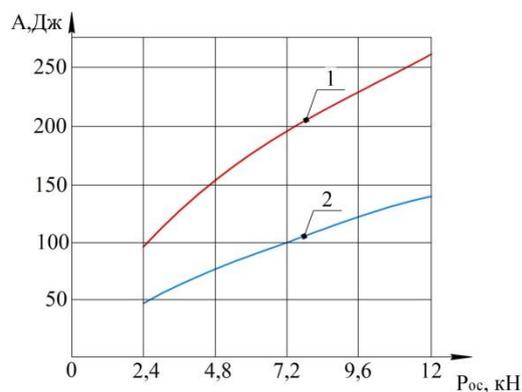


Рис. 8. Взаимосвязь энергии силовых импульсов и осевого усилия подачи: 1 – объём РВД $V=298$ см³, $d=20$ мм; 2 – объём РВД $V=515$ см³, $d=20$ мм; инерционная масса $m=230$ кг

Fig. 8. Relationship between the energy of power pulses and the axial load: 1 – high-pressure hose volume $V=298$ sm³, $d=20$ mm; 2 – high-pressure hose volume $V=515$ sm³, $d=20$ mm; inertial mass $m=230$ kg

Моделирование и анализ динамики гидроимпульсного механизма

Динамику гидроимпульсного механизма можно анализировать, представив его механической схемой замещения (рис. 9). Схема замещения представляет одномассовую колебательную систему с кинематическим возмущением, где x_2 – перемещение массы m , $C_1=f(\Delta x)$ – нелинейная упругость замкнутого объёма жидкости, C_2 – упругость пневмоподатчика (пневмопружины).

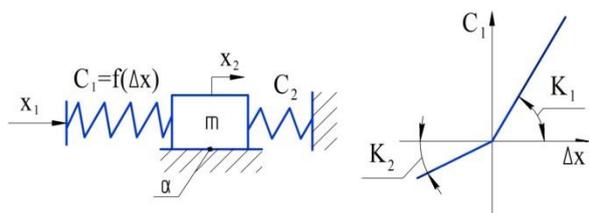


Рис. 9. Механическая схема замещения гидроимпульсного механизма и график нелинейной функции упругости замкнутого объёма жидкости $C_1=f(\Delta x)$

Fig. 9. Mechanical equivalent circuit of the hydraulic pulse mechanism and the graph of the nonlinear elasticity function of a closed-loop volume of liquid $C_1=f(\Delta x)$

Для упрощения исследования принимаем поступательное движение системы и перемещение поршня гидроцилиндра равным нулю. Сила, связанная с разрушением породы, заменена вязкой нагрузкой $\alpha \dot{x}_2$. Величина $\Delta x = x_1 - x_2$ представляет деформацию нелинейной упругости C_1 . Применяя принцип Даламбера, составляем уравнение движения массы m

$$m\ddot{x}_2 + \alpha \dot{x}_2 + [C_1(\Delta x) + C_2]x_2 = C_1(\Delta x)x_1. \quad (1)$$

Из схемы замещения гидроимпульсного механизма (рис. 9) видно, что гидропривод x_1 имеет обратную отрицательную жёсткую связь по выходной координате x_2 массы m ; колебательный контур с массой m и её координатой x_2 имеет местную обратную отрицательную связь по скорости и перемещению. При составлении передаточной функции по структурной схеме приходим также к выражению (1), что может служить критерием проверки соответствия гидроимпульсного механизма его механической схеме замещения.

Уравнение (1) позволяет исследовать динамику при различных параметрах гидроимпульсного механизма с учетом получаемых нелинейной зависимости $C_1=f(\Delta x)$ и формы периодического входного сигнала x_1 . Амплитудно-частотные характеристики были получены при различных значениях k_1 нелинейной функции $C_1=f(\Delta x)$, а также при различных значениях $b = \frac{K_2}{K_1}$, изображенных на рис. 11. Зависимости собственных частот ω_0 от коэффициента $\sqrt{K_1}$ были получены при $\alpha=0,2$ и $C_2=0,25 C_0$, где C_0 – упругость рукава высокого давления в статике (рис. 10). Погрешность решения для линейной системы (при $b=1$) не превышала двух процентов.

Исследования на модели показали, что теоретический расчёт даёт большое расхождение в определе-

нии ω_0 при уменьшении b , начиная с $b=0,7$. Теоретический расчёт проводился по формуле

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{C_1 \cdot C_2}{m(C_1 + C_2)}}, \quad (2)$$

где $C_1 = \frac{C_0(K_1 + bK_2)}{2}$.

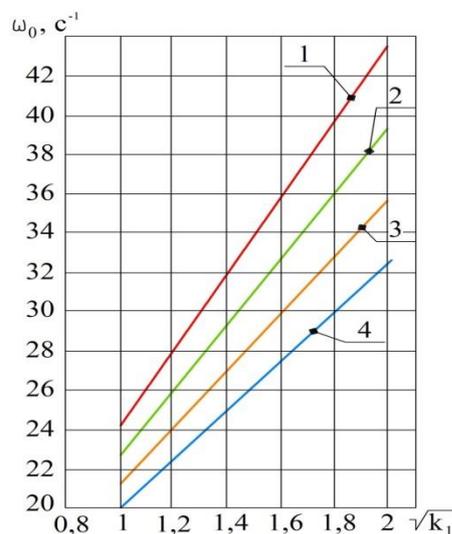


Рис. 10. Зависимость собственных частот ω_0 от коэффициента $\sqrt{K_1}$: 1) $b=1$; 2) $b=0,7$; 3) $b=0,5$; 4) $b=0,3$, где $b = \frac{K_2}{K_1}$

Fig. 10. Dependence of eigenfrequency ω_0 on the coefficient $\sqrt{K_1}$: 1) $b=1$; 2) $b=0,7$; 3) $b=0,5$; 4) $b=0,3$, where $b = \frac{K_2}{K_1}$

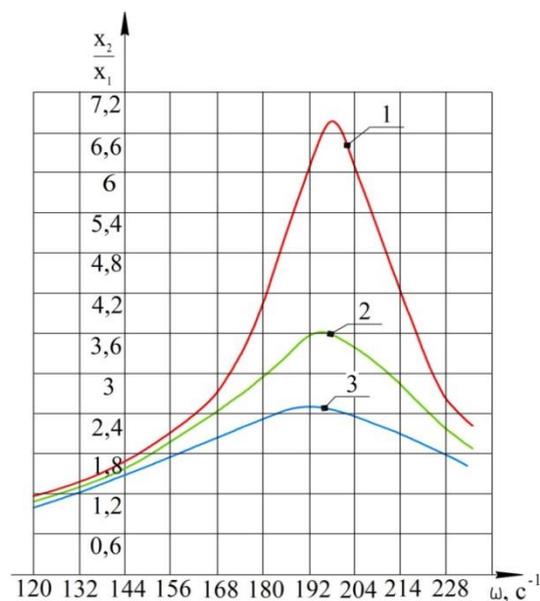


Рис. 11. Амплитудно-частотные характеристики гидромеханической системы: $x_1=const$; $k_1=4$; $b=0,3$; 1, 2, 3 – соответственно $\varepsilon=0,1$; $0,2$ и $0,3$

Fig. 11. Amplitude-frequency characteristics of the hydromechanical system: $x_1=const$; $k_1=4$; $b=0,3$; for 1, 2, 3 – $\varepsilon=0,1$; $0,2$ and $0,3$ respectively

Установлено, что при $1 > b \geq 0,7$ система близка по своим свойствам к линейной и собственная частота может быть рассчитана по формуле (2). При уменьшении b , начиная с $0,7$, система проявляет себя как нелинейная, и собственная частота её может быть определена путем математического моделирования.

Поскольку при бурении скважин с использованием гидроимпульсного механизма часть энергии расходуется на разрушение горной породы, были получены амплитудно-частотные характеристики системы при постоянном ходе плунжера гидропульсатора $x_1 = \text{const}$ и $k_1=4$, $b=0,3$. Для такого режима работы гидроимпульсного механизма амплитудно-частотные характеристики представлены на рис. 11 при различной относительной величине расхода энергии системы ϵ на разрушение горных пород с перемежающейся твердостью в процессе бурения пилотных скважин.

Заключение

1. Для обеспечения эффективного режима бурения на участках траектории пилотных скважин с повышенной твердостью разработана и успешно апробирована в лабораторных условиях безбойковая система формирования силовых импульсов, распространяющихся в виде волн упругой деформации по бурильной колонне к породоразрушающему инструменту, позволяющая существенно ускорить проходку указанных интервалов скважины для прокладки трубопроводов.
2. Результаты экспериментальных исследований безбойкового гидроимпульсного механизма позволили выявить взаимосвязи основных параметров и динамические особенности его работы, а также ряд существенных преимуществ при сравнении с другими современными гидроударными механизмами, имеющими замкнутый объем жидкости для передачи через него энергии удара на буровой инструмент.
3. Основным преимуществом гидроимпульсного механизма является повышенный коэффициент полезного действия гидросистемы, в которой отсутствуют динамические потери энергии, связанные с возвратно-поступательными движениями поршня-бойка в гидроцилиндрах всех известных гидро-

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Aleksandrova N.I., Kondratenko A.S. Movement of an open-ended pipe with a soil plug under a longitudinal impact // *Geotechnical and Geological Engineering*. – 2020. – V. 38. – № 4. – P. 3493–3504.
2. Automatic trenchless horizontal directional drilling using quad motors drilling heads / M.A. Kamel, M. Eishafei, A.-W.A. Saif, A.A. Al-Majed // *Proc. of 15th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices*. – Tunisia-Hammamet, 2018. – P. 1172–1177.
3. Analysis and design of pipes installed via direct PIPE technology / M. Rabiei, K.P. Chang, M. Gelinis, A. Neale // *Proc. of Conference: NASTT's 2018. No-Dig Show*. – Palm Springs, CA, March 25–29, 2018. – 11 p.
4. Smolyanitskii B.N., Tishenko I.V., Chervov V.V. Improvement prospects for air hammers in building and construction work // *Journal of Mining Science*. – 2009. – V. 45. – Iss. 4. – P. 363–371.

ударных механизмов бурильных установок. Импульсы силы, формируемые механизмом, отличаются более пологим передним фронтом и на порядок большей длительностью импульса по сравнению с обычными ударными механизмами. Это позволяет увеличить внедрение породоразрушающего механизма в грунт и снизить динамические нагрузки на резьбовые соединения труб в бурильной колонне.

4. Формируемые гидроимпульсным механизмом силовые импульсы имеют частотный спектр с пониженной долей высокочастотных составляющих. Основная часть энергии импульсов переносится по бурильной колонне в виде продольных волн деформации, которые представляют низкочастотную составляющую частотного спектра и интенсифицируют процесс разрушения горных пород при бурении скважин.
 5. Гидроимпульсный механизм обеспечивает без каких-либо систем или устройств автоматическое регулирование амплитуды силовых импульсов в зависимости от твердости разрушаемой среды. Чем больше твердость горной породы или твердость возможных включений в грунте, тем больше становится жесткость всей гидросистемы замкнутой полости гидроимпульсного механизма, что вызывает увеличение амплитуды формируемых силовых импульсов.
 6. В гидроимпульсном механизме силовой гидроцилиндр с поршнем можно заменить сильфоном, что обеспечит герметичность замкнутого объема жидкости гидросистемы и позволит избежать в таком случае утечек между поршнем и внутренней поверхностью силового гидроцилиндра ввиду отсутствия их в гидросистеме.
- Таким образом, анализ результатов проведенных экспериментальных исследований показал возможности эффективного применения гидроимпульсного механизма вместо других известных гидроударных механизмов с передачей энергии удара через замкнутый объем жидкости при бурении пилотных скважин и бестраншейной прокладке трубопроводов в горных породах с перемежающейся твердостью.

5. Effects of working angle on pneumatic down-the-hole hammer drilling / Z. Zhao, Y. Meng, Y. Li, X. Shi, C. Xiang // *Rock mechanics and rock engineering*. – 2014. – V. 48. – Iss. 5. – P. 2141–2155.
6. Gorodilov L.V. Basic properties of one-way action hydraulic percussion system with two piston arresters // *Journal of Mining Science*. – 2020. – V. 56. – № 6. – P. 105–115.
7. Efimov V.P., Gorodilov L.V. Experimental investigation of shock pulses in the piston-bit system in interaction with rock mass // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2021. – V. 773. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/773/1/012041> (дата обращения: 15.09.2021).
8. Hydraulic-mechanical coupling modeling by bond graph for impact system of a high frequency rock drill drifter with sleeve distributor / G. Yonga, L. Deshumb, Ya. Shuyib, L. Xuejuna, Ch. Jianweng // *Automation and construction*. – 2016. – V. 63. – P. 88–99.

9. Tishhenko I.V., Chervov V.V., Smoljanickij B.N. Evaluation of layout of air drill hammer with smooth adjustment of impact impulse frequency // Journal of Mining Science. – 2017. – V. 53. – № 1. – P. 110–118.
10. Influence of DHT hammer impact energy on drilling-with-casing system performance / V.V. Timonin, S.E. Alekseev, V.N. Karpov, E.M. Chernienkov // Journal of Mining Science. – 2018. – V. 54. – № 1. – P. 61–71.
11. Zhukov I.A., Smoljanickij B.N., Timonin V.V. Improvement of down-the-hole air hammer efficiency by optimizing shapes of colliding parts // Journal of Mining Science. – 2018. – V. 54. – № 2. – P. 37–43.
12. Eremyants V.E., Melis kyzy Nazira About the collision of the rods model choice through the closed liquid volume // Journal of Advanced Research in Technical Science. – 2017. Iss. 6. – P. 11–16.
13. Еремьянц В.Э., Мелис кызы Назира. Модель ударной системы с жидкостной камерой для разрушения прочных и мерзлых грунтов // Автоматизированное проектирование в машиностроении. – 2017. – № 2. – С. 34–38.
14. Перспективы развития технологии и техники горизонтально-направленного бурения пилотных скважин для бестраншейной прокладки трубопроводов / Л.А. Саруев, А.В. Шадрин, А.Л. Саруев, С.С. Васенин, А.В. Пахарев // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 4. – С. 89–97.
15. Kordubailo A.O., Simonov B.F. Downhole periodic electromagnetic seismic source designs // Journal of Mining Science. – 2020. – V. 56. – № 5. – P. 146–153.
16. Ударный узел установки ударно-вращательного бурения: пат. № 79924 Российская Федерация. МПК E2B 6/04 (2006.01); заявл. 21.07.2008; опубл. 20.01.2009. – Бюл. № 2. – 4 с.
17. Ударный узел станка ударно-вращательного бурения: пат. № 79923 Российская Федерация. МПК E21B 6/04 (2006.01); заявл. 21.07.2008; опубл. 20.01.2009. – Бюл. № 2. – 4 с.
18. Сердечный А.С. Управление амплитудой и длительностью ударного импульса: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Новосибирск, 1997. – 31 с.
19. Мигулин В.В. Основы теории колебаний. – М.: Наука, 1978. – 392 с.
20. Еремьянц В.Э., Мелис кызы Назира. Модель ударной системы с жидкостной камерой для разрушения крепких горных пород // Фундаментальные основы механики. – 2017. – № 2. – С. 49–53.

Поступила 24.11.2021 г.

Информация об авторах

Саруев Л.А., доктор технических наук, профессор отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Шадрин А.В., доктор технических наук, доцент отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Мельнов К.В., аспирант отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Саруев А.Л., кандидат технических наук, доцент отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 622.233.63

RESULTS OF EXPERIMENTAL STUDIES OF THE HYDRAULIC PULSE MECHANISM FOR DRILLING PILOT WELLS DURING PIPELINE LAYING

Lev A. Saruev¹,
saruevla@tpu.ru

Anastasiya V. Shadrina¹,
avshadrina@rambler.ru

Kirill V. Melnov¹,
kvm11@tpu.ru

Alexey L. Saruev¹,
saruev@tpu.ru

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

The relevance. Hydraulic percussive mechanisms are widely used in mining and other industries. They are currently being actively improved. In particular, numerous publications argue that it is possible to control the amplitude and duration of pressure pulses generated by hydromechanical systems in closed-loop system, through which the plunger transmit the impact energy to the rock-breaking tool. At the same time, increased duration of the power pulses lead to significant increase in the efficiency of rock failure, the excessive dynamic loads on the elements of the drilling tool are reduced. Typically percussive mechanisms have hammer the reciprocating motion of which leads to energy losses. A fundamentally new hammerless hydraulic mechanism was developed. It allows automatic regulating the amplitude and duration of the force pulses it generates, depending on the hardness of the destroyed rock. Nevertheless, it is necessary to conduct special studies in order to substantiate interrelations among its main parameters and operability in general.

The main aim of the research is substantiation and experimental verification of the physical model of new hydraulic percussive mechanism in laboratory settings.

Object of study is new hydraulic percussive mechanism with a closed chamber, where force pulses are formed, making the rock destruction more efficient.

Subject: regularities and relationships of the main kinematic and dynamic parameters of the physical model of the hydraulic percussive mechanism.

Methods: analysis of scientific and technical information regarding field of knowledge; modeling the dynamic processes in hydraulic percussive mechanism and laboratory investigation.

Results. The efficiency of the hammerless hydraulic mechanisms is assessed; its advantages are revealed in comparison with the existing hydraulic percussion mechanisms; it has been established that the hammerless hydraulic mechanisms automatically regulate the amplitude and duration of power pulses depending on the hardness of the destroyed rock and do not require an additional control system for this process; the efficiency of the hydraulic percussive mechanism is higher than in existing hydro percussive systems as it forms power pulses that practically have no high-frequency components, not conducive to the rocks destruction.

Key words:

Power pulse, high pressure hose, hammerless hydraulic mechanisms, closed-loop system, pressure pulse, pulse amplitude and duration, trenchless pipeline construction.

REFERANCES

- Aleksandrova N.I., Kondratenko A.S. Movement of an open-ended pipe with a soil plug under a longitudinal impact. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2020, vol. 38, no. 4, pp. 3493–3504.
- Kamel M.A., Eishafei M., Saif A.-W.A., Al-Majed, A.A. Automatic trenchless horizontal directional drilling using quad motors drilling heads. *Proc. of 15th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices*. Tunisia-Hammamet, 2018. pp. 1172–1177.
- Rabiei M., Chang K.P., Gelinas M., Neale A. Analysis and design of pipes installed via direct PIPE technology. *Proc. of Conference: NASTT No-Dig Show*. Palm Springs, CA, March 25–29, 2018. 11 p.
- Smolyanitskii B.N., Tishenko I.V., Chervov V.V. Improvement prospects for air hammers in building and construction work. *Journal of Mining Science*, 2009, vol. 45, no. 4, pp. 363–371.
- Zhao Z., Meng Y., Li Y., Shi X., Xiang C. Effects of working angle on pneumatic down-the-hole hammer drilling. *Rock mechanics and rock engineering*, 2014, vol. 48, Iss. 5, pp. 2141–2155.
- Gorodilov L.V. Basic properties of one-way action hydraulic percussion system with two piston arresters. *Journal of mining science*, 2020, vol. 56, no. 6, pp. 105–115.
- Efimov V.P., Gorodilov L.V. Experimental investigation of shock pulses in the piston-bit system in interaction with rock mass. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 773, Available at: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85107080391&doi=10.1088%2f1755-1315%2f773%2f1%2f012041&partnerID=> (accessed 15 September 2021).
- Yonga G., Deshumb L., Shuyib Ya., Xuejuna L., Jianweng Ch. Hydraulic-mechanical coupling modeling by bond graph for impact system of a high frequency rock drill drifter with sleeve distributor. *Automation and construction*, 2016, vol. 63, pp. 88–99.
- Tishenko I.V., Chervov V.V., Smoljanickij B.N. Evaluation of layout of air drill hammer with smooth adjustment of impact impulse frequency. *Journal of Mining Science*, 2017, vol. 53, no. 1, pp. 110–118.
- Timonin V.V., Alekseev S.E., Karpov V.N., Chernienkov E.M. Influence of DHT hammer impact energy on drilling-with-casing system performance. *Journal of Mining Science*, 2018, vol. 54, no. 1, pp. 61–71.

11. Zhukov I.A., Smoljanickij B.N., Timonin V.V. Improvement of down-the-hole air hammer efficiency by optimizing shapes of colliding parts. *Journal of Mining Science*, 2018, vol. 54, no. 2, pp. 37–43.
12. Eremyants V.E., Melis kyzy Nazira. About the collision of the rods model choice through the closed liquid volume. *Journal of Advanced Research in Technical Science*, 2017, Iss. 6, pp. 11–16.
13. Eremyanc V.E., Melis kyzy Nazira. Model udarnoy sistemy s zhidkostnoy kameroy dlya razrusheniya prochnykh i merzlykh gruntov [Model of a percussion system with a liquid chamber for the destruction of solid and frozen soils]. *Avtomatizirovannoe proektirovanie v mashinostroenii*, 2017. vol. 2, pp. 34–38.
14. Saruev L.A., Shadrina A.V., Saruev A.L., Vasenin S.S., Pakharev A.V. Prospects for development of technology and facilities of pilot bores horizontal directional drilling for trenchless laying of pipelines. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 4, pp. 89–97. In Rus.
15. Kordubailo A.O., Simonov B.F. Downhole periodic electromagnetic seismic source designs. *Journal of Mining Science*, 2020, vol. 56, no. 8, pp. 146–153.
16. Kazantsev A.A., Shadrina A.V., Saruev L.A., Saruev A.L. *Udarny uzel ustanovki udarno-vrashchatelnogo bureniya* [Percussive mechanism of percussion rotary drilling]. Patent RF no. 79924, 2009.
17. Kazantsev A.A., Shadrina A.V., Saruev L.A., Saruev A.L. *Udarny uzel stanka udarno-vrashchatelnogo bureniya* [Percussive mechanism of percussion rotary drilling]. Patent RF no. 79924, 2009.
18. Serdechny A.S. *Upravlenie amplitudoy i dlitelnostyu udarnogo impulsa*. Aftoreferat Diss. Dokt. nauk [The control of pulse height and duration. Dr. Diss. Abstract]. Novosibirsk, 1997. 31 p.
19. Migulin V.V. *Osnovy teorii kolebaniy* [Fundamentals of vibration theory]. Moscow, Nauka Publ., 1978. 392 p.
20. Eremyants V.E., Melis kyzy Nazira. Model udarnoy sistemy s zhidkostnoy kameroy dlya razrusheniya krepkikh gornykh porod [Model of a percussion system with a liquid chamber for the destruction of hard rock]. *Fundamentalnye osnovy mekhaniki*, 2017, no. 2, pp. 49.

Received: 24 November 2021.

Information about the authors

Lev A. Saruev, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Anastasiya V. Shadrina, Dr. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Kirill V. Melnov, post-graduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

Aleksey L. Saruev, Cand Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 553.9:549.02

ОСОБЕННОСТИ МИНЕРАЛЬНОГО СОСТАВА НИЗКОПРОНИЦАЕМЫХ КРЕМНИСТО-ГЛИНИСТЫХ ПОРОД-КОЛЛЕКТОРОВ БЕРЕЗОВСКОЙ СВИТЫ СЕВЕРА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Ананьева Людмила Геннадьевна¹,
lga@tpu.ru

Дорошенко Александр Александрович²,
ssdoro.47@mail.ru, a.doroshenko@nedra.gazprom.ru

Ильенок Сергей Сергеевич¹,
ilenokss@tpu.ru

Карымова Яна Олеговна²,
ya.karymova@nedra.gazprom.ru

Коровкин Михаил Владимирович^{1,3},
mvk@tpu.ru

Максимова Юлия Анатольевна¹,
yam3@tpu.ru

Пестерев Алексей Викторович¹,
pesterev@tpu.ru

Процкий Олег Николаевич¹,
onp6@tpu.ru

Савинова Олеся Вячеславовна¹,
logvinenkoov@tpu.ru

Хрущева Мария Олеговна³,
masha2904@mail.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 635050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

² ООО «Газпром ВНИИГАЗ»,
Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Герцена, 70.

³ Национальный исследовательский Томский государственный университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью развития нефтегазопромышленного комплекса Западной Сибири путём выявления нетрадиционных (в том числе низкопроницаемых) коллекторов и оценки их перспективности вовлечения в разработку.

Цель: повышение эффективности газодобычи путём изучения влияния строения минерального вещества пород на поровое пространство и выявление нетрадиционных коллекторов.

Объекты: сеноманские отложения, ввод в разработку которых планируется для поддержания добычи в газовой промышленности.

Методы: оптическая и электронная сканирующая микроскопия, рентгеноспектральный и рентгенофлуоресцентный анализ, инфракрасная спектроскопия, рентгеновская дифракция, анализ фильтрационно-емкостных свойств методом GRI-SMP-200.

Результаты. Изучены особенности минерального состава низкопроницаемых кремнисто-глинистых пород-коллекторов берёзовской свиты севера Западной Сибири на примере Медвежьего месторождения. Хемогенно-биогенное происхождение данных осадочных пород подтверждается встречающимися остатками органического материала: спикул губок, раковин радиолярий, моллюсков и др. В структуре породы выявляются мелкие поры, заполненные каолинитом и кварцем, и отдельные зёрна монтмориллонита. Также в виде сферических агрегатов встречаются многочисленные фрамбонды пирита (FeS_2), который является аутигенным раннедиагенетическим биоминералом, характерным для восстановительной зоны диагенеза. Показано, что литолого-минералогическим критерием выявления продуктивных зон в нетрадиционных коллекторах Медвежьего месторождения может быть выбран «индекс кристалличности», характеризующий степень преобразования опал-кristобалит-тридимитовой фазы (ОКТ-фазы) кремнезёма. Появление кристаллической фазы кварца из нестабильного хемогенно-биогенного аморфного кремнезёма вызывает появление более крупных пустот, увеличивая газонасыщенность и газопроницаемость. Выявление особенностей минерального состава низкопроницаемых пород-коллекторов, влияющих на их фильтрационно-емкостные свойства, позволяет оценить перспективность их вовлечения в разработку месторождения, а также будет способствовать решению главной проблемы, возникающей при эксплуатации преобладающего количества газовых месторождений Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции, – продление «жизни» месторождений газа после истощения высокопродуктивных сеноманских отложений.

Ключевые слова:

Породы-коллекторы, кварц, опал-кristобалит-тридимитовая фаза, полиморфные модификации SiO_2 , опал-кristобалит-тридимитовая фаза кремнезёма, инфракрасная спектроскопия, рентгеноструктурный анализ.

Введение

Интерес к изучению нетрадиционных коллекторов обусловлен современными вызовами нефтегазопромышленного комплекса, связанными с поиском новых источников и эффективности добычи углеводородного сырья. В настоящее время отмечается повышенное внимание к проблеме исследования трудноизвлекаемых запасов углеводородов, выявления не-

традиционных (в том числе низкопроницаемых) коллекторов с точки зрения оценки их перспективности вовлечения в разработку.

Снижение добычи газа из сеноманских горизонтов заставило обратить внимание на газоперспективность отложений ниже-берёзовской подсвиты севера Западной Сибири [1, 2]. Данные отложения представлены опоками, в различной степени глинистыми, и от-

носятся к числу нетрадиционных: они характеризуются высокой пористостью (коэффициент пористости достигает 40 %), но низкой проницаемостью (коэффициент проницаемости обычно менее $0,1 \cdot 10^{-3}$ мкм²) [3–5]. Такая низкая проницаемость предопределяет и низкие дебиты скважин. Однако необходимая информация для обеспечения проектирования разработки сенонских отложений пока явно недостаточна.

С 2013 г. усилиями ПАО «Газпром» началось бурение специальных скважин, в которых осуществлён отбор керн из сенонских отложений, в частности из отложений газонасыщенной нижеберёзовской под-свиты Медвежьего, Вынгапуровского и других месторождений. При этом использовались технологии, обеспечившие 100 % вынос породы из всех интервалов отбора керн.

Поскольку хорошо известно, что свойства пород-коллекторов нефти и газа в значительной степени зависят от их минерального состава, появилась реальная возможность детального изучения кремнисто-глинистых пород сенонских отложений физическими методами исследования в лабораторных условиях. Определение глинистых минералов, влияющих на формирование структуры пустотного пространства и изменение фильтрационно-емкостных свойств пласта в процессе добычи, оказалось возможным с помощью методов рентгеновской дифракции, сканирующей электронной микроскопии, инфракрасной спектроскопии [6–8].

В процессе литификации кремниевого хемогенно-биогенного материала трансформация его структуры сопровождается изменением вещественного состава за счет последовательных реакций растворения-осаждения-перекристаллизации и полиморфных переходов кремнезема: опал-А (аморфный кремнезём) – в опал-С (низкотемпературный кристаллический кристобалит) и в опал-СТ (опал-кристобалит-тридимит, так называемую ОКТ-фазу – метастабильную форму кремнезема), а по мере более глубоких преобразований – в кристобалит, тридимит, кварц [9]. Опаловый кремнезем (опал-А) образуется в морской, озерной и геотермальной среде на протяжении геологического времени. Во время диагенеза опал-А обычно превращается в опал-СТ, затем опал-С и, наконец, в кварц [10].

В ряде современных работ [10–12] показано, что наблюдается тесная связь между долей содержания кварца в породе и суммарной долей капилляров и макропор в пустотном пространстве. С увеличением доли содержания кварца в породе закономерно увеличивается и доля наиболее крупных пор в пустотном пространстве, что объясняет вероятный механизм появления данных пор. При кристаллизации исходного губчатого кремнистого осадка (геля кремниевой кислоты) в кварц происходит перераспределение молекул кремнезема к центрам кристаллизации. При этом по периферии зон кристаллизации образуются пустоты более крупных размеров, чем в исходном кремнистом осадке. Таким образом, чем больше вновь образованных кристаллов кварца в породе, тем больше размеры пустот.

С точки зрения пористости, проницаемости, плотности и других свойств горных пород переходная зона, в которой нестабильный хемогенно-биогенный кремнезем превращается из опала-А в метастабильный опал-СТ, является наиболее стратиграфически неоднородным интервалом, образующимся в результате диагенеза мелкозернистых отложений [13].

Следует отметить, что лучшим основным методом для определения и классификации opal-А, opal-СТ и opal-С является метод рентгеновской дифракции (XRD) [14–17], наряду с которым метод инфракрасной спектроскопии успешно применяется для определения кристаллических модификаций кремнезёма [18–21]. По сути, главной задачей при определении фазовых разновидностей кремнезёма явилось определение кристаллической фазы кварца как основного минералогического индикатора перспективности породы-коллектора.

В данной работе методами сканирующей электронной микроскопии, рентгеновской дифракции, инфракрасной (ИК) спектроскопии исследовались образцы кремнисто-глинистых пород, отобранных из kernового материала скважин, пробуренных на Медвеьем месторождении.

Методика исследования

Изучение образцов кремнисто-глинистых пород проводилось с помощью оптического полнофункционального стереомикроскопа Carton DSZT44 с окулярной видеокамерой HDC-20 (окуляры DSW увеличение 10x/23.0) и электронного сканирующего микроскопа: Hitachi 3400N (с разрешением 3 нм) с энергодисперсионным преобразователем EDX Bruker (X Flash 4010) для определения элементного состава микрорезерн породы.

Фазовые модификации кремнезёма определялись на дифрактометре XPert PRO специальной программой с выводом данных в цифровой форме [22]. Рентгенограммы снимались с шагом около 0,02 в интервале 5...70 град. 2 θ с вращением 30 об/мин и выдержкой 0,1 сек в точке под рентгеновским CuK α -излучением. Для исследований из образцов были приготовлены тонкорастёртые (менее 2 мкм) навески, которые затем спрессовали в «таблетку» по методике, изложенной в работе [17].

Спектры ИК-поглощения регистрировались на спектрофотометре IR Prestige-21 фирмы «Shimadzu» с преобразованием Фурье (FTIR-8400S) в интервале 300...4000 см⁻¹ с разрешением 0,001 см⁻¹ (FT-IR), с помощью программного обеспечения IRsolution. Исследуемый образец (массой 0,5 мг) растирался в агатовой ступке до фракции менее 2 мкм и смешивался с порошком KBr марок ОЧ или ЧДА, и прессовался в прозрачные тонкие диски [8, 19].

Для анализа фильтрационно-емкостных свойств низкопроницаемых коллекторов такого типа использовалась методика, разработанная Gas Research Institute (GRI). Для определения проницаемости дробленые образцы, массой 30 г, помещались в специальную камеру установки SMP-200. Далее в камере с помощью газа (гелия) создавалось давление порядка

200 psi, после чего регистрировалась кривая падения давления в течение 2000 с, на основании анализа полученной кривой определялось значение проницаемости образца в камере. Так как анализ проводится на дробленом образце, то полученная в ходе эксперимента проницаемость является матричной, то есть не учитывалось влияние естественной трещиноватости.

Экспериментальные результаты и обсуждение

Образцы кремнисто-глинистых пород-коллекторов Медвежьего месторождения представляют собой тонкозернистую породу (рис. 1), на поверхности которой визуально не выделяются крупные поровые каналы или отчетливо наблюдаемые пустоты. При исследовании на сканирующем электронном микроскопе обнаруживаются мелкие поры, заполненные каолини-

том и кварцем (рис. 2), а также отдельные зёрна монтмориллонита (рис. 5), что подтверждается результатами исследований методами рентгеновской дифракции (XRD) и инфракрасной спектроскопии (FT-IR) [23]. В породах встречаются многочисленные фрамбоиды пирита, представляющие собой сферические агрегаты (рис. 3, 4). Фрамбоидальный пирит (FeS_2) является аутигенным раннедиагенетическим биоминералом, характерным для восстановительной зоны диагенеза. Развитие фрамбоидов пирита и их скоплений приурочено главным образом к зонам осадков с высоким содержанием биогенных компонентов [24]. Это является принципиальным фактом для оценки условий образования и преобразования пород-коллекторов Медвежьего месторождения.

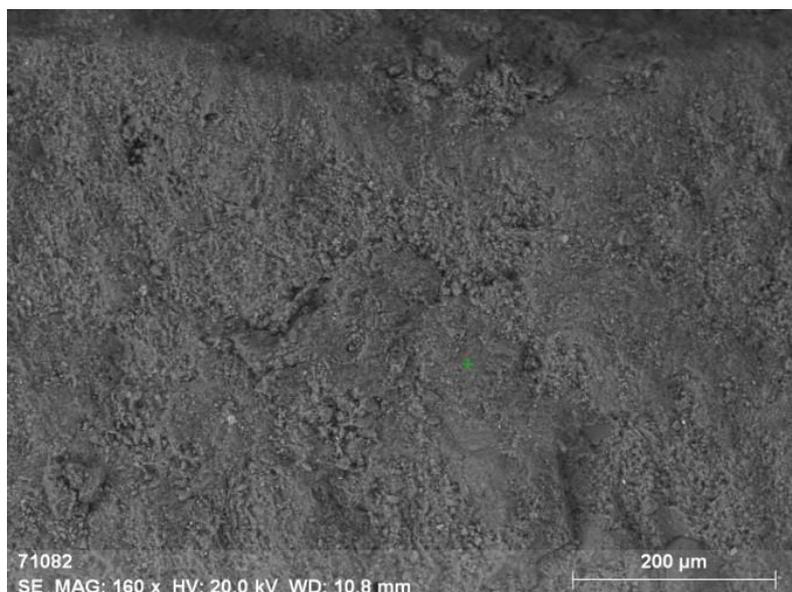


Рис. 1. Поверхность образца кремнисто-глинистой породы-коллектора

Fig. 1. Surface of a siliceous-clay reservoir rock sample

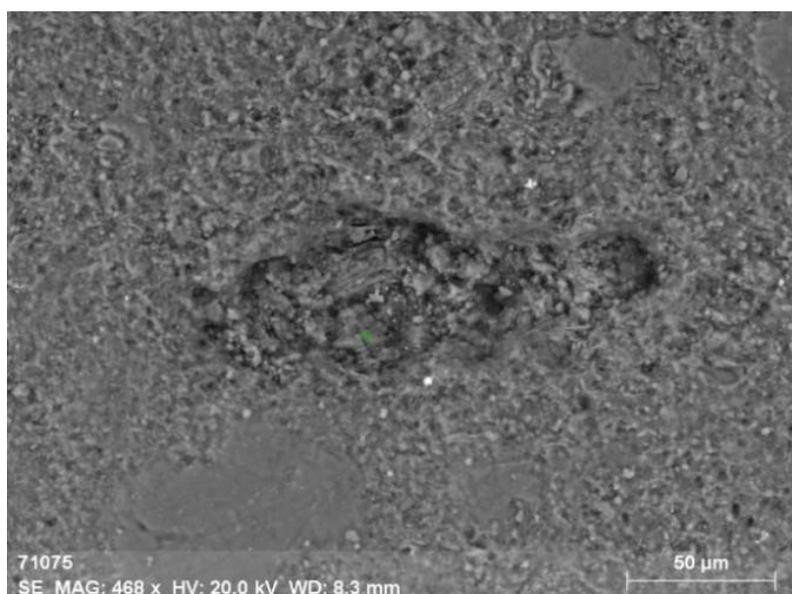


Рис. 2. Мелкая пора, заполненная каолинитом и кварцем

Fig. 2. Small pore filled with kaolinite and quartz

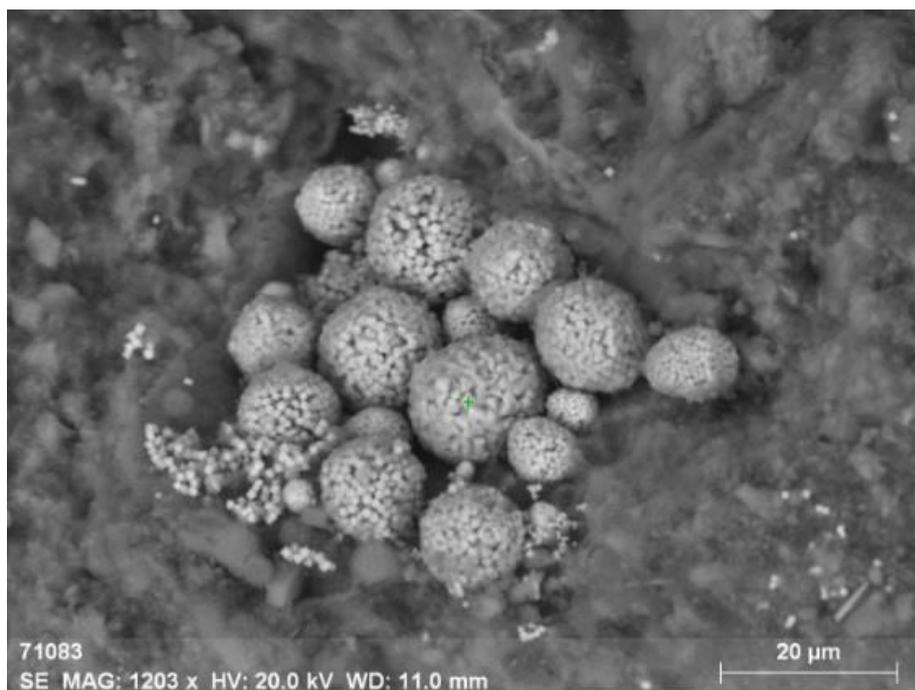


Рис. 3. Фрамбонды пирита сферической формы, сложноорганизованные агрегаты кристаллитов различного размера
Fig. 3. Spherical pyrite framboids and complex aggregates of crystallites of various sizes

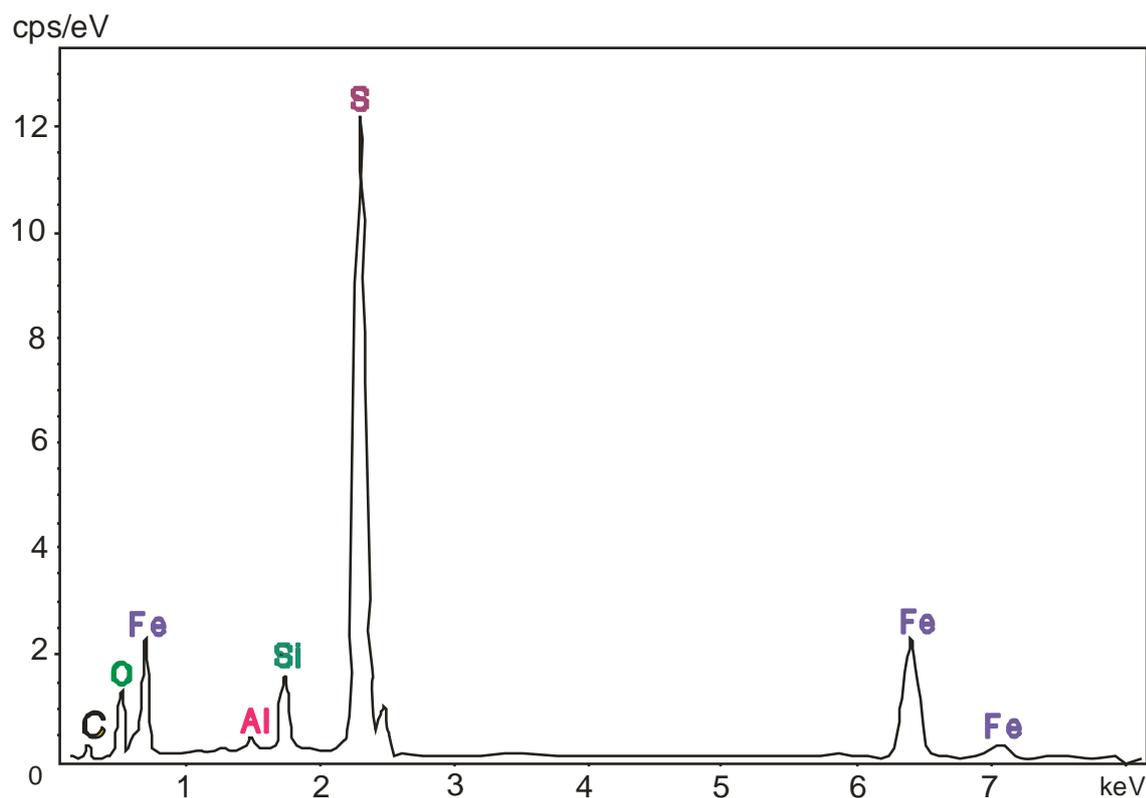


Рис. 4. Элементный состав фрамбондов пирита
Fig. 4. Elemental composition of pyrite framboids

Хемогенно-биогенное происхождение данных осадочных пород подтверждается встречающимися остатками органического материала: спикул губок, раковин радиолярий, моллюсков и др. (рис. 6), хотя также встречаются терригенные материалы (например, зёрна циркона) и даже могонит [21].

Особое внимание уделено определению кристаллической фазы кварца из аморфной ОКТ-фазы (опала), которая характеризуется повышенной степенью кристалличности кремнисто-глинистых пород-коллекторов и является минералогическим индикатором их повышенной газонасыщенности и проницаемости.

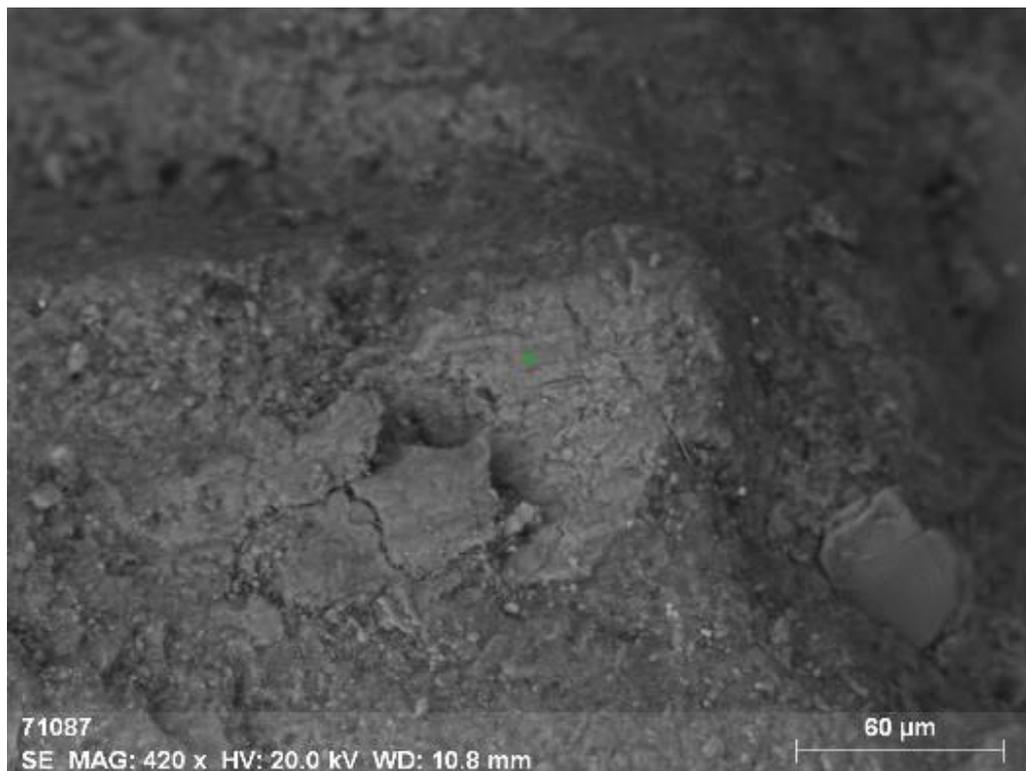


Рис. 5. Зерно монтмориллонита в структуре кремнисто-глинистой породы-коллектора
Fig. 5. Grain of montmorillonite in the matrix of a siliceous-clay reservoir rock



Рис. 6. Фрагмент материала органического происхождения, состоящего преимущественно из апатита
Fig. 6. Fragment of a material of organic origin consisting mainly of apatite

Обнаружение низкотемпературных модификаций кремнезёма стало возможным благодаря современным компьютерным программам обработки рентгенограмм на основе моделирования структур кремнезёма, полу-

чаемым методом рентгеновской дифракции (XRD) [25]. На рентгенограммах (рис. 7) наблюдается широкий рефлекс рассеяния рентгеновских лучей в районе углов 2θ от 20 до 26° (так называемое «аморфное гало» [26]).

Следует отметить, что использование обычных приемов рентгенографии для исследования природных образцов с наличием полиморфных модификаций диоксида кремния, слагающих ОКТ-фазу (опал-кристобалит-тридимитовая фаза), бывает затрудни-

тельным, поскольку между ними нет четких границ, а наблюдаются постепенные переходы от рентгено-аморфного кремнезема до более упорядоченного опал-кристобалита и кристаллического тридимита, которые могут иметь разные структурные характеристики.

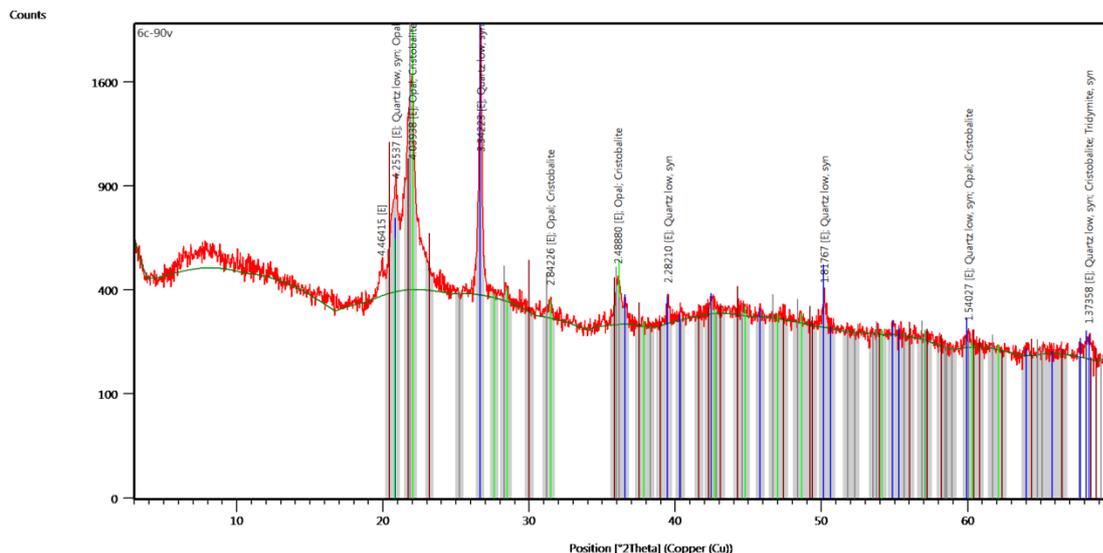


Рис. 7. Рентгенограмма валового состава обр. 6с-90. Минеральный состав: кварц [3,34₁₀; 4,25₂; 1,81₂Å], опал [4,05–4,07₁₀; 3,33₃Å], кристобалит [4,02₁₀; 2,83₂; 2,45–2,47₂Å], тридимит [4,30₁₀; 4,09₆; 3,80₆Å], глинистые минералы. Цветами отмечено: кварц – синий, опал – зеленый, кристобалит – серый, тридимит – темно-красный

Fig. 7. X-ray diffraction pattern of the sample 6s-90. Mineral composition: quartz [3,34₁₀; 4,25₂; 1,81₂Å], opal [4,05–4,07₁₀; 3,33₃Å], cristobalite [4,02₁₀; 2,83₂; 2,45–2,47₂Å], tridymite [4,30₁₀; 4,09₆; 3,80₆Å], clay minerals. Quartz is marked in blue, opal – in green, cristobalite – in gray, tridymite – in dark red

Для оценки степени кристалличности кварца использовался метод инфракрасной (ИК) спектроскопии [20]. Кристаллическая фаза кварца определяется наличием характерного для α-кварца двойного пика ИК поглощения в диапазоне 800–778 см⁻¹ (рис. 8). С изменением степени кристалличности вид данного дублета меняется, и, по мнению И.И. Плюсниной [20], именно его можно использовать для получения относительного критерия оценки кристалличности кварца. Положение двойного пика при 778 и 797 см⁻¹ по спектру, средняя интенсивность, отсутствие суперпозиции других полос и большая чувствительность к структурным изменениям явились причиной его использования в [19, 27] для расчёта индекса кристалличности по формуле

$$Kci=10fa/b,$$

где a/b – отношение величины слабого пика 778 см⁻¹ к его коротковолновому плечу; f – коэффициент пропорциональности для эталонного кварца, принимаемый в работе [20] равным 2,8; в данной работе использовался выравнивающий коэффициент пропорциональности $f=6$ (рис. 8).

В таблице приведены результаты определения общего минерального состава кремнисто-глинистых пород методом полуколичественного рентгенофазового анализа и значения индекса кристалличности (Kci), рассчитанные по спектрам инфракрасного поглощения. Образцы отобраны по разрезу скважины № 6 Медвежьего месторождения.

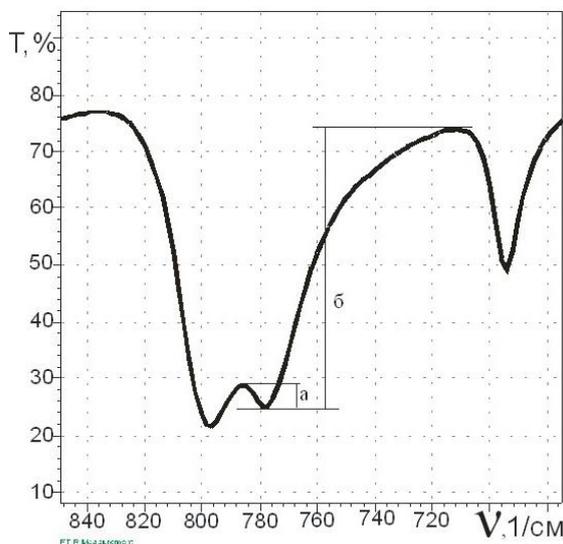


Рис. 8. Пояснение к методике расчёта индекса кристалличности по изменению пиков поглощения 778 см⁻¹ в спектрах инфракрасного поглощения

Fig. 8. Explanation of the method for calculating the crystallinity index by changing the absorption peaks at 778 cm⁻¹ in the infrared absorption spectra

Значения индекса кристалличности, равные нулю, соответствуют содержанию кристаллической фазы кварца менее 50 % и характеризуют зоны низкопроницаемых коллекторов, являющихся неперспективными для разработки. Участки кремнисто-глинистых

пород, характеризующиеся высокими значениями индекса кристалличности, как правило, содержат более 80 % кварца и могут быть отнесены к числу перспективных зон, поскольку отличаются повышенной проницаемостью по газу ($0,004...0,006 \text{ мкм}^2$). Отметим, что такие оценки проницаемости были получены на

измельчённой до фракции 1...5 мм породе с использованием метода GRI. Литологически сложно-построенные, неоднородные разрезы закономерно включают в себя и переходные зоны, которые характеризуются переменными интервалами уплотнения и пустотного пространства [5, 28].

Таблица. Результаты определения общего минерального состава кремнисто-глинистых пород методом полуквантитативного рентгенофазового анализа и значения индекса кристалличности (Kci), рассчитанные по спектрам инфракрасного поглощения

Table. Total mineral composition of siliceous-clay rocks determined by semi-quantitative X-ray phase analysis and the values of the crystallinity index (Kci) calculated from the infrared absorption spectra

Лабораторный № образца Sample number	Минералы/Minerals							Kci
	Кварц Quartz	Полевые шпаты/Feldspars		Сумма глинистых Amount of clay	ОКТ OCT	Пирит Pyrite	Барит Barite	
		КПШ K-feldspar	NaПШ Na-feldspar					
6с-37	67	–	–	23	10	–	–	8,15
6с-90	38	–	–	35	27	–	–	0
6с-97	36	–	–	30	34	–	–	0
6с-104	38	–	–	32	30	–	–	0
6с-107	53	–	–	36	11	сл	–	1,0
6с-153	58	–	–	32	10	–	–	1,22
6с-323	84	–	–	16	–	–	–	8,05
6с-372	81	–	–	19	–	–	–	10,73

Авторы работы [12] считают, что содержание в породе собственно ОКТ-фазы и других минералов (карбонатов, цеолита, глинистых минералов) не влияет на соотношение структурных блоков ОКТ-фазы. Но в работе [13] отмечается, что повышенное содержание смектитов замедляет фазовые превращения в кремнезёме, а присутствие карбонатных минералов, наоборот, может ускорить преобразование в ОКТ-фазе, что в итоге может вызвать появление неоднородности распределения кристаллического вещества и привести к сложному переплетению последовательности опал–СТ. При интерпретации рентгенограмм следует учитывать не только размеры кристаллитов (тридимита, кристобалита, кварца), но и структурные особенности, связанные с переменным количеством слоёв кристобалита и тридимита и изменением их относительных пропорций [26], и содержанием воды [9]. Сложные процессы диагенеза ОКТ-фазы и вариации фазовых модификаций кремнезёма даже на небольших интервалах зон осадконакопления могут обуславливать изменение расчётных значений содержания фаз и индекса кристалличности. Поэтому, учитывая сложность интерпретации последовательностей фазовых модификаций кремнезёма в кремнисто-глинистых отложениях, следует использовать комплекс дополнительных минералогических и геохимических методов [21].

Не смотря на различные оценки содержания фазовых модификаций кремнезёма, возможно установление некоторых «пороговых» значений индекса кристалличности, позволяющих разделять зоны нетрадиционных коллекторов и оценивать их перспективность.

Заключение

Доля различных фазовых модификаций кремнезёма существенно меняется по разрезу. Поскольку кристаллическая модификация кремнезёма (кварц) по сравнению с аморфной занимает меньший объём, то, как следствие, вызывает в пласте появление дополнительного пустотного пространства и повышение газонасыщенности и может служить основанием для выделения пластов, что, в свою очередь, является литолого-минералогическим и промышленно-геологическим критерием выявления продуктивных зон в нетрадиционных коллекторах нефти и газа. Выявление особенностей минерального состава низкопроницаемых пород-коллекторов, влияющих на их фильтрационно-емкостные свойства, позволяет оценить перспективность их вовлечения в разработку месторождения, а также будет способствовать решению главной проблемы, возникающей при эксплуатации преобладающего количества газовых месторождений Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции, – продление «жизни» месторождений газа после истощения высокопродуктивных сенонских отложений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Проблемы оценки нефтегазоперспективности отложений нижнеберезовской подсвиты севера Западной Сибири / В.В. Черепанов, С.Н. Меньшиков, С.А. Варягов, Д.Ю. Оглодков, В.Л. Бондарев, В.Т. Гудзенко, М.Ю. Миротворский, В.П. Клокова // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2015. – № 2. – С. 11–26.
2. Пережогин А.С., Нежданов А.А., Смирнов А.С. Перспективы освоения сенонского газоносного комплекса севера Западной Сибири // Экспозиция Нефть Газ. – 2016. – № 6. – С. 42–45.
3. Родивилов Д.Б., Кокарев П.Н., Мамяшев В.Г. Газонасыщенность нетрадиционного коллектора нижнеберезовской под-

4. Литолого-минералогические и промышленно-геологические критерии выделения продуктивных зон в сенонских отложениях / Д.Я. Хабибуллин, А.Н. Рыбьяков, Н.Р. Ситдинов, С.А. Варягов, С.В. Нересов, С.Г. Крекнин, В.В. Огибенин, А.А. Дорошенко, Я.О. Карымова, Д.Б. Родивилов // Геология и разработка месторождений. – 2018. – № 8. – С. 34–41.
5. Дорошенко А.А., Карымова Я.О. Характеристика пустотного пространства опок сенонских отложений севера Западной Сибири // Экспозиция нефть газ. – 2016. – № 6 (69). – С. 23–27.

6. Identification of components in smectite/kaolinite mixtures / J. Madejová, J. Kečkéš, H. Pálková, P. Komádel // Clay Minerals. – 2002. – V. 37 (2). – P. 377–388.
7. Madejová J., Komádel P. Baseline studies of the clay minerals society source clays: Infrared methods // Clays and Clay Minerals. – 2001. – V. 49 (5). – P. 410–432.
8. Vu Cong Khang, Korovkin M.V., Ananyeva L.G. Identification of clay minerals in reservoir rocks by FTIR spectroscopy // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 43. – 2016. – V 43. – № 111. – article №012004
9. Varkouhi Sh., Cartwright J.A., Tosca N.J. Anomalous compaction due to silica diagenesis – textural and mineralogical evidence from hemipelagic deep-sea sediments of the Japan Sea // Marine Geology. – 2020. – V. 426. – article № 106204.
10. Jones B., Renaut R.W. Microstructural changes accompanying the opal-A to opal-CT transformation: new evidence from the siliceous sinters of Geysir, Haukadalur, Iceland // Sedimentology. – 2007. – V. 54. – № 4. – P. 921–949.
11. Смирнов П.В. Фазовые переходы кремнезема в опал-кристобалитовых породах как фактор качества кремнистого сырья // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 9. – С. 6–15.
12. Ильичева О.М., Наумкина Н.И., Лыгина Т.З. Фазовое и структурное разнообразие осадочных кремнистых пород как основа оценки их качества // Разведка и охрана недр. – 2012. – № 5. – С. 50–53.
13. Weller R., Behl R.J. Physical and mechanical characteristics of the opal-A to opal-CT transition zone: enhanced diatomite permeability from heterogeneous diagenetic embrittlement // Search and Discovery Article. – 2015. – article № 51112.
14. A review of the classification of opal with reference to recent new localities / N.J. Curtis, J.R. Gascooke, M.R. Johnston, A. Pring // Minerals. – 2019. – V. 9 (5). – article № 00299.
15. Elzeai J.M., Odom E., Miles W.J. Distinguishing well-ordered opal-CT and opal-C from high temperature cristobalite by X-ray diffraction // Analytica Chimica Acta. – 1994. – V. 286. – Iss. 1. – P. 107–116.
16. Smith D.K. Opal, cristobalite, and tridymite: noncrystallinity versus crystallinity, nomenclature of the silica minerals and bibliography // Powder Diffraction. – 1997. – V. 13. – P. 2–19.
17. Assessment of quartz materials crystallinity by X-ray diffraction / M.V. Korovkin, L.G. Ananieva, T.S. Nebera, A.A. Antsiferova // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 110. – 2016. – V. 110. – № 1. – article № 012095.
18. Application of Fourier transform infrared spectroscopy to silica diagenesis: the opal-A to opal-CT transformation / B. Rice, H. Freund, W.L. Huang, J.A. Clouse // SEPM Journal of Sedimentary Research. – 1995. – V. 65A. – P. 639–647.
19. Calculation of quartzite crystallinity index by infrared absorption spectrum / O.S. Razva, A.M. Anufrienkova, M.V. Korovkin, L.G. Ananyeva, R.N. Abramova // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2014. – V. 21. – P. 1–4.
20. Плюснина И.И. Исследование структурной неупорядоченности халцедонов методом инфракрасной спектроскопии // ДАН СССР. – 1978. – Т. 240. – № 4. – С. 839–842.
21. Gliozzo E. Variations on the silica theme: classification and provenance from Pliny to current supplies // EMU Notes in Mineralogy. – 2019. – V. 20. – Ch. 2. – P. 13–85.
22. Description for X-ray diffractometer X'Pert PRO // The Analytical X-ray Company. – 2013. – 20 p.
23. Шатова М.Н., Коровкин М.В. Определение минерального состава палеозойских отложений нефтегазоконденсатного месторождения методом инфракрасной спектроскопии // Булатовские чтения. – 2017. – Т. 2 – С. 308–312.
24. Рейхард Л.Е. Фрамбоиды пирита в донных осадках Белого моря // Федоровская сессия. – 2014. – С. 62–64.
25. Guthrie G.D., Dish D.L. Jr., Reynolds R.C. Modeling the X-ray diffraction pattern of opal-CT // American Mineralogist. – 1995. – V. 80. – P. 869–872.
26. Nano-structure of the cristobalite and tridymite stacking sequences in the common purple opal from the Gevrekseydi deposit, Seyitömer-Kütahya, Turkey / M. Hatıpolu, Y. Kibici, G. Yanık, C. Özkul, Y. Yardımcı // Oriental Journal of Chemistry. – 2015. – V. 31. – № 1. – P. 35–49.
27. Коровкин М.В., Ананьева Л.Г., Анциферова А.А. Оценка степени преобразования кварцитов методом инфракрасной спектроскопии // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 320. – № 1. – С. 16–18.
28. Salih Muhammad Awadha, Zaher MundherYaseenb Investigation of silica polymorphs stratified in siliceous geode using FTIR and XRD methods // Materials Chemistry and Physics. – 2019. – V. 228. – P. 45–50.

Поступила: 02.09.2021 г.

Информация об авторах

Ананьева Л.Г., кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет.

Дорошенко А.А., доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник лаборатории подсчета запасов ООО «Газпром ВНИИГАЗ».

Ильенок С.С., кандидат геолого-минералогических наук, ассистент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет.

Карымова Я.О., кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник лаборатории подсчета запасов ООО «Газпром ВНИИГАЗ».

Коровкин М.В., доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, профессор отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет; профессор факультета инновационных технологий, Национальный исследовательский Томский государственный университет.

Максимова Ю.А., старший преподаватель отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет.

Пестерев А.В., кандидат физико-математических наук, научный сотрудник испытательной научно-инновационной лаборатории «Буровые промысловые и тампонажные растворы», Национальный исследовательский Томский политехнический университет.

Процкий О.Н., студент отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет.

Савинова О.В., кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет.

Хрущева М.О., аспирант Национального исследовательского Томского государственного университета.

UDC 553.9:549.02

FEATURES OF MINERAL COMPOSITION OF LOW-PERMEABLE SILICEOUS-CLAY RESERVOIR ROCKS FROM THE BEREZOVSKAYA FORMATION IN THE NORTH OF WESTERN SIBERIA

Lyudmila G. Ananyeva¹,
lga@tpu.ru

Alexandr A. Doroshenko²,
ssdoro.47@mail.ru, a.doroshenko@nedra.gazprom.ru

Sergey S. Ilenok¹,
ilenokss@tpu.ru

Yana O. Karymova²,
ya.karymova@nedra.gazprom.ru

Michail V. Korovkin^{1,3},
mvk@tpu.ru

Yulia A. Maksimova¹,
yam3@tpu.ru

Alexey V. Pesterev¹,
pesterev@tpu.ru

Oleg N. Protsky¹,
onp6@tpu.ru

Olesya V. Savinova¹,
logvinenkoov@tpu.ru

Maria O. Khrushcheva³,
masha2904@mail.ru

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

² «Gazprom VNIIGAZ»,
70, Gertsen street, Tyumen, 625000, Russia.

³ National Research Tomsk State University,
36, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance of the study is caused by the need to develop the oil and gas industry in Western Siberia by identifying unconventional (including low-permeability) reservoirs and assessing their prospects for development.

The aim: to increase the efficiency of gas production by studying the influence of the structure of the mineral substance of rocks on the pore space and identifying unconventional reservoirs.

Objects: Senonian deposits, the commissioning of which is planned to support production in the gas industry.

Methods: optical and electron scanning microscopy, X-ray spectral and X-ray fluorescence analysis, Infrared spectroscopy, X-ray diffraction, analysis of filtration-capacitive properties by the GRI-SMP-200 method.

Results. The features of the mineral composition of low-permeable siliceous-clay reservoir rocks of the Berezovskaya formation in the north of Western Siberia are studied on the example of the Medvezhye deposit. The chemogenic-biogenic origin of these sedimentary rocks is confirmed by the remnants of organic material: sponge spicules, radiolarian shells, mollusks, etc. The rock structure reveals small pores filled with kaolinite and quartz, and individual grains of montmorillonite. Also, there are numerous spherical aggregates of framboid pyrite (FeS₂), which is an autigenic early-diagenetic biomineral and characterizes the reduction zone of diagenesis. It is shown that the «crystallinity index» which characterizes the degree of transformation of the opal-cristobalite-tridymite phase (OCT-phase) of silica can be chosen as a lithological and mineralogical criterion for identifying productive zones in unconventional reservoirs of the Medvezhye deposit. The appearance of the crystalline phase of quartz from unstable chemogenic-biogenic amorphous silica causes the appearance of larger voids, increasing gas saturation and gas permeability.

Key words:

Reservoir rocks, quartz, opal-cristobalite-tridymite phase, polymorphic modifications of SiO₂, opal-cristobalite-tridymite phase of silica, Infrared spectroscopy, X-ray structural analysis.

REFERENCES

- Cherepanov V.V., Menshikov S.N., Varyagov S.A., Oglodkov D.Yu., Bondarev V.L., Gudzenko V.T., Mirotvorskiy M.Yu., Klokov V.P. Problems of assessing the oil and gas potential of deposits of the Lower Berezovskaya sub-formation of the north of Western Siberia. *Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanykh i gazovykh mestorozhdeniy*, 2015, no. 2, pp. 11–26. In Rus.
- Perezhogin A.S., Nezhdanov A.A., Smimov A.S. Prospects for the development of the Senon gas-bearing complex in the north of Western Siberia. *Ekspozitsiya Neft Gaz*, 2016, no. 6, pp. 42–45. In Rus.
- Rodivilov D.B., Kokarev P.N., Mamyashev V.G. Gas saturation of the unconventional reservoir of the Lower Berezovskaya sub-formation of the north of Western Siberia and its relationship with the mineral composition and structure of the void space. *Ekspozitsiya Neft Gaz*, 2018, no. 3 (63), pp. 26–31. In Rus.
- Khabibullin D.Ya., Rybyakov A.N., Sitdikov N.R., Varyagov S.A., Nersesov S.V., Kreknin S.G., Ogibenin V.V., Doroshenko A.A., Karymova Ya.O., Rodivilov D.B. Lithological-mineralogical and commercial-geological criteria for the allocation of productive zones in the Senonian sediments. *Geologiya i razrabotka mestorozhdeniy*, 2018, no. 8, pp. 34–41. In Rus.
- Doroshenko A.A., Karymova Ya.O. Characteristics of the void space of the salica clay of Senon deposits from the north of Western Siberia. *Ekspozitsiya neft gaz*, 2016, no. 6 (69), pp. 23–27. In Rus.
- Madejová J., Kečkéš J., Pálková H., Komadel P. Identification of components in smectite/kaolinite mixtures. *Clay Minerals*, 2002, vol. 37 (2), pp. 377–388.
- Madejová J., Komadel P. Baseline studies of the clay minerals society source clays: Infrared methods. *Clays and Clay Minerals*, 2001, vol. 49 (5), pp. 410–432.
- Vu Cong Khang, Korovkin M.V., Ananyeva L.G. Identification of clay minerals in reservoir rocks by FTIR spectroscopy. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2016, vol 43, no. 111, article no. 012004.
- Varkouhi Sh., Cartwright J.A., Tosca N.J. Anomalous compaction due to silica diagenesis — Textural and mineralogical evidence

- from hemipelagic deep-sea sediments of the Japan Sea. *Marine Geology*, 2020, vol. 426, article no. 106204.
10. Jones B., Renaut R.W. Microstructural changes accompanying the opal-A to opal-CT transformation: new evidence from the siliceous sinters of Geysir, Haukadalur, Iceland. *Sedimentology*, 2007, vol. 54, no. 4, pp. 921–949.
 11. Smirnov P.V. Phase transitions of silica in opal-cristobalite rocks as a quality factor of siliceous raw materials. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 9, pp. 6–15. In Rus.
 12. Ilicheva O.M., Naumkina N.I., Lygina T.Z. Fazovoe i strukturnoe raznoobrazie osadochnykh kremnistykh porod kak osnova otsenki ikh kachestva [Phase and structural diversity of sedimentary siliceous rocks as a basis for assessing their quality]. *Razvedka i okhrana nedr*, 2012, no. 5, pp. 50–53.
 13. Weller R., Behl R.J. Physical and mechanical characteristics of the opal-A to opal-CT transition zone: enhanced diatomite permeability from heterogeneous diagenetic embrittlement. *Search and Discovery Article*, 2015, article no. 51112.
 14. Curtis N.J., Gascooke J.R., Johnston M.R., Pring A. A review of the classification of opal with reference to recent new localities. *Minerals*, 2019, vol. 9 (5), article no. 00299.
 15. Elzeal J.M., Odum E., Miles W.J. Distinguishing well-ordered opal-CT and opal-C from high temperature cristobalite by X-ray diffraction. *Analytica Chimica Acta*, 1994, vol. 286, Iss. 1, pp. 107–116.
 16. Smith D.K. Opal, cristobalite, and tridymite: noncrystallinity versus crystallinity, nomenclature of the silica minerals and bibliography. *Powder Diffraction*, 1997, vol. 13, pp. 2–19.
 17. Korovkin M.V., Ananyeva L.G., Nebera T.S., Antsiferova A.A. Assessment of quartz materials crystallinity by x-ray diffraction. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 110, no. 1, article no. 012095.
 18. Rice B., Freund H., Huang W.L., Clouse J.A. Application of Fourier transform infrared spectroscopy to silica diagenesis: the opal-A to opal-CT transformation. *SEPM Journal of Sedimentary Research*, 1995, vol. 65A, pp. 639–647.
 19. Razva O.S., Anufrienkova A.M., Korovkin M.V., Ananyeva L.G., Abramova R.N. Calculation of quartzite crystallinity index by infrared absorption spectrum. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2014, vol. 21, pp. 1–4.
 20. Plyusnina I.I. Issledovanie strukturnoy neuporyadochennosti khaltsedonov metodom infrakrasnoy spektroskopii [Investigation of the structural disorder of chalcedony by infrared spectroscopy]. *DAN SSSR*, 1978, vol. 240, no. 4, pp. 839–842.
 21. Gliozzo E. Variations on the silica theme: classification and provenance from Pliny to current supplies. *EMU Notes in Mineralogy*, 2019, vol. 20, Ch. 2, pp. 13–85.
 22. Description for X-ray diffractometer X'Pert PRO. *The Analytical X-ray Company*, 2013, pp. 20.
 23. Shatova M.N., Korovkin M.V. Determination of the mineral composition of Paleozoic deposits of an oil and gas condensate field by infrared spectroscopy. *Bulatovskie chteniya*, 2017, pp. 308–312. In Rus.
 24. Reykhard L.E. Framboydy pirita v donnykh osadkakh Belogo moray [Pyrite framboids in the bottom sediments of the White Sea]. *Fedorovskaya sessiya*, 2014, pp. 62–64.
 25. Guthrie G.D., Dish D.L. Jr., Reynolds R.C. Modeling the X-ray diffraction pattern of opal-CT. *American Mineralogist*, 1995, vol. 80, pp. 869–872.
 26. Hatipolu M., Kibici Y., Yanik G., Özkul C., Yardimeci Y. Nanostructure of the cristobalite and tridymite stacking sequences in the common purple opal from the Gevrekseydi deposit, Seyitömer-Kütahya, Turkey. *Oriental Journal of Chemistry*, 2015, vol. 31, no. 1, pp. 35–49.
 27. Korovkin M.V., Ananyeva L.G., Anciferova A.A. Estimation of the degree of transformation of quartzites by infrared spectrometry. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2012, vol. 320, no. 1, pp. 16–18. In Rus.
 28. Salih Muhammad Awadha, Zaher Mundher Yaseenb. Investigation of silica polymorphs stratified in siliceous geode using FTIR and XRD methods. *Materials Chemistry and Physics*, 2019, vol. 228, pp. 45–50.

Received: 2 September 2021.

Information about the authors

Lyudmila G. Ananyeva, Cand Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Alexandr A. Doroshenko, Dr. Sc., chief researcher, «Gazprom VNIIGAZ».

Sergey S. Ilenok, Cand Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Yana O. Karymova, Cand Sc., researcher, «Gazprom VNIIGAZ».

Michail V. Korovkin, Dr. Sc., professor, senior researcher, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia; professor, National Research Tomsk State University.

Yulia A. Maksimova, senior lecturer, National Research Tomsk Polytechnic University.

Alexey V. Pesterev, Cand. Sc., researcher, National Research Tomsk Polytechnic University.

Oleg N. Protsky, student, National Research Tomsk Polytechnic University.

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

Maria O. Khrushcheva, postgraduate student, National Research Tomsk State University.

УДК 621.311.238; 621.311.22

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СХЕМЫ ГАЗОПАРОВОЙ УСТАНОВКИ С ПОМОЩЬЮ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Галашов Николай Никитович¹,
gal@tpu.ru

Туболев Александр Анатольевич¹,
Tubolev@tpu.ru

Минор Александр Александрович¹,
aam29061994@gmail.com

Баннова Альбина Ильгизовна¹,
gabullina.albina@list.ru

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

Актуальность темы обусловлена необходимостью проведения комплекса научных исследований по разработке и оптимизации тепловых схем и методик расчета газопаровых установок. Газопаровые установки – это перспективное направление повышения эффективности энергетических установок на базе газотурбинных двигателей с экологическим и энергетическим впрыском водяного пара в камеру сгорания.

Цель: совершенствование методики расчета газотурбинных установок с впрыском пара для исследования вопросов повышения эффективности выработки электрической и тепловой энергии с целью сокращения потребления природного газа, а также совершенствование тепловых схем и оптимизация параметров газопаровых установок.

Объекты: комбинированные газопаровые установки на базе газотурбинных установок с впрыском пара в камеру сгорания.

Методы: численные методы исследования путем математического моделирования систем и элементов газопаровых установок на основе материальных и энергетических балансов.

Результаты. Разработана математическая модель расчета энергетических характеристик газопаровой установки с учетом изменения входных параметров в широком диапазоне. Проведен анализ влияния температуры газов на выходе камеры сгорания и степени сжатия в компрессоре на основные энергетические характеристики газотурбинной установки без впрыска пара и с впрыском в камеру сгорания. Показано, что впрыск пара может до 9 % повысить коэффициент полезного действия газотурбинной установки, при этом расход впрыскиваемого пара существенно снижается при росте температуры газов на выходе камеры сгорания и степени сжатия в компрессоре. Также впрыск пара существенно снижает в камере сгорания коэффициент избытка воздуха и температуру уходящих из котла-утилизатора газов. При этом примерно в 1,5...2,0 раза увеличивается удельная мощность выработки электроэнергии по сравнению с газотурбинной установкой без впрыска. Установлено, что необходимость обеспечения температурных напоров в котле-утилизаторе существенно ограничивает диапазон режимов работы газопаровой установки по степени сжатия в компрессоре.

Ключевые слова:

Газотурбинная установка, газопаровая установка, энергетический впрыск пара, экологический впрыск пара, котел-утилизатор, продукты сгорания, уходящие газы.

Введение

Производство тепловой и электрической энергии представляет собой неотъемлемую часть топливно-энергетического комплекса (ТЭК) России, стабильность которого является основой благосостояния общества и социально-экономического развития страны. На сегодняшний день в энергетической отрасли России есть ряд внутренних проблем и внешних вызовов. В качестве отрицательных моментов, определяющих наличие трудностей в развитии энергетики страны, выделяются низкие темпы экономического роста, что влечет за собой снижение прироста спроса на топливо, энергию и, как следствие, спад объема инвестиций. Недостаток денежных вливаний в развитие отрасли вызывает зависимость от зарубежных материалов и оборудования.

В Энергетической стратегии России до 2035 года [1] определено, что основой энергетики останутся си-

стемы централизованного традиционного энерго-снабжения (ТЭС, ГЭС, АЭС) в совокупности с электростанциями, работающими на энергии ветра и солнца. Направление развития отрасли, заданное в Стратегии, определяет необходимость разработки и внедрения энергосберегающих и высокоэффективных технологических решений с акцентом на снижение вредных выбросов. Одним из таких решений является создание отечественных высокоэффективных парогазовых установок (ПГУ) на основе газотурбинных установок (ГТУ) большой мощности.

В данной работе рассматривается перспективное направление повышения эффективности ПГУ. В основе исследуемой технологии лежит организация впрыска водяного пара в камеру сгорания ГТУ. Эти ГТУ принято называть газопаровые установки (ГПУ). Оценка эффективности установок такого типа требует проведения комплекса научных исследований по разработке и оптимизации схем и методик расчета.

Повышение удельной мощности простой ГТУ возможно за счет снижения затрат мощности на сжатие воздуха в компрессоре путем снижения в камере сгорания коэффициента избытка воздуха ($\alpha_{кс}$). Минимальное значение $\alpha_{кс}$ ограничено предельными значениями рабочих температур конструкционных материалов. Отсюда следует, что прирост удельной мощности простой газотурбинной установки возможен путем повышения температуры газов перед турбиной (разработка и использование жаростойких сталей и сплавов) и ввода в цикл дополнительного рабочего тела (водяной пар). Помимо увеличения мощности, впрыск пара в камеру сгорания позволяет снизить температуру в ядре горения и интенсивность образования оксидов азота [2–6].

Высокие рабочие показатели газотурбинных установок с впрыском пара способствуют их активному внедрению в промышленное производство во всем мире. Оптимизированный цикл газотурбинной установки с впрыском водяного пара (цикл Чжена) запатентован в 1981 г. [7]. В США на рубеже 1980-х гг. были проведены испытания системы впрыска пара (STIG – Steam Injected Gas Turbine) в газогенератор фирмы General Electric. Через некоторое время ГТУ полного цикла STIG была введена в эксплуатацию [8, 9]. Исследованиями циклов газотурбинных установок с впрыском пара в нашей стране занимались Л.В. Арсеньев, В.А. Зысин, А.И. Андрущенко, В.Г. Тырышкин, О.Н. Фаворский и др. В России разработан ряд установок аналогичных STIG. Научно-производственным объединением «Машпроект» разработана комбинированная газопаротурбинная установка [10], в которой теплота уходящих газов используется для генерации водяного пара на впрыск. Отличительной особенностью этой установки является улавливание воды из потока парогазовой смеси.

В работе [11] предлагается условное разделение газового и парового циклов, что значительно упрощает расчеты и анализ схемы. Принимается, что смесь пара и продуктов сгорания является однородной и ее свойства определяются как для идеального газа.

Вопросы охлаждения лопаток на сегодняшний день являются актуальными и активно исследуются учеными мира [12, 13]. В работах [14–16] дается оценка возможности повышения эффективности парогазовых установок за счет более высоких температур на входе в газовую турбину при организации парового охлаждения лопаток.

Впрыск пара в ГТУ позволяет получить высокие технико-экономические показатели: повысить мощность газовой турбины, разгрузить воздушный компрессор в результате снижения коэффициента избытка воздуха в камере сгорания, понизить температуру сгорания и продлить срок службы камеры сгорания и турбины, а также уменьшить выбросы вредных веществ [2, 3, 17–22].

Основным недостатком ГТУ с впрыском пара является необходимость химической подготовки воды, которая впоследствии теряется из цикла с уходящими газами. Поэтому важным направлением совершенствования цикла ГТУ является возможность конденсации водяных паров из уходящих газов и полезного использования их массы и теплоты.

Одним из неисследованных в настоящее время вопросов является зависимость расхода впрыскиваемого пара от параметров цикла.

Проведенный анализ показывает, что исследования в области повышения эффективности работы ГТУ являются актуальными. В качестве основных направлений можно выделить совершенствование схем и методик расчета циклов газопаровых установок, поиск технологических решений по повышению эффективности утилизации теплоты уходящих газов и снижению потерь воды как рабочего тела.

Схема и цикл газопаровой установки

Схема и цикл ГТУ, для которых составлена математическая модель, приведены на рис. 1, 2.

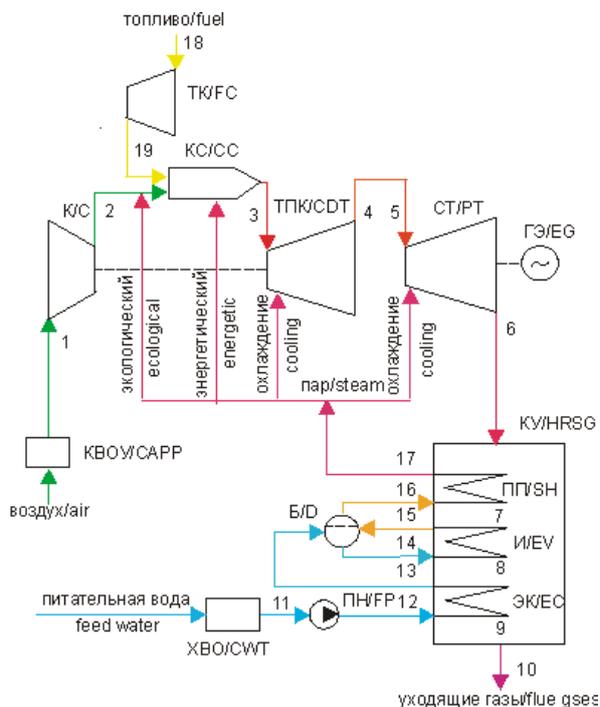


Рис. 1. Схема газопаровой установки: КВОУ – комплексная воздухоочистная установка; К – компрессор; КС – камера сгорания; ТК – топливный компрессор; ТПК – турбина привода компрессора; СТ – силовая турбина; КУ – котел-утилизатор; ПП – пароперегреватель; И – испаритель; Б – барабан; ЭК – экономайзер; ГЭ – генератор электрического тока; ХВО – химводоочистка; ПН – питательный насос

Fig. 1. Cycle diagram of combined-cycle plants: CAPP – complete air purification plant; C – compressor; CC – combustion chamber; FC – fuel compressor; CDT – compressor drive turbine; PT – power turbine; HRSBG – heat recovery steam generator; SH – superheater; EV – evaporator; D – drum; EC – economizer; EG – electric generator; CWT – chemical water treatment; FP – feed pump

Работа ГТУ организована следующим образом. В комплексной воздухоочистной установке (КВОУ) атмосферный воздух очищается от пыли, после чего в адиабатном процессе 1–2 сжимается в воздушном компрессоре (К) до давления в камере сгорания (КС).

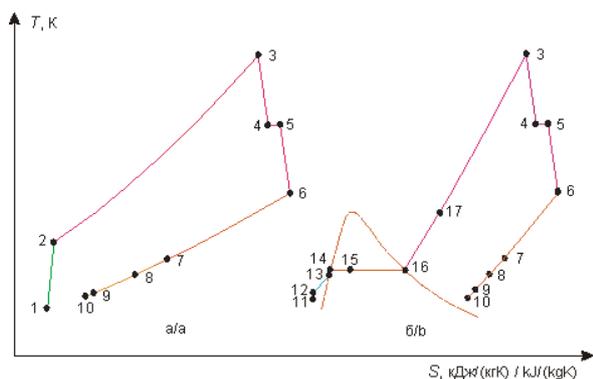


Рис. 2. T - S диаграмма цикла газопаровой установки: а) цикл сухих продуктов сгорания; б) цикл воды и водяного пара; номера точек на линиях циклов соответствуют номерам на схеме рис. 1

Fig. 2. T - S -diagram of gas steam plant cycles: а) cycle of gas steam plant; б) cycle of water and steam; the numbers of points on the lines of the cycles correspond to the numbers on the diagram in Fig. 1

На входе в КС воздух смешивается с паром экологического впрыска. Также в камеру сгорания топливным компрессором (ТК) в адиабатном процессе сжатия 18–19 подается природный газ, а из котла-утилизатора (КУ) пар энергетического впрыска. При горении топлива в КС в изобарном процессе 2–3 подводится теплота, при этом продукты сгорания топлива нагреваются до высокой температуры T_3 перед турбиной привода компрессора (ТПК). В ТПК в адиабатном процессе 3–4 продукты сгорания совершают работу, вращая ротор компрессора, и с температурой T_4 через выхлопной патрубок поступают в состоянии 5 в силовую турбину (СТ), в которой в адиабатном процессе 5–6 расширяются и совершают работу, вращая ротор электрогенератора (ЭГ). Из СТ продукты сгорания с температурой T_6 поступают в котел-утилизатор, в котором проходят через пароперегреватель (ПП), испаритель (И), экономайзер (ЭК), после чего с температурой уходящих газов $T_{yx}=T_{10}$ отводятся через дымовую трубу в атмосферу. В результате передачи теплоты в КУ температура продуктов сгорания в изобарном процессе снижается до состояний 7 за ПП, 8 за И и 9 за ЭК. Питательная вода после очистки в ХВО питательным насосом (ПН) в адиабатном процессе 11–12 сжимается до давления $P_{пн.вых}$ и в изобарном процессе нагревается в экономайзере (ЭК) до состояния 13 с недогревом до состояния насыщения на 4–6 °С, после чего поступают в барабан (Б). В испарительном контуре (И) кипящая вода от состояния 14 нагревается до состояния 15 со степенью сухости 20 % и поступает в Б, где из воды выходит сухой насыщенный пар в состоянии 16, после чего перегревается в пароперегревателе (ПП) до состояния 17 и идет на экологический и энергетический впрыски и охлаждение турбины привода компрессора (ТПК) и силовой турбины (СТ).

Для нормальной передачи теплоты между газами и водой в поверхностях нагрева КУ должны быть обеспечены разности температур: Δt_{6-17} не ниже 30 °С; Δt_{8-14} не ниже 10 °С; Δt_{9-12} не ниже 20 °С. На рис. 3

показана T - Q диаграмма теплообмена в котле-утилизаторе.

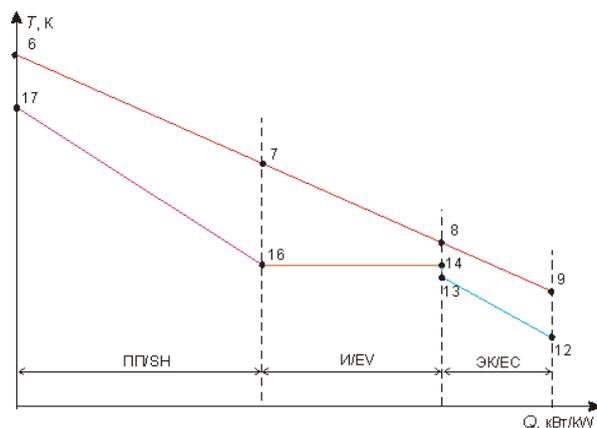


Рис. 3. T - Q диаграмма теплообмена в котле-утилизаторе: ПП – пароперегреватель; И – испаритель; ЭК – экономайзер. Номера точек на линиях соответствуют номерам на рис. 1, 2

Fig. 3. T - Q -diagram of heat transfer in the waste heat boiler: SH – superheater; EV – evaporator; EC – economizer. The numbers of points on the lines correspond to the numbers in Fig. 1, 2

Математическая модель расчета тепловой схемы газопаровой установки

В результате расчета необходимо определить параметры рабочего тела в характерных точках цикла, расходы воздуха, топлива и пара на впрыски, мощности компрессора и турбины, коэффициент избытка воздуха в камере сгорания и КПД цикла.

При разработке математической модели использовались уравнения материального и энергетического балансов.

Параметры рабочих тел задаются и определяются: давление (P), МПа; температура (t), °С; удельная энтальпия (h), кДж/кг; удельная энтропия (s), кДж/(кг·К). В алгоритме расчета также используются: удельные расходы на кг топлива (g), кг/кг, и абсолютные (G), кг/с; удельные расходы пара на кг топлива (d), кг/кг, и абсолютные (D), кг/с; расход топлива (B), кг/с; удельные мощности на кг топлива (n) и абсолютные (N), МВт; относительные потери давления (δP).

Рабочие тела (воздух, топливо и продукты сгорания) являются смесью различных веществ, при этом для упрощения расчетов приняты следующие допущения:

- предполагается, что воздух, топливо и продукты сгорания являются идеальными газовыми смесями;
- продукты сгорания состоят из смеси воздуха, диоксида углерода и водяного пара;
- в качестве топлива используется природный газ, смесь составляющих его компонентов задается в %, а потом переводится в моли;
- оборудование работает в стационарном режиме.

Параметры воздуха, топлива, продуктов сгорания, воды и водяного пара рассчитываются по функциям, определяемым в программе «REFPROP 8» [23], разработанной в NIST (National Institute of Standards and Technology), США. Далее для расчета термодинамических параметров с помощью «REFPROP 8» ис-

пользуется функции $Z=\text{parametr}$ («М»; InpCode; Units; X; Y), где Z – искомый параметр, parameter – имя параметра на английском языке (Temperature, Pressure, и т. д.), в скобках указываются: «М» – спецификация мольного состава смеси веществ или имя конкретного вещества на английском языке, например, water, nitrogen и т. д; InpCode – в скобках указываются типы входных параметров X , Y , по которым определяется искомый, например «ТР», «РН» и т. д., для расчета параметров в состоянии насыщения к входному параметру добавляется приставка LIQ (насыщенная жидкость) или VAP (сухой насыщенный пар), например, «TLIQ», «PVAP», Units – показывает, в какой системе определяются параметры, например, «SI» – в системе СИ или «SI WITH C» – все параметры в системе СИ, а температура в °C; X, Y – числовые значения параметров. Спецификация смеси газов «М» составляется, например, для парогазовой смеси как СЦЕПИТЬ ("nitrogen";";x1";";"carbon dioxide";";x2";";"oxygen";";x3";";"argon";";x4";";"water";";x5), где x_1, x_2, \dots, x_5 – мольные доли составляющих смесь веществ. Далее при описании алгоритма используются либо спецификации смесей газов: «М_в» – воздух; «М_т» – топливо; «М_{пс}» – смесь продуктов сгорания без дополнительного пара; «М_{см}» – смесь продуктов сгорания с дополнительным паром, либо названия отдельных газов: «nitrogen» – азот; «carbon dioxide» – диоксид углерода; «oxygen» – кислород; «argon» – аргон; «water» – вода и водяной пар. В программе «REFPROP 8» имеются функции для 83 веществ и их смесей.

Подстрочные индексы у параметров обозначают: числа – вход и выход для соответствующих элементов (рис. 1, 2); «к» – воздушный компрессор; «квоу» – комплексное воздухоочистное устройство; «тк» – топливный компрессор; «ку» – котел-утилизатор; «кс» – камера сгорания; «тпк» – турбина привода компрессора; «ст» – силовая турбина; «пн» – питательный насос; «в» – воздух; «т» – топливо; «пс» – смесь продуктов сгорания и добавленного пара; «нв» – наружный воздух; «изб» – избыточный; «п» – пар; «охл» – пар на охлаждение; «охл1» – пар на охлаждение в ТПК; «охл2» – пар на охлаждение в СТ; «см1» – смесь продуктов сгорания и охлаждающего пара в ТПК; «см2» – смесь продуктов сгорания и охлаждающего пара в СТ; «с» – изэнтропийный процесс; «нр» – низшая теплота сгорания топлива; «м» – механический; «эг» – электрогенератор; «эп» – электропривод.

Упрощенная блок-схема расчета ГПУ приведена на рис. 4.

Исходные данные:

- 1) параметры наружного воздуха: $P_{нв}$, $t_{нв}$, относительная влажность $\phi_{нв}$;
- 2) состав природного газа: CH_4 , C_2H_6 , C_3H_8 и т. д.;
- 3) параметры природного газа: P_t , t_t ;
- 4) относительные потери давления: $\delta P_{\text{квоу}}$, $\delta P_{\text{пн-ку}}$, $\delta P_{\text{ку}}$, $\delta P_{\text{ку.пс}}$, $\delta P_{\text{к.вых}}$, $\delta P_{\text{кс}}$, $\delta P_{\text{тк-кс}}$, $\delta P_{\text{тпк-ст}}$, $\delta P_{\text{ку-впр}}$;
- 5) КПД: $\eta_{\text{к}}$, $\eta_{\text{тк}}$ – воздушного и топливного компрессора; $\eta_{\text{м.к}}$, $\eta_{\text{м.тпк}}$ – механический компрессора и ТПК; $\eta_{\text{тпк}}$, $\eta_{\text{ст}}$ – внутренний относительный ТПК и СТ; $\eta_{\text{эг}}$, $\eta_{\text{эп}}$ – электрогенератора и электропривода; $\eta_{\text{ск}}$ – камеры сгорания;

- 6) степень сжатия компрессора $\varepsilon_{\text{к}}$;
- 7) температура продуктов сгорания на выходе КС, t_3 ;
- 8) давление $P_{\text{пн}}$ и температура $t_{\text{пн}}$ на входе ПН;
- 9) относительный расход экологического пара на впрыск $d_{\text{эк}}$;
- 10) относительный расход пара на охлаждение $\delta_{\text{охл}}$ и его доля на ТПК $K_{\text{охл}}$;
- 11) разности температур: $\Delta t_{6-17}=30$, $\Delta t_{8-14}=10$, $\Delta t_{14-13}=5$, $\Delta t_{9-12}=20$;
- 12) расход воздуха на входе в компрессор $G_{\text{к}}$.

Расчет параметров воздуха, топлива и продуктов сгорания

Расчет параметров воздуха, топлива и продуктов сгорания производится по формулам [24]. В результате расчета по заданным исходным данным определяются низшая теплота сгорания $Q_{\text{пр}}$, массы и объемы воздуха и продуктов сгорания топлива, в том числе удельный расход продуктов сгорания на кг топлива $g_{\text{пс}}$.

Расчет параметров воздуха в процессе сжатия в воздушном компрессоре

Последовательно определяются:

- $P_1 = P_{\text{нв}}(1 - \delta P_{\text{квоу}})$;
- $P_2 = \varepsilon_{\text{к}} \cdot P_1(1 - \delta P_{\text{к.вых}})$;
- $t_1 = t_{\text{нв}}$;
- $s_1 = \text{Entropy}(\text{"M}_в\text{"}; \text{"PT"}; \text{"SI WITH C"}; P_1; t_1)$;
- $h_1 = \text{Enthalpy}(\text{"M}_в\text{"}; \text{"PT"}; \text{"SI WITH C"}; P_1; t_1)$;
- $h_{2s} = \text{Enthalpy}(\text{"M}_в\text{"}; \text{"PS"}; \text{"SI WITH C"}; P_2; s_1)$;
- $h_2 = h_1 + (h_{2s} - h_1)/\eta_{\text{к}}$;
- $t_2 = \text{Temperature}(\text{"M}_в\text{"}; \text{"PH"}; \text{"SI WITH C"}; P_2; h_2)$;
- $P_{\text{кс}} = P_2(1 - \delta P_{\text{кс}})$.

Расчет параметров топлива в процессе сжатия в топливном компрессоре

Последовательно определяются:

- $P_{18} = P_t$;
- $P_{19} = 1,05 P_{\text{кс}}$;
- $t_{18} = t_t$;
- $s_{18} = \text{Entropy}(\text{"M}_т\text{"}; \text{"PT"}; \text{"SI WITH C"}; P_{18}; t_{18})$;
- $h_1 = \text{Enthalpy}(\text{"M}_т\text{"}; \text{"PT"}; \text{"SI WITH C"}; P_{18}; t_{18})$;
- $h_{19s} = \text{Enthalpy}(\text{"M}_т\text{"}; \text{"PT"}; \text{"SI WITH C"}; P_{19}; s_{18})$;
- $h_{19} = h_{18} + (h_{19s} - h_{18})/\eta_{\text{тк}}$;
- $t_{19} = \text{Temperature}(\text{"M}_т\text{"}; \text{"PH"}; \text{"SI WITH C"}; P_{19}; h_{19})$.

Расчет параметров пароводяного тракта в котле-утилизаторе

Последовательно определяются:

- $P_{11} = P_{\text{пн}}$;
- $t_{11} = t_{\text{пн}}$;
- $s_{11} = \text{Entropy}(\text{"water"}; \text{"PT"}; \text{"SI WITH C"}; P_{11}; t_{11})$;
- $h_{11} = \text{Enthalpy}(\text{"water"}; \text{"PT"}; \text{"SI WITH C"}; P_{11}; t_{11})$;
- $P_{12} = P_{\text{кс}}(1 + \delta P_{\text{ку-впр}} + \delta P_{\text{ку}})$;
- $h_{12s} = \text{Enthalpy}(\text{"water"}; \text{"PS"}; \text{"SI WITH C"}; P_{12}; s_{11})$;
- $h_{12} = h_{11} + (h_{12s} - h_{11})/\eta_{\text{пн}}$;
- $t_{12} = \text{Temperature}(\text{"water"}; \text{"PH"}; \text{"SI WITH C"}; P_{12}; h_{12})$;
- $P_{17} = P_{\text{кс}}(1 + \delta P_{\text{ку-впр}})$;
- $P_{14} = (P_{11} + P_{17})/2$;
- $t_{14} = \text{Temperature}(\text{"water"}; \text{"PLIQ"}; \text{"SI WITH C"}; P_{14})$;
- $h_{14} = \text{Enthalpy}(\text{"water"}; \text{"PLIQ"}; \text{"SI WITH C"}; P_{14})$.

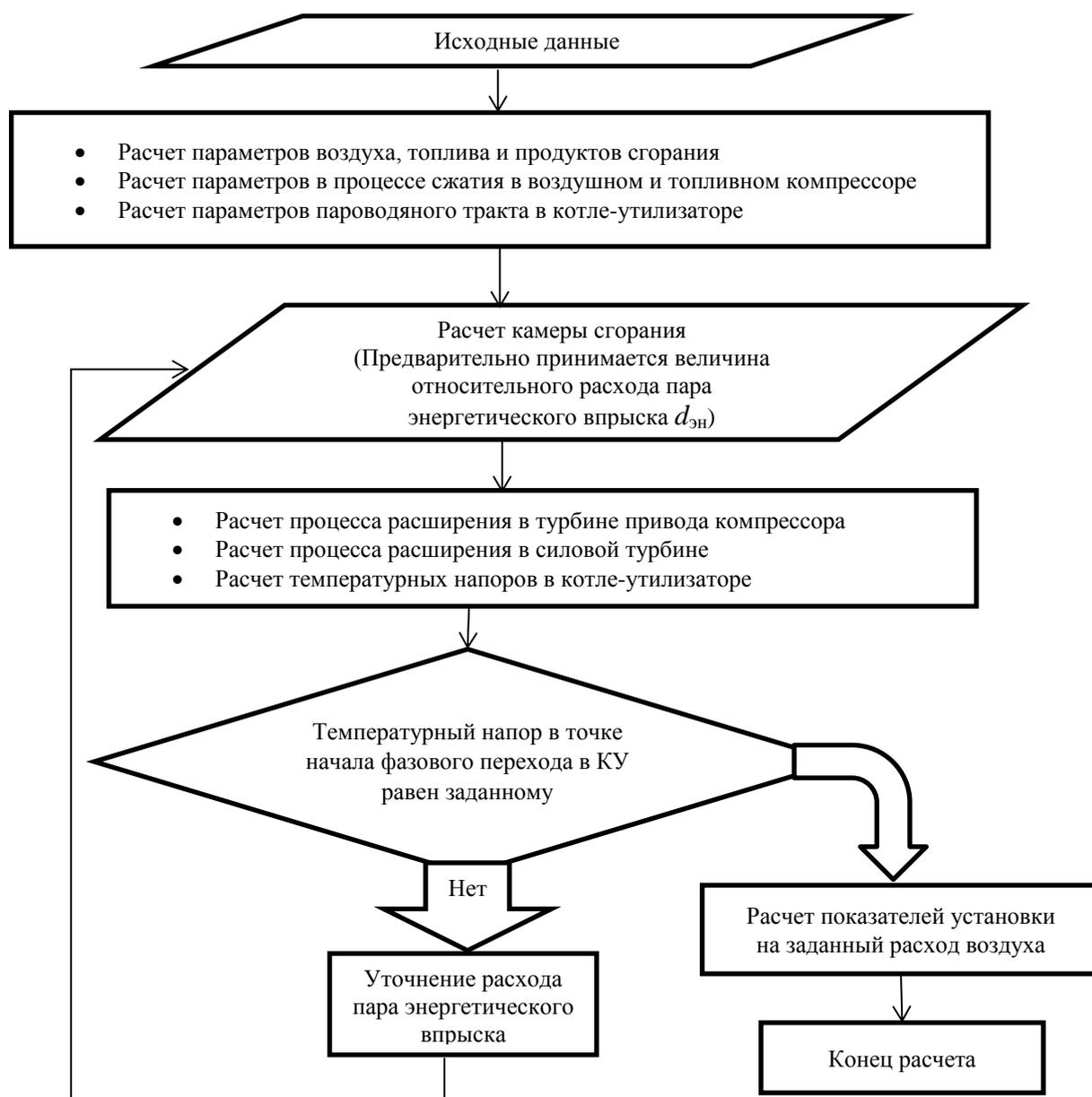


Рис. 4. Блок-схема расчета газопаровой установки
 Fig. 4. Block diagram of the calculation of a gas-steam plant

Расчет камеры сгорания

Предварительно принимается $d_{эп}$, который затем уточняется в итерационном процессе для получения допустимых температурных напоров в котле-утилизаторе.

Далее последовательно определяются:

$$t_{17} = t_6 - \Delta t_{6-17}; \quad (1)$$

$$h_{17} = \text{Enthalpy}(\text{"water"; "PT"; "SI WITH C"; } P_{17}; t_{17});$$

$$h_{3п} = \text{Enthalpy}(\text{"water"; "PT"; "SI WITH C"; } P_{кc}; t_3);$$

$$h_{3в} = \text{Enthalpy}(\text{"M}_в\text{"; "PT"; "SI WITH C"; } P_{кc}; t_3);$$

$$h_{3пс} = \text{Enthalpy}(\text{"M}_{пс}\text{"; "PT"; "SI WITH C"; } P_{кc}; t_3).$$

Удельная энтальпия воздуха, водяного пара, продуктов сгорания и топлива на входе и выходе из камеры сгорания приводятся к температуре определения низшей теплоты сгорания топлива 25 °С.

Расход избыточного воздуха определяется по формуле

$$g_{изб} = (Q_{кc.п} + Q_{кc.л.0} + Q_{пр} \cdot \eta_{кc} + h_{19} - g_{пс} \cdot h_{3пс}) / (h_{3пс} - h_2),$$

где $Q_{кc.п} = (d_{эп} + d_{эк})(h_{3п} - h_{17})$; $Q_{кc.л.0} = h_{3пс}(g_{пс} - 1)$.

Коэффициент избытка воздуха в камере сгорания $\alpha_{кc} = (L_0 + g_{изб}) / L_0$, где L_0 – удельный массовый расход воздуха для сгорания кг топлива при нормальных условиях, определяется по [24].

Проверка энергетического баланса камеры сгорания:

- теплота потоков, входящих в камеру сгорания,

$$q_2 = (g_{пс} - 1 + g_{изб})h_2 + (d_{эп} + d_{эк})h_{17} + h_{19} + Q_{пр}\eta_{кc};$$

- теплота потоков, выходящих из камеры сгорания,

$$q_3 = (d_{эп} + d_{эк})h_{3п} + g_{пс} \cdot h_{3пс} + g_{изб} \cdot h_{3в}.$$

Погрешность определения параметров входных и выходных потоков камеры сгорания $\delta = 100(q_2 - q_3)/q_2, \%$.

$$g_b = g_{изб} + g_{пс} - 1;$$

$$g_{зк} = g_{изб} + g_{пс} + d_{эп} + d_{эж}.$$

Расчет процесса расширения в турбине привода компрессора

Последовательно определяются:

- $d_{охл1} = \delta_{охл} \cdot g_b;$
- $d_{охл1} = K_{охл} \cdot d_{охл};$
- $h_{3см1} = (g_{зк} \cdot h_{3пс} + d_{охл1} \cdot h_{17}) / (g_{зк} + d_{охл1});$
- $t_{3см1} = \text{Temperature}("M_{см1}"; "PH"; "SI WITH C"; P_{кс}; h_{3см1});$
- $g_{3см1} = g_{зк} + d_{охл1};$
- $s_{3см1} = \text{Entropy}("M_{см1}"; "PT"; "SI WITH C"; P_{кс}; t_{3см1});$
- $n_k = g_b \cdot \Delta h_k / \eta_{м.к};$
- $\Delta h_{тнк} = n_k / (g_{3см1} \cdot \eta_{м.тнк});$
- $h_4 = h_{3см1} - \Delta h_{тнк};$
- $\Delta h_{тнк.с} = \Delta h_{тнк} / \eta_{тнк};$
- $h_{4с} = h_3 - \Delta h_{тнк.с};$
- $t_{4с} = \text{Temperature}("M_{см1}"; "HS"; "SI WITH C"; h_{4с}; s_{3см1});$
- $P_4 = \text{Pressure}("M_{см1}"; "TS"; "SI WITH C"; t_{4с}; s_{3см1});$
- $t_4 = \text{Temperature}("M_{см1}"; "PH"; "SI WITH C"; P_4; h_4);$
- $P_5 = P_4(1 - \delta P_{тнк-ст}).$

Расчет процесса расширения в силовой турбине

Последовательно определяются:

- $d_{охл2} = d_{охл}(1 - K_{охл});$
- $h_{5охл2} = (g_{3см1} \cdot h_4 + d_{охл2} \cdot h_{17}) / (g_{3см1} + d_{охл2});$
- $t_{5см2} = \text{Temperature}("M_{см2}"; "PH"; "SI WITH C"; P_5; h_{5охл2});$
- $g_{5см2} = g_{3см1} + d_{охл2};$
- $s_{5см2} = \text{Entropy}("M_{см2}"; "PT"; "SI WITH C"; P_5; t_{5см2});$
- $P_6 = P_{нв}(1 + \delta P_{ку.лс});$
- $h_{6с} = \text{Enthalpy}("M_{см2}"; "PS"; "SI WITH C"; P_6; s_{5см2});$
- $h_6 = h_{5охл2} - (h_{5охл2} - h_{6с}) \eta_{ст};$
- $t_6 = \text{Temperature}("M_{см2}"; "PH"; "SI WITH C"; P_6; h_6);$
- $n_{ст} = g_{5см2}(h_{5охл2} - h_6).$

Расчет температурных напоров в котле-утилизаторе

Последовательно определяются:

- $\Delta t_{6-17} = t_6 - t_{17};$
- $t_{16} = t_{14};$
- $h_{16} = \text{Enthalpy}("water"; "TVAP"; "SI WITH C"; t_{16});$
- $t_{13} = t_{14} - \Delta t_{14-13};$
- $h_{13} = \text{Enthalpy}("M_{см2}"; "PH"; "SI WITH C"; P_6; h_{13});$
- из теплового баланса ПП $g_{5см2}(h_6 - h_7) = (d_{эп} + d_{эж} + d_{охл})(h_{17} - h_{16})$ находится $h_7;$
- из теплового баланса И $g_{5см2}(h_7 - h_8) = (d_{эп} + d_{эж} + d_{охл})(h_{16} - h_{13})$ находится $h_8;$
- из теплового баланса ЭЖ: $g_{5см2}(h_8 - h_9) = (d_{эп} + d_{эж} + d_{охл})(h_{13} + h_{12})$ находится $h_9;$
- $t_8 = \text{Temperature}("M_{см2}"; "PH"; "SI WITH C"; P_6; h_8);$
- $\Delta t_{8-14} = t_8 - t_{14};$
- $t_9 = \text{Temperature}("M_{см2}"; "PH"; "SI WITH C"; P_{нв}; h_9);$
- $\Delta t_{9-12} = t_9 - t_{12}.$

Производится проверка полученных температурных напоров с допустимыми: $\Delta t_{6-17} > 29, \Delta t_{8-14} > 9, \Delta t_{9-12} > 19,$ если это условие не выполняется, то изменяют $d_{эп}$ и, начиная с уравнения (1) в камере сгорания, расчет повторяется.

Расчет показателей установки на заданный расход воздуха G_k

Последовательно определяются:

- $B_T = G_k / g_b;$
- $D_{эп} = d_{эп} \cdot B_T;$
- $D_{эж} = d_{эж} \cdot B_T;$
- $D_{охл} = d_{охл} \cdot B_T;$
- $N_{ст} = (D_{эп} + D_{эж} + D_{охл} + B_T + G_k) \Delta h_{ст} \cdot \eta_{м.ст};$
- $N_{пн} = (D_{эп} + D_{эж} + D_{охл}) \Delta h_{пн} / \eta_{м.пн};$
- $N_k = G_k \cdot \Delta h_k / \eta_{м.к};$
- $N_{тк} = B_T \cdot \Delta h_{тк} / \eta_{м.тнк};$
- $N_{пол} = N_{ст} \cdot \eta_{эп} - N_{пн} / \eta_{эп} - N_{тк} / \eta_{эп};$
- $\eta_{ГПУ} = 100 N_{пол} / (B_T \cdot Q_{нр}), \%$

Описанный выше алгоритм реализован в виде программы в пакете электронных таблиц EXCEL. Отдельные блоки алгоритма написаны на языке программирования VB (Visual Basic), встроенном в EXCEL.

Результаты расчета и их анализ

Для расчета были введены следующие исходные данные:

- 1) параметры наружного воздуха: $P_{нв} = 0,1013$ МПа, $t_{нв} = 15$ °С; $\varphi_{нв} = 0,6;$
- 2) состав природного газа: $CH_4 = 100$ %;
- 3) параметры природного газа: $P_r = 0,2$ МПа; $t_r = 5$ °С;
- 4) относительные потери давления: $\delta P_{квоу} = 0,01, \delta P_{пн-ку} = \delta P_{ку} - \delta P_{ку.лс} = \delta P_{к.вых} = \delta P_{к-с} = \delta P_{тк-к-с} = \delta P_{тнк-ст} = 0,03, \delta P_{ку-охл} = 0,05;$
- 5) КПД: $\eta_k = 0,86, \eta_{тк} = 0,9, \eta_{м.к} = 0,995, \eta_{к-с} = 0,995, \eta_{м.тнк} = 0,995, \eta_{тнк} = 0,9, \eta_{ст} = 0,93, \eta_{эп} = 0,982, \eta_{эп} = 0,99, \eta_{пн} = 0,8;$
- 6) степень сжатия компрессора: $2 \dots 80;$
- 7) температура продуктов сгорания на выходе КС: $700 \dots 1700$ °С;
- 8) давление и температура питательной воды: $P_{пн} = 0,1$ МПа, $t_{пн} = 60$ °С;
- 9) расход экологического пара на впрыск $d_{эж} = 2$ кг/кг;
- 10) расход пара на охлаждение: $\delta_{охл} = 0,05, K_{охл} = 0,7;$
- 11) расход воздуха на входе в компрессор $G_k = 1$ кг/с.

С помощью программы проведены расчеты, результаты которых представлены на рис. 5–10. Расчеты проводились для двух вариантов: а) расход пара на впрыск принят 0, т. е. получили показатели ГТУ без впрыска; б) с заданными расходами пара на впрыск, при этом получили показатели ГПУ с впрыском пара.

На рис. 5 приведены зависимости коэффициента полезного действия нетто от степени сжатия в компрессоре и температуры газов на выходе КС. Расчеты проведены для диапазона температур на выходе КС $700 \dots 1700$ °С. Поскольку до температуры 1000 °С имеет низкий КПД и точки для ГПУ с впрыском пара сливаются так, что их трудно идентифицировать, для наглядности представления полученных результатов на графики вынесены результаты с температурой за КС от 1000 °С.

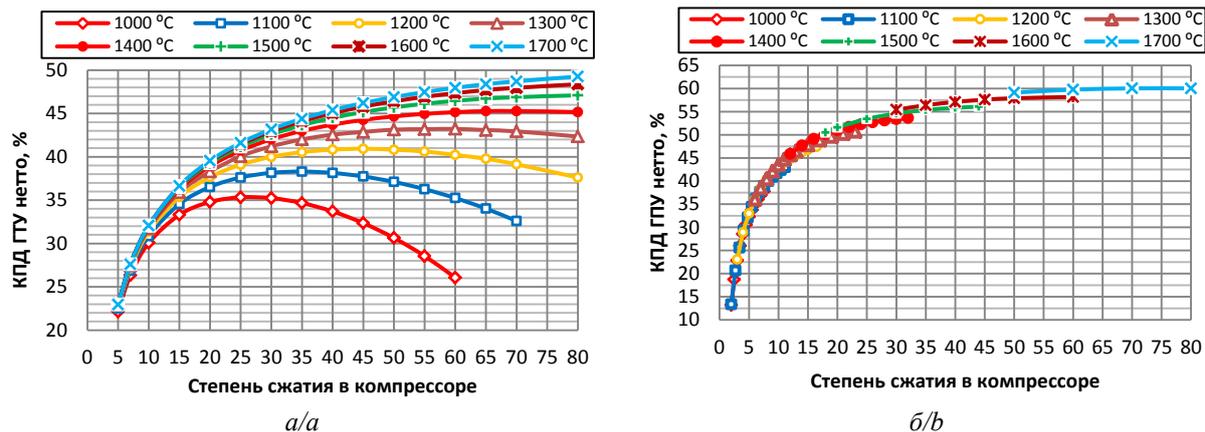


Рис. 5. Зависимость КПД нетто от степени сжатия в компрессоре и температуры на выходе камеры сгорания: а) КПД ГТУ без впрыска пара; б) КПД ГПУ с впрыском пара

Fig. 5. Dependence of the net efficiency on the compression ratio in the compressor and the temperature at the outlet of the combustion chamber: a) GTP efficiency without steam injection; b) efficiency of gas steam plant with steam injection

На рис. 5 видим, что впрыск пара с ростом температуры на выходе камеры сгорания приводит к существенному приросту КПД, при этом примерно в 1,5–2,5 раза снижается оптимально значение степени сжатия в компрессоре. Также видим, что значительно уменьшаются допустимые пределы изменения степени сжатия в компрессоре, что обусловлено допустимыми значениями температурных напоров в котле-утилизаторе.

На рис. 6 представлена зависимость максимальных значений КПД нетто от температуры газов за КС. Для варианта без впрыска пара максимальный КПД установки соответствует оптимальному значению степени сжатия. Для варианта с впрыском соответствует максимальному КПД при допустимой степени сжатия.

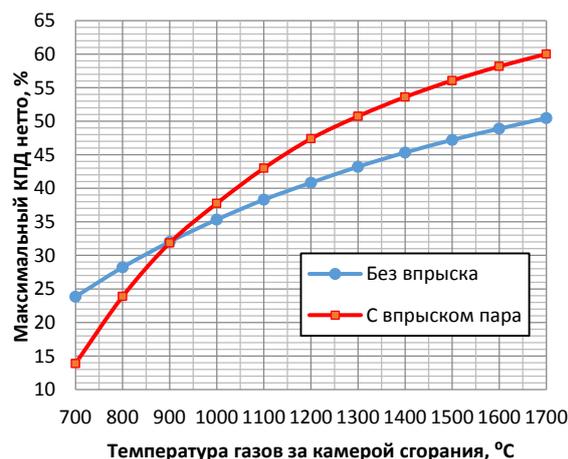


Рис. 6. Максимальный КПД нетто в зависимости от температуры газов за КС

Fig. 6. Maximum net efficiency depending on the gas temperature behind the CC

Видим, что при температуре газов на выходе КС до 900 °C КПД ГПУ с впрыском пара ниже, чем у ГТУ без впрыска. С ростом температуры от 900 °C до значений порядка 1300 °C положительный эффект от впрыска пара быстро увеличивается от 0 до 7,5 %.

Дальнейшее увеличение температуры слабо влияет на прирост КПД, достигая при 1700 °C 9 %.

Положительный эффект впрыска пара на КПД обусловлен увеличением расхода рабочего тела и его удельной теплоемкости, так как удельная теплоемкость пара значительно выше удельной теплоемкости воздуха и продуктов сгорания. При впрыске пара с ростом температуры газов за КС в продуктах сгорания растет относительная доля водяных паров.

Анализ зависимости удельной мощности газотурбинной установки на кг сжимаемого в компрессоре воздуха от температуры газов за КС и степени сжатия в компрессоре (рис. 7) позволяет сделать вывод, что впрыск пара повышает величину удельной мощности установки от 1,5 при температуре 1000 °C до 2 раз при температуре 1700 °C.

Впрыск пара позволяет существенно снизить коэффициент избытка воздуха при одинаковых значениях температуры газов за КС (рис. 8), что значительно снижает затраты мощности на компрессор. При этом чем выше температура, тем больше снижается коэффициента избытка воздуха.

Расход энергетического пара сильно зависит от степени сжатия в компрессоре и температуры газов на выходе КС (рис. 9). С их ростом он существенно снижается.

Впрыск пара в камеру сгорания позволяет существенно снизить температуру уходящих газов (рис. 10) в результате использования теплоты газов в котле-утилизаторе для производства пара на впрыск и охлаждение. Для ГПУ, в отличие от ГТУ без впрыска, характерен рост температуры уходящих газов с ростом степени сжатия в компрессоре. Минимальная температура газов на выходе котла-утилизатора ограничена температурой питательной воды и величиной температурного напора Δt_{9-12} .

Для оценки достоверности расчетов полученные результаты были сравнены с результатами расчетов, представленных в [25] и выполненных для близких исходных данных. При этом относительная погрешность не превышала 2...5 %.

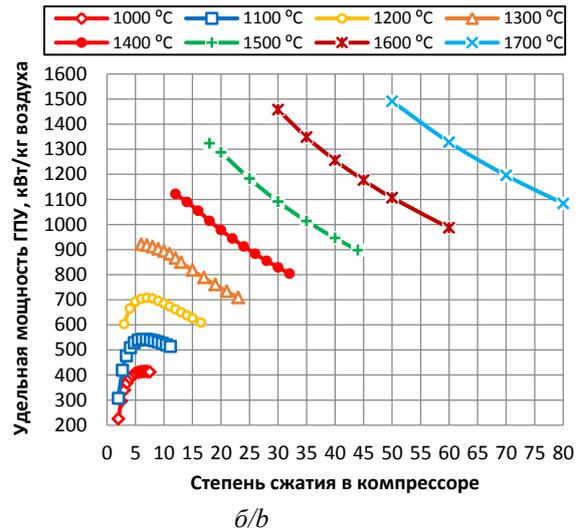
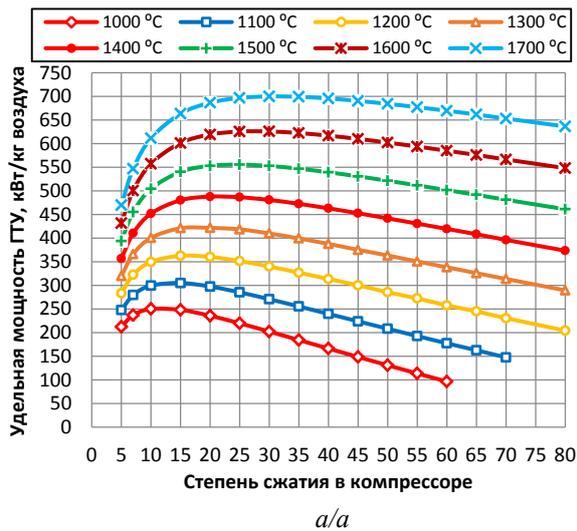


Рис. 7. Зависимость удельной мощности на кг сжимаемого в компрессоре воздуха от температуры газов на выходе камеры сгорания и степени сжатия: а) газотурбинная установка без впрыска; б) газопаровая установка с впрыском

Fig. 7. Dependence of the specific power per kg of compressed air in the compressor on the temperature of the gases at the outlet of the combustion chamber and the degree of compression: a) gas turbine without injection; b) gas-steam installation with injection

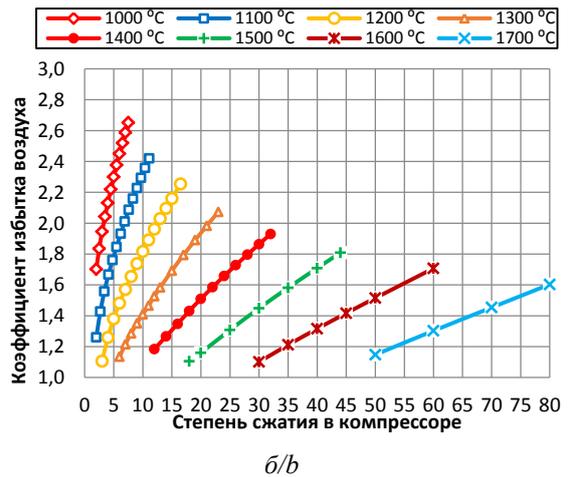
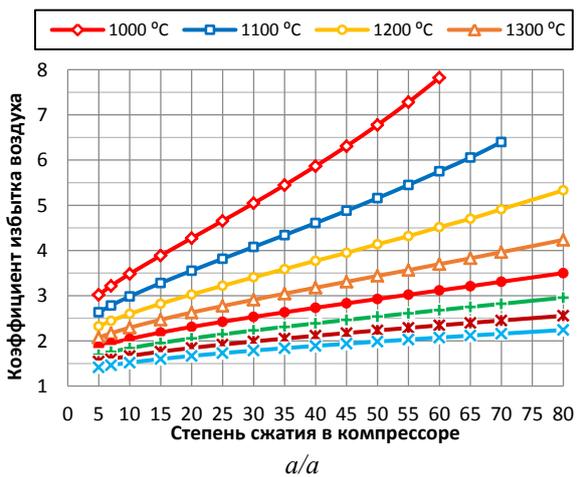


Рис. 8. Зависимость коэффициента избытка воздуха от степени сжатия в компрессоре и температуры газов на выходе камеры сгорания: а) газотурбинная установка без впрыска; б) газопаровая установка с впрыском

Fig. 8. Dependence of the excess air ratio on the compression ratio in the compressor and the temperature of the gases at the outlet of the compressor station: a) gas turbine without injection; b) gas-steam installation with injection

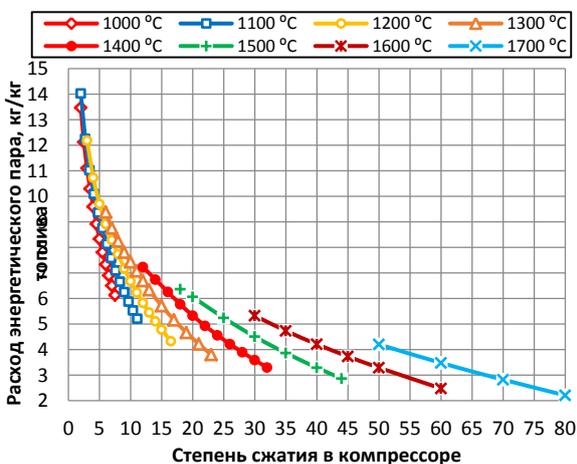


Рис. 9. Зависимость расхода энергетического пара ГПУ от степени сжатия в компрессоре и температуры газов на выходе КС

Fig. 9. Dependence of the power steam flow rate of the GPU on the compression ratio in the compressor and the temperature of the gases at the outlet of the compressor station

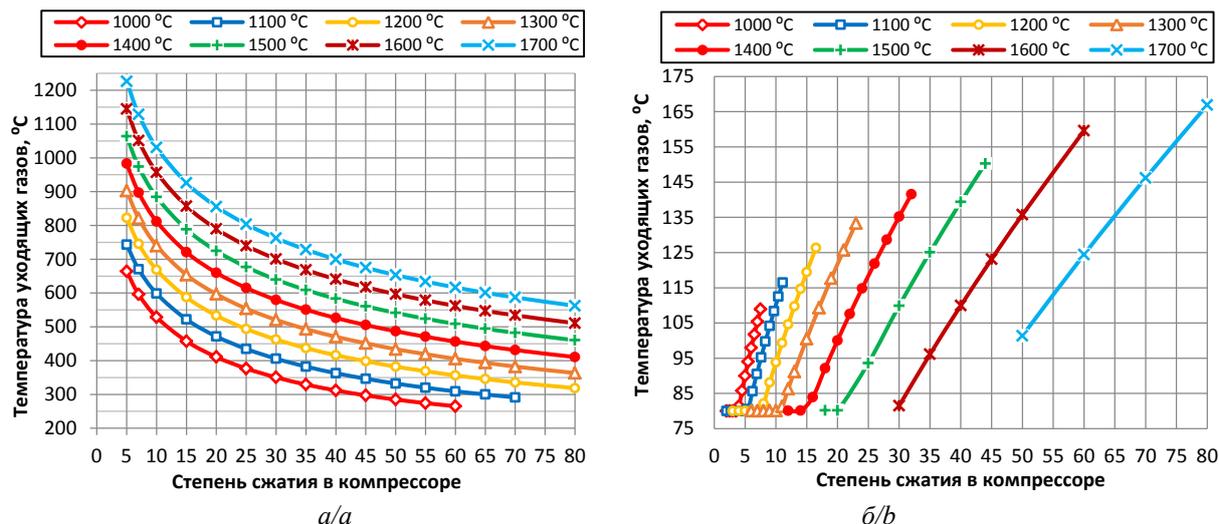


Рис. 10. Зависимость температуры уходящих газов от степени сжатия в компрессоре и температуры газов на выходе камеры сгорания: а) газотурбинная установка без впрыска; б) газопаровая установка с впрыском

Fig. 10. Dependence of the temperature of the exhaust gases on the compression ratio in the compressor and the temperature of the gases at the outlet of the compressor station: a) gas turbine without injection; b) gas-steam installation with injection

Выводы

1. Разработана схема газопаровой установки с экологическим и энергетическим впрысками пара и паровым охлаждением турбины привода компрессора и силовой турбины. Рассмотрен цикл работы газопаровой установки с разделением его на цикл на сухих продуктах сгорания и цикл на водяном паре. Разработана программа расчета представленной схемы газопаровой установки. Достоверность численных исследований подтверждается предварительным тестированием алгоритма на имеющихся результатах «ручных» расчетов, а также на исследованиях, проведенных другими авторами.
2. Проведен анализ влияния расхода впрыска энергетического пара в камеру сгорания на основные показатели газопаровой установки для установления закономерностей изменения ее основных параметров и показателей эффективности работы. В результате численного эксперимента получены зависимости характеристик газопаровой установки с впрыском пара и газотурбинной установки без впрыска от основных параметров и проведено их сравнение.
3. Выявлено, что для выбранной схемы и основных исходных величин для расчета при температуре газов на выходе камеры сгорания ниже 900 °С электрический КПД газопаровой установки с впрыском пара ниже, чем у газотурбинной установки без впрыска. От 900 до 1300 °С разница КПД становится положительной и возрастает от 0 до 7,5 %. Дальнейшее увеличение температуры до 1700 °С позволяет увеличить прирост КПД до 9 %.
4. Установлено, что при впрыске пара степень сжатия в компрессоре, при которой достигается максимальный электрический КПД установки, снижается. Для выбранного варианта конструкции

- такое снижение для различных температур в КС достигает 1,5...2,5 относительно аналогичного варианта без впрыска.
5. Определено, что впрыск пара за счет добавления массы пара и увеличения вследствие этого массового расхода рабочего тела примерно в 1,5...2,0 раза повышает величину удельной мощности установки на 1 кг сжимаемого в компрессоре воздуха.
6. Показано, что при высокой степени сжатия в компрессоре впрыск пара позволяет существенно снизить коэффициент избытка воздуха в камере сгорания за счет более эффективного охлаждения металла и продуктов сгорания, чем охлаждение воздухом, что снижает затраты мощности в компрессоре на сжатие и уменьшает образование оксида углерода.
7. Установлено, что необходимый для роста энергетических показателей установки расход впрыска пара сильно падает при росте степени сжатия в компрессоре и температуры газов на выходе камеры сгорания, это сокращает затраты на подготовку питательной воды и расход теплоты на подогрев и получение пара в котле-утилизаторе, что повышает энергоэффективность установки.
8. Впрыск пара значительно снижает температуру уходящих из котла-утилизатора газов, что существенно уменьшает потери теплоты с уходящими газами и повышает КПД котла-утилизатора, а также сокращает выбросы оксидов азота и углерода.
9. Необходимость обеспечения температурных напоров в котле-утилизаторе существенно ограничивает диапазон режимов работы газопаровой установки по степени сжатия в компрессоре по сравнению с газотурбинной установкой без впрыска пара, что необходимо учитывать при проектировании и эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Энергетическая стратегия России на период до 2035 года. Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 09.06.2020 N 1523-р. – 93 с.
2. Манушин Э.А. Комбинированные энергетические установки с паровыми и газовыми турбинами // Итоги науки и техники. ВИНТИ. Серия: Турбостроение. – 1990. – 184 с.
3. Манушин Э.А. Газовые турбины: проблемы и перспективы. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 168 с.
4. Тачтон Дж. Полуэмпирический метод расчета содержания NOx в продуктах сгорания при наличии впрыска пара // Энергетические машины и установки. – 1984. – № 4. – С. 89–98.
5. Дикий Н.А. Судовые газотурбинные установки. – Л.: Судостроение, 1978. – 264 с.
6. Батенин В.М., Зейгарник Ю.А., Копелев С.З. Парогазовая установка с вводом пара в газовую турбину – перспективное направление развития энергетических установок // Теплоэнергетика. – 1993. – № 10. – С. 46–52.
7. Digumarthi R., Chung-Nan Chang. Cheng-Cycle implementation on small gas turbine engine // Gas Turbine World. – 1984. – № 3. – P. 34–37.
8. Меллер К. Ввод в эксплуатацию первой в мире газотурбинной установки полного цикла STIG на базе газогенератора LM 5000 (фирма Simpson Paper Company) // Современное машиностроение. Сер. А. – 1989. – № 11. – С. 1–10.
9. Бернем, Джулиани, Меллер. Разработка, монтаж и испытание системы впрыска пара (STIG) в газогенератор LM 5000 фирмы General Electric // Современное машиностроение. Сер. А. – 1988. – № 2. – С. 11–17.
10. Романов В.Л., Кривуца В.А. Комбинированная газопаротурбинная установка мощностью 16–25 МВт с утилизацией тепла отходящих газов и регенерацией воды из парогазового потока // Теплоэнергетика. – 1996. – № 4. – С. 37–40.
11. Арсеньев Л.В., Тырышкин В.Г. Комбинированные установки с газовыми турбинами. – Л.: Машиностроение, 1982. – 247 с.
12. Ibrahim T.K., Rahman M.M. Optimum performance improvements of the combined cycle based on an intercooler – reheated gas turbine // Journal of Energy Resources Technology, Transactions of the ASME. – 2015. – V. 137 (6). – P. 1601–1612.
13. Polyzakis A.L., C Koroneos., Xydis G. Optimum gas turbine cycle for combined cycle power plant // Energy Conversion and Management. – 2008. – V. 49 (4). – P. 551–563.
14. Chiesa P., Macchi E. A thermodynamic analysis of different options to break 60 % electric efficiency in combined cycle power plants // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. – 2004. – V. 126 (4). – P. 770–785.
15. Mokhtari H., H Ahmadisedigh., Ameri M. The optimal design and 4E analysis of double pressure HRSG utilizing steam injection for Damavand power plant // Energy. – 2017. – V. 118. – P. 399–413.
16. Ol'khovskii G.G. Combined cycle plants: yesterday, today, and tomorrow (review) // Thermal Engineering. – 2016. – V. 63 (7). – P. 488–494.
17. Combined cycle power plants with post – combustion CO2 capture: energy analysis with Cs at part load conditions for different HRSG configurations / M. Vaccarelli, M. Sammak, K. Jonshagen, R. Carapellucci, M. Genrup // Energy. – 2017. – V. 112. – P. 917–925.
18. Efficiency boosting and steam saving for a steam-injected gas turbine engine: Optimization study of the running conditions / A.M. Abubaker, A. Darwish Ahmad, M.N.A. Magableh, Y.S.H. Najjar // Journal of Energy Engineering – ASCE. – 2021. – V. 147 (1). – P. 732–748.
19. Techno-economic comparison of combined cycle gas turbines with advanced membrane configuration and MEA solvent at part load conditions / M. Van Der Spek, D. Bonalumi, G. Manzolini, A. Ramirez, A.P.C. Faaij // Energy and Fuels. – 2018. – V. 32 (1). – P. 625–645.
20. Steam injected Humphrey cycle for gas turbines with pressure gain combustion / P. Stathopoulos, T. Rähse, J. Vinkeloe, N. Djordjevic. // Energy. – 2019. – V. 188. – P. 116020.
21. Farokhipour A., Hamidpour E., Amani E. A numerical study of NOx reduction by water spray injection in gas turbine combustion chambers // Fuel. – 2018. – V. 212. – P. 173–186.
22. On energy, exergy, and environmental aspects of a combined gas-steam cycle for heat and power generation undergoing a process of retrofitting by steam injection / P. Ziolkowski, T. Kowalczyk, M. Lemański, J. Badur // Energy Conversion and Management. – 2019. – V. 192. – P. 374–384.
23. Lemmon E.W., Huber M.L., McLinden M.O. Reference fluid thermodynamic and transport properties-REFPROP, standard reference database 23, version 8.0. – Gaithersburg: National Institute of Standard and Technology, 2007.
24. Тепловой расчет котлов (нормативный метод). 3-е изд., перераб. и дополн. – СПб: Изд-во НПО ЦКТИ, 1998. – 257 с.
25. Орлов К.А. Исследование схем парогазовых установок на основе разработанных прикладных программ по свойствам рабочих тел: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 2004. – 20 с.

Поступила: 26.08.2021 г.

Информация об авторах

Галашов Н.Н., кандидат технических наук, доцент НОЦ И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Туболев А.А., ассистент НОЦ И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Минор А.А., аспирант НОЦ И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Баннова А.И., аспирант НОЦ И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 621.311.238; 621.311.22

PARAMETRIC ANALYSIS OF A GAS-STEAM PLANT SCHEME USING A MATHEMATICAL MODEL

Nikolay N. Galashov¹,
gal@tpu.ru

Alexander A. Tubolev¹,
Tubolev@tpu.ru

Alexander A. Minor¹,
aam29061994@gmail.com

Albina I. Bannova¹,
gabullina.albina@list.ru

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

The relevance of the topic is caused by the need for a complex of scientific research on the development and optimization of thermal circuits and calculation methods for gas-steam installations. Gas-steam plants are a promising direction for increasing the efficiency of power plants based on gas turbine engines with environmental and energy injection of water vapor into the combustion chamber.

The main aim of the research is to improve the calculation methodology of gas turbine units with steam injection for the study of issues of increasing the efficiency of electric and thermal energy generation in order to reduce natural gas consumption, as well as to improve thermal schemes and optimize the parameters of gas-steam installations.

Objects: combined gas-steam installations based on gas turbine installations with steam injection into the combustion chamber.

Methods: numerical methods of research by mathematical modeling of systems and elements of gas-steam installations based on material and energy balances.

Results. A mathematical model has been developed for calculating the energy characteristics of a gas-steam installation, taking into account changes in input parameters in a wide range. The influence of the gas temperature at the outlet of the combustion chamber and the compression ratio in the compressor on the main energy characteristics of a gas turbine installation without steam injection and with injection into the combustion chamber is analyzed. It is shown that steam injection can increase the efficiency of a gas turbine installation by up to 9 %, while the consumption of injected steam is significantly reduced with an increase in the temperature of the gases at the outlet of the combustion chamber and the compression ratio in the compressor. Also, steam injection significantly reduces the excess air coefficient in the combustion chamber and the temperature of the gases leaving the waste boiler. At the same time, the specific power of electricity generation increases by about 1.5...2.0 times compared to a gas turbine installation without injection. It is established that the need to ensure temperature pressures in the heat recovery boiler significantly limits the range of operating modes of the gas-steam plant in terms of the compression ratio in the compressor.

Key words:

Gas turbine plant, gas-steam plant, power steam injection, ecological steam injection, waste heat boiler, combustion products, flue gases.

REFERENCES

1. *Energeticheskaya strategiya Rossii na period do 2035 goda* [Energy strategy of Russia for the period up to 2035]. Approved by the order of the Government of the Russian Federation, 09.06.2020. Vol. (1523–r).
2. Manushin E.A. Kombinirovannye energeticheskie ustanovki s parovymi i gazovymi turbinami [Combined power plants with steam and gas turbines]. *Itogi nauki i tekhniki. VINITI. Seriya: Turbostroenie*, 1990, vol. 4, 184 p.
3. Manushin E.A. *Gazovye turbiny: problemy i perspektivy* [Gas turbines: problems and prospects]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1986. 168 p.
4. Tachtou Dzh. Poluempiricheskiy metod rascheta sodержaniya NOx v produktakh sgoraniya pri nalichii vpryska para [Semi-empirical method for calculating the NOx content in combustion products in the presence of steam injection]. *Energeticheskie mashiny i ustanovki*, 1984, no. 4, pp. 89–98.
5. Dikiy N.A. *Sudovye gazoturbinnye ustanovki* [Marine gas turbine installations]. St-Petersburg, Sudostroenie Publ., 1978. 264 p.
6. Batenin V.M., Zeygarnik Yu.A., Kopelev S.Z. Parogazovaya ustanovka s vvodom para v gazovuyu turbinu – perspektivnoe napravlenie razvitiya energeticheskikh ustanovok [Combined-cycle plant with steam injection into a gas turbine – a promising direction in the development of power plants]. *Teplotenergetika*, 1993, no. 10, pp. 46–52.
7. Digumarthi R., Chung–Nan Chang. Cheng–Cicle implementation on small gas turbine engine. *Gas Turbine World*, 1984, vol. 3, pp. 34–37.
8. Meller K. Vvod v ekspluatatsiyu pervoy v mire gazoturbinnoy ustanovki polnogo tsikla STIG na baze gazogeneratora LM 5000 [Commissioning of the world's first full-cycle gas turbine STIG based on the LM 5000 gas generator]. *Sovremennoe mashinostroyenie. Seriya: A*, 1989, no. 11, pp. 1–10.
9. Bernem, Dzhuliani, Meller. Razrabotka, montazh i ispytanie sistemy vpryska para (STIG) v gazogenerator LM 5000 firmy General Electric [Development, installation and testing of the steam injection system (STIG) in the LM 5000 gas generator from General Electric]. *Sovremennoye mashinostroyeniye. Seriya: A*, 1988, no. 2, pp. 11–17.
10. Romanov V.L., Krivutsa V.A. Kombinirovannaya gazoparoturbinnaya ustanovka moshchnostyu 16–25 MVt s utilizatsiyey tepla otkhodyashchikh gazov i regeneratsiyey vody iz parogazovogo potoka [Combined gas-steam turbine plant with a capacity of 16–25 MW with waste gas heat recovery and water regeneration from a steam-gas flow]. *Teplotenergetika*, 1996, no. 4, pp. 37–40.
11. Arsenyev L.V., Tyryshkin V.G. *Kombinirovannye ustanovki s gazovymi turbinami* [Combined installations with gas turbines]. St-Petersburg, Mashinostroyeniye Publ., 1982. 247 p.
12. Ibrahim T.K., Rahman M.M. Optimum performance improvements of the combined cycle based on an intercooler –

- reheated gas turbine. *Journal of Energy Resources Technology, Transactions of the ASME*, 2015, vol. 137 (6), pp. 1601–1612.
13. Polyzakis A.L., Koroneos C., Xydis G. Optimum gas turbine cycle for combined cycle power plant. *Energy Conversion and Management*, 2008, vol. 49 (4), pp. 551–563.
 14. Chiesa P., Macchi E. A thermodynamic analysis of different options to break 60 % electric efficiency in combined cycle power plants. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2004, vol. 126 (4), pp. 770–785.
 15. Mokhtari H., Ahmadisedigh H., Ameri M. The optimal design and 4E analysis of double pressure HRSG utilizing steam injection for Damavand power. *Energy*, 2017, vol. 118, pp. 399–413.
 16. Ol'khovskii G.G. Combined cycle plants: yesterday, today, and tomorrow (review). *Thermal Engineering*, 2016, vol. 63 (7), pp. 488–494.
 17. Vaccarelli M., Sammak M., Jonshagen K., Carapellucci R., Genrup M. Combined cycle power plants with post – combustion CO₂ capture: energy analysis at part load conditions for different HRSG configurations. *Energy*, 2017, vol. 112, pp. 917–925.
 18. Abubaker A.M., Darwish Ahmad A., Magableh M.N.A., Najjar Y.S.H. Efficiency boosting and steam saving for a steam-injected gas turbine engine: optimization study of the running conditions. *Journal of Energy Engineering – ASCE*, 2021, vol. 147 (1), p. 732–748.
 19. Van Der Spek M., Bonalumi D., Manzolini G., Ramirez A., Faaij A.P.C. Techno-economic comparison of combined cycle gas turbines with advanced membrane configuration and MEA solvent at part load conditions. *Energy and Fuels*, 2018, vol. 32 (1), pp. 625–645.
 20. Stathopoulos P., Rähse T., Vinkeloe J., Djordjevic N. Steam injected Humphrey cycle for gas turbines with pressure gain combustion. *Energy*, 2019, vol. 188, p. 116020.
 21. Farokhipour A., Hamidpour E., Amani E. A numerical study of NO_x reduction by water spray injection in gas turbine combustion chambers. *Fuel*, 2018, vol. 212, pp. 173–186.
 22. Ziółkowski P., Kowalczyk T., Lemański M., Badur J. On energy, exergy, and environmental aspects of a combined gas-steam cycle for heat and power generation undergoing a process of retrofitting by steam injection. *Energy Conversion and Management*, 2019, vol. 192, pp. 374–384.
 23. Lemmon E.W., Huber M.L., McLinden M.O. *Reference fluid thermodynamic and transport properties-REFPROP, standard reference database 23, version 8.0*. Gaithersburg, National Institute of Standard and Technology, 2007.
 24. *Teplovoy raschet kotlov (normativny metod)* [Thermal calculation of boilers (standard method)]. 3rd ed. St-Petersburg, NPO CKTI Publ., 1998. 257 p.
 25. Orlov K.A. *Issledovanie skhem parogazovykh ustanovok na osnove razrabotannykh prikladnykh programm po svoystvam rabochikh tel*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Research of schemes of gas-steam units based on the developed applied programs on working bodies features. Cand Diss. Abstract]. Moscow, 2004. 20 p.

Received: 26 August 2021.

Information about the authors

Nikolay N. Galashov, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Alexander A. Tubolev, assistant, National Research Tomsk Polytechnic University.

Alexander A. Minor, postgraduate, National Research Tomsk Polytechnic University.

Al'bina I. Bannova, postgraduate, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 661.8:542:543.552:546.59

ВОЛЬТАМПЕРОМЕТРИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТИОСУЛЬФАТ-ИОНОВ НА МОДИФИЦИРОВАННОМ ЧАСТИЦАМИ ЗОЛОТА УГЛЕРОДСОДЕРЖАЮЩЕМ КОМПОЗИТНОМ ЭЛЕКТРОДЕ

Аксиненко Ольга Сергеевна¹,
crumba88@mail.ru

Коршунов Андрей Владимирович²,
korshunovav@mgsu.ru

Ковалева Светлана Владимировна³,
svetkovaleva@rambler.ru

¹ Управление образования Администрации Томского района,
Россия, 634009 г. Томск, пер. Кооперативный, 2а.

² Московский государственный строительный университет,
Россия, 129337 г. Москва, Ярославское шоссе, 26.

³ Томский государственный педагогический университет,
Россия, 634061 г. Томск, ул. Киевская, 60.

Актуальность. Тиосульфаты находят широкое применение в промышленности (текстильное производство, водоочистка, извлечение металлов), сельском хозяйстве (контроль цветения растений, фумигация почв, удобрения), медицине (детоксикационная терапия), аналитической химии. Области практического использования тиосульфатов определяются их высокой восстановительной и комплексообразующей активностью, а также продуктами окисления, имеющими самостоятельное практическое значение (коллоидная сера, политионаты). Несмотря на длительный опыт применения тиосульфатов, до сих пор продолжается поиск экспрессных, чувствительных и доступных методов их определения в технологических средах, объектах окружающей среды, продуктах питания. В связи с этим совершенствование методов определения тиосульфатов является актуальной задачей.

Цель: определить условия получения аналитического сигнала при электроокислении тиосульфат-ионов с использованием модифицированного частицами золота углеродсодержащего композитного электрода.

Объекты: растворы тиосульфата натрия.

Методы: вольтамперометрия постоянного тока с линейной разверткой потенциалов, циклическая вольтамперометрия, ртутная электронная микроскопия, рентгеноспектральный микроанализ, моделирование окислительно-восстановительных равновесий.

Результаты. Электроокисление тиосульфат-ионов на модифицированном частицами золота углеродсодержащем композитном электроде в условиях постоянноточковой вольтамперометрии с линейной разверткой потенциалов в фоновых электролитах 0,05 М КNO₃ или 0,05 М Na₂SO₄ протекает при потенциалах 0,2...0,6 В и 0,8...1,3 В (х. с. э.) с максимумами анодного тока при E_{p,1} ≈ 0,3 В и E_{p,2} ≈ 1,1 В. Величина анодного тока I_{p,2} на порядок выше величины I_{p,1}, концентрационные зависимости I_{p,1} и I_{p,2} являются линейными в интервалах c(S₂O₃²⁻) = 1·10⁻⁶...1·10⁻⁵ М и 1·10⁻⁷...1·10⁻⁵ М, соответственно. Интерпретация электродных процессов проведена на основе расчётных диаграмм метастабильных ионно-молекулярных форм в системе S–Au–H₂O, а также литературных данных. Показано, что максимум анодного тока в области E_{p,1} обусловлен протеканием совокупности электродных и химических реакций с участием промежуточных продуктов окисления тиосульфата (сульфит-, политионат-ионов, серы, комплексов Au). Основным процессом в области E_{p,2} является анодное окисление серы с наложением электрокаталитического цикла с участием (гидр)оксидов Au. Показана целесообразность использования величины I_{p,2} при E_{p,2} ≈ 1,1 В для определения низких концентраций S₂O₃²⁻-ионов. Проведена оценка правильности результатов измерений и стабильности электродной функции при многократной регистрации аналитического сигнала. Предел обнаружения S₂O₃²⁻-ионов по предлагаемому методу составляет C_{мин} = 5·10⁻⁸ М (7,9 мкг/л), нижняя граница определяемых концентраций C_{мин} = 1,2·10⁻⁷ М. Полученные в работе результаты могут быть использованы при разработке (усовершенствовании) методик определения низких концентраций S₂O₃²⁻-ионов в технологических растворах, объектах окружающей среды, продуктах питания.

Ключевые слова:

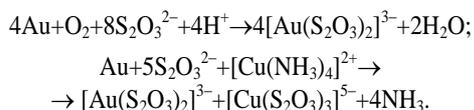
Тиосульфат-ионы, частицы золота, углеродсодержащий композитный электрод, нейтральные электролиты, постоянноточковая вольтамперометрия, анодное окисление, метастабильные ионно-молекулярные формы серы.

Введение

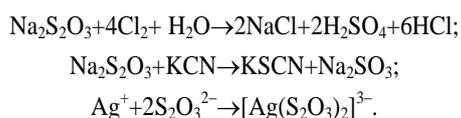
Тиосульфаты находят широкое применение в промышленности, сельском хозяйстве, медицине. Направления их практического использования определяются, прежде всего, высокой восстановительной и комплексообразующей способностью, а также продуктами окисления, имеющими самостоятельное

практическое значение (коллоидная сера, политионаты). Высокая восстановительная активность тиосульфатов используется в текстильной промышленности (удаление избытка отбеливателя) [1], кожевенном деле (выделка шкур) [2], системе водоочистки (дехлорирование балластных вод) [3], аналитической химии [4]. В качестве комплексообразующего реагента тио-

сульфаты натрия и аммония рассматриваются как возможная замена высокотоксичных цианидов при извлечении благородных металлов (золото, серебро) из руд [5]:



В медицине восстановительные и комплексообразующие свойства тиосульфата натрия давно используются при лечении отравлений галогенами, цианидами, солями тяжелых металлов, для снижения интоксикации при химиотерапии, при лечении кальциноза, терапии сепсиса [6, 7]:



В сельском хозяйстве тиосульфаты аммония, натрия, кальция, серебра и других металлов используются в качестве экологически малоопасных реагентов для контроля цветения плодовых, ягодных и декоративных культур, при фумигации почв, в составе удобрений [8, 9]. При производстве пищевых продуктов $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ (добавка E539) используется в качестве антиоксиданта и комплексообразователя [10]. Таким образом, в связи с обширным перечнем областей применения тиосульфатов совершенствование методов контроля их содержания в технологических средах, объектах окружающей среды, лекарственных препаратах и продуктах питания является актуальной задачей.

Одними из наиболее доступных, чувствительных и экспрессных методов определения соединений серы, в том числе и $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ -ионов, являются электрохимические методы. Известны варианты как классических (вольтамперометрия, амперометрическое титрование с использованием жидких и твердых индикаторных электродов), так и современных электроаналитических методов определения тиосульфатов, основанных на электрокатализе. Использование классической и переменноточковой полярографии позволяет определять тиосульфат-ионы в смесях с сульфидами и элементной серой [11, 12]. Определение проводят в нейтральном или слабощелочном фоновом электролите, токи катодного восстановления тиосульфата на Hg-электроде наблюдаются при $-0,28$ В в переменноточковом и при $-0,15$ В в постоянноточковом режимах. Сера восстанавливается при более отрицательных потенциалах $-0,6 \dots -0,9$ В, сульфиды можно удалять в виде сероводорода в среде разбавленной уксусной кислоты путём пропускания азота [11]. Интервал определяемых концентраций $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ -ионов составляет $10^{-6} \dots 10^{-4}$ М [12]. Более высокая чувствительность метода достигается при применении предварительно адсорбционного накопления тиосульфатных Hg-комплексов на ртутной микрокапле при $0,15 \dots 0,27$ В и их последующем восстановлении при $-0,4 \dots -0,5$ В; предел обнаружения в таком варианте метода может быть снижен до $1,2 \cdot 10^{-8}$ М [13].

В качестве металлической основы в составе модифицированных электродов могут быть использованы алюминий или цинк [14–16]. Химическое модифицирование поверхности металлической подложки частицами золота [14] или цианидосодержащими комплексами металлов [14, 15] позволяет определять тиосульфат-ионы в нейтральных фоновых электролитах по токам электрокаталитического окисления в области потенциалов $0,6 \dots 0,8$ В (н. к. э.) [16]. Нижний предел определяемых концентраций $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ -ионов в условиях вольтамперометрии находится на уровне ммоль/л.

В качестве электрокаталитически активных добавок в составе модифицированных электродов на основе углеродсодержащих материалов используются гексацианоферраты кобальта и никеля, оксиды никеля, производные ферроцена, бипиридиновые комплексы рутения [17–21]. Сущность процессов с участием таких добавок заключается в генерации медиаторов (Co^{+3} , Fe^{+3} , Ni^{+3} , Ru^{+3} и др.) в условиях анодной поляризации электрода, которые далее окисляют $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ -ионы. Процесс проводят, как правило, в нейтральном или слабощелочном фоновом электролите (нитраты или хлориды Na или K, фосфатный буфер), окисление тиосульфата протекает в области потенциалов $0,5 \dots 0,8$ В (х. с. э.), интервал линейности концентрационной зависимости аналитического сигнала в среднем составляет $10^{-6} \dots 10^{-4}$ М. Наиболее низкие определяемые концентрации $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ -ионов достигаются при использовании электродов, модифицированных производными ферроцена, комплексами рутения, медью (предел обнаружения порядка 10^{-7} М) [20–22]. Перспективным является использование стеклоуглеродного электрода, модифицированного углеродными нанотрубками [23], а также алмазного электрода, допированного бором, в режиме амперометрического детектирования [24].

Необходимо отметить, что рассмотренные выше химически модифицированные электроды, несмотря на хорошие аналитические характеристики, обладают рядом существенных недостатков при систематическом применении на практике: процедура модифицирования является многостадийной и длительной; такие электроды требуют соблюдения специальных условий использования и хранения; поверхность электрода быстро блокируется загрязнениями, в том числе серой и её соединениями. Вместе с тем возможности использования доступных и относительно простых в приготовлении углеродсодержащих электродов, модифицированных частицами благородных металлов, изучены недостаточно. В связи с этим целью настоящей работы являлось определение условий получения аналитического сигнала при электроокислении тиосульфат-ионов с использованием модифицированного частицами золота углеродсодержащего композитного электрода.

Материалы и методы исследования

В работе использованы реактивы квалификации «х. ч.» и «ч. д. а.» без дополнительной очистки: тиосульфат натрия $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, сульфат натрия Na_2SO_4 ,

нитрат калия KNO_3 . Исходные растворы веществ с концентрацией 0,1 М готовили растворением точных навесок реагентов в рассчитанном объеме бидистиллированной воды. Рабочие растворы с меньшей концентрацией реагентов готовили путем разбавления исходных растворов. Рабочий раствор $1 \cdot 10^{-4}$ М $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ готовили непосредственно перед проведением экспериментов путём разбавления исходного 0,1 М раствора в предварительно прокипяченной и охлажденной бидистиллированной воде. Для проведения электрохимических измерений использовали трёхэлектродную кварцевую ячейку вместимостью 20 мл с неразделенным межэлектродным пространством. В качестве рабочего электрода использовали композитный электрод (НПП «Томьяналит»), состоящий из полиэтиленового корпуса, заполненного смесью полиэтилена (70 мас. %) с добавкой высокодисперсного углерода (30 мас. %) при помощи литья под давлением. Обновление рабочей поверхности электрода осуществляли срезанием тонкого слоя (0,1...0,3 мм). Модифицирование поверхности композитного электрода частицами золота проводили методом электроосаждения из раствора, содержащего 500 мг/л HAuCl_4 (готовили из стандартного образца ГСО 8429-2003), при потенциале $-0,1$ В (х. с. э.) в течение 60 с. Электродом сравнения и вспомогательным электродом служили хлорсеребряные электроды ($\text{Ag}/\text{AgCl}/1\text{M KCl}$). Для проведения вольтамперометрических измерений в постоянноточковом режиме с линейной разверткой потенциала использовали анализатор TA-Lab (НПП «Томьяналит»). Перед регистрацией вольтамперограмм из исследуемых растворов удаляли растворенный кислород путем барботирования азота высокой чистоты. Морфологию и состав поверхностного слоя модифицированного электрода контролировали при помощи растрового электронного микроскопа Philips SEM 515 с приставкой EDAX ECON IV.

Результаты и их обсуждение

Микрофотография поверхности углеродсодержащего композитного электрода, модифицированного частицами золота ($\text{Au}/\text{УКЭ}$), приведена на рис. 1. Распределение частиц Au по поверхности композитной матрицы является относительно равномерным, размеры единичных частиц металла составляют в среднем 100...200 нм. Частицы образуют неплотные агрегаты, размеры которых в зависимости от условий осаждения составляют 0,5...0,8 мкм. По данным рентгеноспектрального микроанализа в состав поверхности модифицированного электрода входят два элемента – углерод и золото (рис. 1), присутствие других элементов в пределах чувствительности метода не обнаружено.

В качестве фоновых электролитов в работе были использованы средние соли с одно- и двухзарядными анионами – нитрат калия и сульфат натрия, обеспечивающие нейтральную среду растворов. Выбор этих солей обусловлен наличием в них электрохимически неактивного в исследуемых условиях аниона, являющегося конечным продуктом окисления тиосульфат-ионов (Na_2SO_4), или слабо адсорбирующегося аниона

(KNO_3), не обладающего комплексообразующими свойствами по отношению к компонентам исследуемой системы. На основании предварительной регистрации циклических вольтамперограмм (ЦВА) электрода $\text{Au}/\text{УКЭ}$ в 0,01–0,5 М растворах фоновых электролитов в присутствии $1 \cdot 10^{-4}$ М $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ показано, что оптимальной концентрацией фонового электролита является 0,05 М. При меньшей концентрации фона возрастает сопротивление раствора, при более высокой концентрации происходит снижение тока электродного процесса с участием $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ -ионов.

Из данных ЦВА следует, что анодное окисление $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ -ионов на $\text{Au}/\text{УКЭ}$ включает два процесса при $E=0,1...0,6$ В ($E_{p,1} \approx 0,35$ В) и при $E=0,8...1,3$ В ($E_{p,2} \approx 1,1$ В) (рис. 2). Соответствующие анодным токам процессы катодного восстановления не выражены, величины катодного тока в растворах, содержащих $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ -ионы, незначительно отличаются от таковых для фоновых электролитов. По-видимому, рассматриваемые процессы являются необратимыми вследствие образования продуктов окисления тиосульфата, не восстанавливающихся при данных потенциалах.

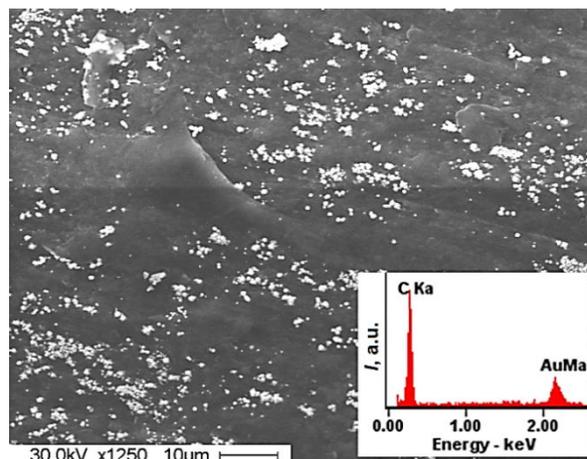


Рис. 1. Микрофотография поверхности модифицированного частицами золота углеродсодержащего композитного электрода $\text{Au}/\text{УКЭ}$; на врезке – характеристический рентгеновский спектр участка поверхности модифицированного электрода

Fig. 1. Micrograph of the surface of a carbon-containing composite electrode modified with gold particles Au/CCE ; the inset shows the characteristic X-ray spectrum of the surface area of the modified electrode

Влияние условий регистрации вольтамперограмм на величины анодных токов $I_{p,1}$ и $I_{p,2}$ оценивали путем изменения начального потенциала регистрации, присутствия растворенного кислорода, скорости развертки потенциалов. Варьирование диапазона потенциалов показало, что оптимальным потенциалом начала регистрации является $E_n=0,0$ В. При более положительном E_n происходит снижение величины анодного тока в области 0,8...1,3 В, использование более отрицательных потенциалов E_n приводит к протеканию

побочных процессов восстановления. Присутствие кислорода в растворе приводит к существенному увеличению погрешности определения $S_2O_3^{2-}$ -ионов по предлагаемому методу, в ходе анализа процедура деаэрирования раствора азотом (аргоном) является обязательной. Влияние скорости развертки потенциалов ($v=40...180$ мВ/с) на величины анодных токов изуча-

ли в растворе $1 \cdot 10^{-4}$ М $S_2O_3^{2-}$ -ионов на фоне 0,05 М KNO_3 . При $v > 100$ мВ/с максимум анодного тока при 0,8...1,3 В существенно искажается, что затрудняет измерение аналитического сигнала; при меньших v значения I_p уменьшаются. В связи с этим дальнейшие измерения аналитических сигналов $I_{p,1}$ и $I_{p,2}$ проводили при скорости развертки 100 мВ/с.

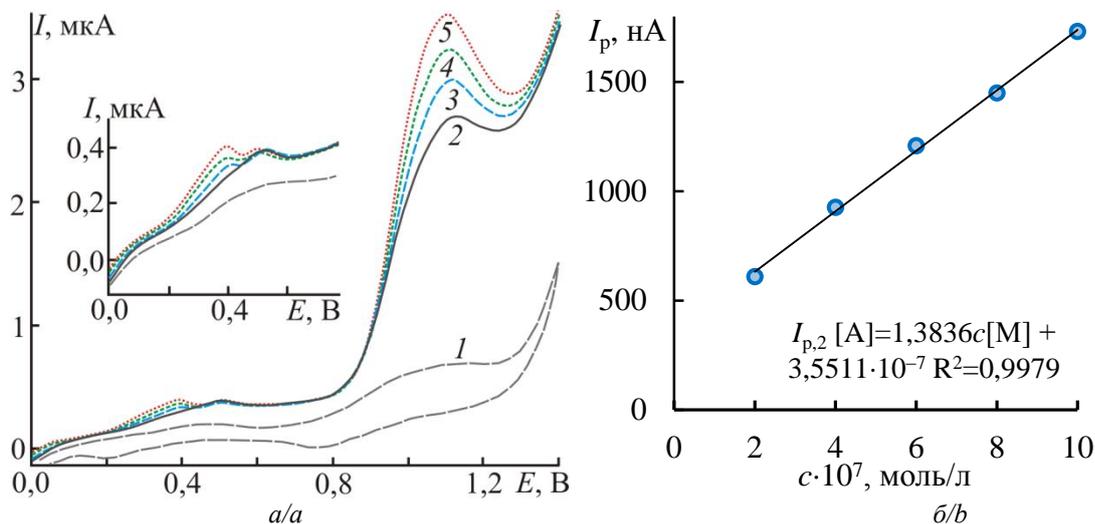


Рис. 2. а) вольтамперограммы модифицированного электрода AuУКЭ в растворах 0,05 М $Na_2SO_4 + Na_2S_2O_3$ ($E_{нач}=0,0$ В, $E_{кон}=1,4$ В, $v=100$ мВ/с, $pH=7$, деаэрирование растворов азотом) при различных концентрациях тиосульфата натрия, М: 1) фоновая кривая; 2) $2 \cdot 10^{-7}$; 3) $4 \cdot 10^{-7}$; 4) $6 \cdot 10^{-7}$; 5) $8 \cdot 10^{-7}$; на врезке – участки вольтамперограмм в интервале потенциалов 0,0...0,6 В; б) зависимость тока окисления $I_{p,2}$ при $E_{p,2} \approx 1,1$ В от концентрации $S_2O_3^{2-}$ -ионов в растворе (фоновый электролит 0,05 М Na_2SO_4)

Fig. 2. а) voltammograms of the modified AuCCE electrode in solutions of 0,05 М $Na_2SO_4 + Na_2S_2O_3$ ($E_{init}=0,0$ V, $E_{final}=1,4$ V, $v=100$ mV/s, $pH=7$, solutions were deaerated with nitrogen) at different concentrations of sodium thiosulfate, М: 1) the blank curve; 2) $2 \cdot 10^{-7}$; 3) $4 \cdot 10^{-7}$; 4) $6 \cdot 10^{-7}$; 5) $8 \cdot 10^{-7}$; the inset shows a section of voltammograms in the potential range of 0,0...0,6 V; б) the dependence of the oxidation current $I_{p,2}$ at $E_{p,2} \approx 1,1$ V on concentration of $S_2O_3^{2-}$ ions in solutions (supporting electrolyte 0,05 М Na_2SO_4)

Величина тока $I_{p,1}$ в области потенциалов $E_{p,1} \approx 0,3...0,4$ В достигает на порядок меньших значений по сравнению со вторым анодным максимумом $I_{p,2}$ при $E_{p,2} \approx 1,1$ В (рис. 2). Параметры первого анодного процесса ($E_{p,1}$, $I_{p,1}$) изменяются в зависимости от состава фонового электролита и концентрации $S_2O_3^{2-}$ -ионов в растворе. В фоновом электролите Na_2SO_4 первый максимум анодного тока включает две волны при $E \approx 0,4$ и 0,5 В (рис. 2, а); в растворе KNO_3 первый максимум не содержит второй волны (рис. 3, а), при концентрациях $S_2O_3^{2-}$ -ионов ниже 10^{-6} М этот максимум практически не проявляется (табл. 1).

Изучение влияния концентрации $S_2O_3^{2-}$ -ионов на параметры анодного тока показало, что зависимости $I_p=f(c)$ как для первого $I_{p,1}$, так и второго $I_{p,2}$ анодного тока являются линейными в определенных концентрационных диапазонах (рис. 2, б, 3, б). Линейная зависимость для $I_{p,1}$ соблюдается в относительно узком диапазоне концентраций тиосульфата $1 \cdot 10^{-6}...1 \cdot 10^{-5}$ М и описывается уравнением (рис. 3, б):

$$I_{p,1} [A] = 0,0393c[M] + 1,0210 \cdot 10^{-7} \quad (R^2 = 0,9976). \quad (1)$$

Аналогичная зависимость для $I_{p,2}$ является линейной в более широком интервале концентраций $1 \cdot 10^{-7}...1 \cdot 10^{-5}$ М и описывается уравнением (рис. 2, б):

$$I_{p,2} [A] = 1,3836c[M] + 3,5511 \cdot 10^{-7} \quad (R^2 = 0,9979). \quad (2)$$

Из сопоставления приведенных регрессионных уравнений (1), (2) следует, что концентрационная зависимость для $I_{p,1}$ характеризуется меньшим на два порядка угловым коэффициентом (чувствительностью) по сравнению с таковым для $I_{p,2}$ при более высоких потенциалах.

С целью определения причин различной формы максимумов первого и второго анодного токов, а также различной величины этих сигналов при одинаковом содержании анализируемого вещества в растворе были проведены расчеты зависимостей равновесных активностей ионно-молекулярных форм серы, участвующих в электродных процессах, от потенциала (ст. в. э.) с учётом начальной концентрации $S_2O_3^{2-}$ -ионов. Вычисления проводили при помощи программного пакета Chemical Equilibrium Diagrams. Расчетная диаграмма для системы S–H₂O представлена на рис. 4, а. Из диаграммы следует, что при заданном значении $pH=7$ основными устойчивыми серосодержащими формами в водном растворе являются сероводород при потенциалах отрицательнее $-0,2$ В, элементарная сера в интервале потенциалов $-(0,4...0,15)$ В с максимальной активностью при $-0,22$ В

и сульфат-ионы при потенциалах положительнее – 0,15 В. В области потенциала –0,22 В возможно образование следовых количеств полисульфидов с активностями на уровне 10^{-11} моль/л (на диаграмме не показаны). При заданных условиях расчёта равновесная

концентрация тиосульфат-ионов также низка и находится на уровне 10^{-10} моль/л при $E = -0,22$ В, что свидетельствует о метастабильности тиосульфата по сравнению с отображёнными на диаграмме серосодержащими соединениями.

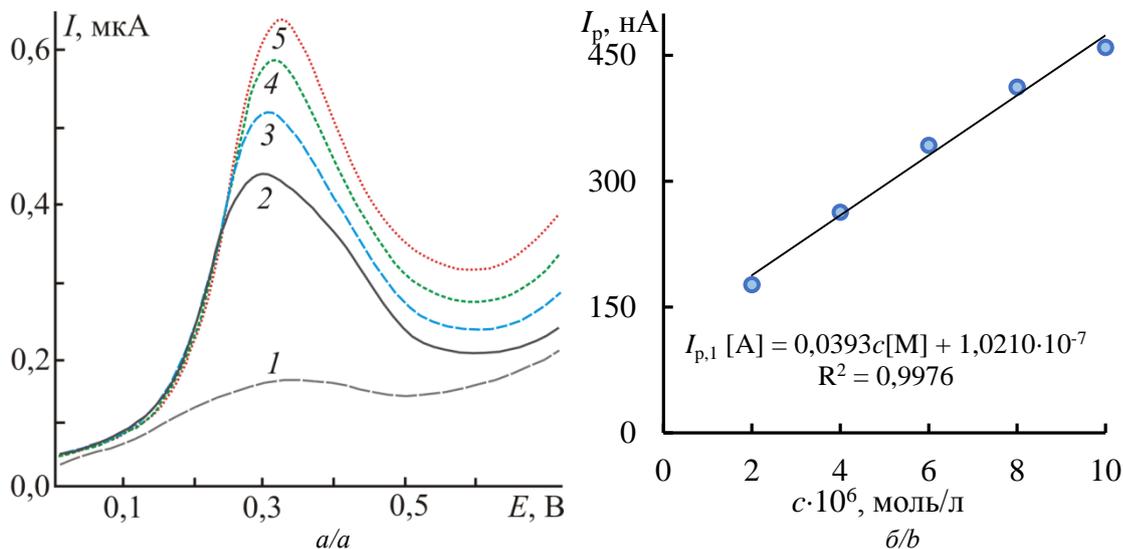


Рис. 3. а) вольтамперограммы модифицированного электрода AuУКЭ в растворах 0,05 М $KNO_3 + Na_2S_2O_3$ ($E_{нач} = 0,0$ В, $E_{кон} = 0,6$ В, $v = 100$ мВ/с, $pH = 7$, деаэрирование растворов азотом) при различных концентрациях тиосульфата натрия, М: 1) фоновая кривая; 2) $2 \cdot 10^{-6}$; 3) $4 \cdot 10^{-6}$; 4) $6 \cdot 10^{-6}$; 5) $8 \cdot 10^{-6}$; б) зависимость тока окисления $I_{p,1}$ при $E_{p,1} \approx 0,3$ В от концентрации $S_2O_3^{2-}$ -ионов в растворе (фоновый электролит 0,05 М KNO_3)

Fig. 3. a) voltammograms of the modified AuCCE electrode in solutions of 0,05 M $KNO_3 + Na_2S_2O_3$ ($E_{init} = 0,0$ V, $E_{final} = 0,6$ V, $v = 100$ mV/s, $pH = 7$, solutions were deaerated with nitrogen) at different concentrations of sodium thiosulfate, M: 1) the blank curve; 2) $2 \cdot 10^{-6}$; 3) $4 \cdot 10^{-6}$; 4) $6 \cdot 10^{-6}$; 5) $8 \cdot 10^{-6}$; b) the dependence of the oxidation current $I_{p,1}$ at $E_{p,1} \approx 0,3$ V on concentration of $S_2O_3^{2-}$ ions in solutions (supporting electrolyte 0,05 M KNO_3)

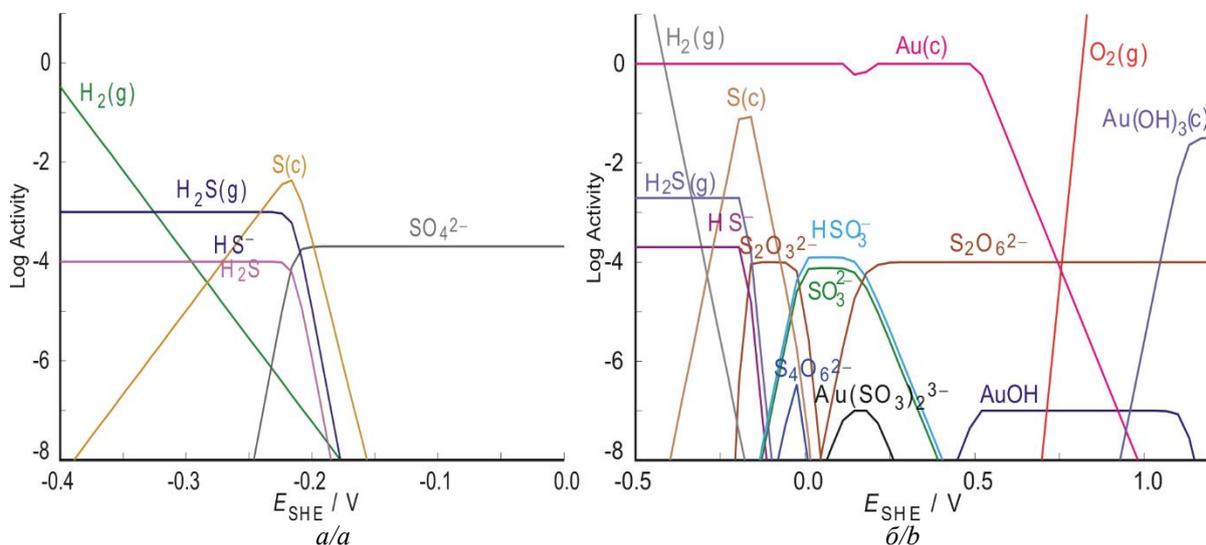


Рис. 4. Расчётные диаграммы «активность–потенциал» а) равновесных ионно-молекулярных форм в системе S–H₂O и б) метастабильных ионно-молекулярных форм (при отсутствии SO_4^{2-} -ионов) в системе S–Au–H₂O при $pH = 7$, $[S]_{сум} = 1 \cdot 10^{-4}$ М, $[Au]_{сум} = 1 \cdot 10^{-7}$ М, $t = 25$ °С

Fig. 4. Calculated diagrams «activity–potential» a) for equilibrium ion-molecular species in the S–H₂O system and b) for metastable ion-molecular species (in the absence of SO_4^{2-} ions) in the S–Au–H₂O system at $pH = 7$, $[S]_{tot} = 1 \cdot 10^{-4}$ M, $[Au]_{tot} = 1 \cdot 10^{-7}$ M, $t = 25$ °С

Из анализа диаграммы (рис. 4, а) следует, что при потенциалах положительнее –0,15 В в системе не должны протекать процессы окисления по причине

отсутствия в ней способных окисляться ионно-молекулярных форм. По-видимому, фиксируемые на вольтамперограммах анодные токи при потенциалах

0,1...0,6 и 0,8...1,3 В (х. с. э.) связаны с участием в электродном процессе промежуточных продуктов окисления тиосульфат-ионов. Считают [25], что продуктом непосредственного окисления $S_2O_3^{2-}$ -ионов на Au-электроде являются тетраионат-ионы. Процесс при $pH \approx 7$ протекает в области потенциалов 0,1...0,3 В (ст. в. э.), является необратимым с наложением химической стадии, сопровождается образованием серы и осложняется растворением металла с образованием комплексов [25, 26]. Вместе с тем потенциалы образования $S_4O_6^{2-}$ -ионов также существенно ниже наблюдаемых в эксперименте.

Таблица 1. Потенциалы максимумов анодных токов окисления тиосульфат-ионов на модифицированном электроде AuУКЭ в различных фоновых электролитах ($E_{нач}=0,0$ В, $E_{кон}=1,4$ В, $v=100$ мВ/с, $pH=7$, деаэрирование растворов азотом)

Table 1. Peak potentials of anodic oxidation of thiosulfate ions at the modified electrode AuCCE in different supporting electrolytes ($E_{init}=0,0$ V, $E_{final}=1,4$ V, $v=100$ mV/s, $pH=7$, solutions were deaerated with nitrogen)

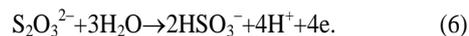
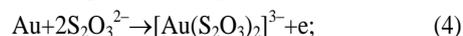
$c(Na_2S_2O_3)$, М	0,05 М KNO_3		0,05 М Na_2SO_4
	$E_{p,1}$	$E_{p,2}$	$E_{p,2}$
$1 \cdot 10^{-7}$	–	1,04	1,07
$2 \cdot 10^{-7}$	–	1,05	1,07
$4 \cdot 10^{-7}$	–	1,06	1,07
$6 \cdot 10^{-7}$	–	1,06	1,07
$8 \cdot 10^{-7}$	–	1,06	1,07
$1 \cdot 10^{-6}$	0,38	1,07	1,07
$2 \cdot 10^{-6}$	0,37	1,08	1,07
$4 \cdot 10^{-6}$	0,29	1,10	1,07
$6 \cdot 10^{-6}$	0,29	1,13	1,08
$8 \cdot 10^{-6}$	0,29	1,16	1,10
$1 \cdot 10^{-5}$	0,29	1,22	1,11
$2 \cdot 10^{-5}$	0,29	1,24	–
$4 \cdot 10^{-5}$	0,28	–	–
$6 \cdot 10^{-5}$	0,27	–	–
$8 \cdot 10^{-5}$	0,27	–	–
$1 \cdot 10^{-4}$	0,27	–	–
$2 \cdot 10^{-4}$	0,27	–	–

Для определения термодинамически вероятных промежуточных продуктов окисления тиосульфата из набора кислотно-основных и окислительно-восстановительных равновесий были исключены реакции с участием сульфат-ионов. Полученная расчётная диаграмма метастабильных форм в системе S–Au– H_2O с низкими степенями окисления серы приведена на рис. 4, б. Диаграмма содержит несколько промежуточных соединений со степенью окисления серы ниже +6 (отсутствуют на равновесной диаграмме, рис. 4, а) с различными интервалами потенциалов устойчивости: тиосульфат- ($-0,2...-0,05$ В), тетраионат- ($-0,08...0,0$ В), гидросульфит- ($-0,12...0,4$ В) и дитионат-ионы (положительнее 0,05 В). Расчётные активности гидросульфит- и дитионат-ионов в растворе принимают значения одного порядка, при этом активность тетраионат-ионов на два порядка ниже. Нужно отметить, что область устойчивости элементной серы в этих условиях существенно смещена в сторону положительных потенциалов по сравнению с

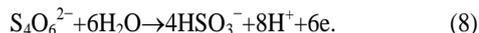
диаграммой равновесных форм с участием SO_4^{2-} -ионов (рис. 4, а). Для золота на диаграмме (рис. 4, б) отмечен эффект растворения в области потенциалов 0,1...0,2 В с образованием комплексов $[Au(SO_3)_2]^{3-}$ ($pK_n \approx 27$) и $[Au(S_2O_3)_2]^{3-}$ ($E^0=0,15$ В, $pK_n=26$ [27]), устойчивость которых сравнима с устойчивостью аналогичных комплексов ртути. Активность сульфитного комплекса существенно выше, чем тиосульфатного, вследствие окисления последнего в рассматриваемой области потенциалов [27]. В соответствии с расчётными данными при фиксируемом потенциале начала анодного окисления $\sim 0,1$ В (рис. 3, а) должны преобладать процессы с участием SO_3^{2-} -ионов и частиц Au.

Из данных Раман-спектроскопии известно [25, 26], что при контакте золота с растворами тиосульфатов при отсутствии внешней поляризации на поверхности металла формируется адсорбционный слой серы. При анодной поляризации до 0,4 В (ст. в. э.) на поверхности золота формируется тонкий слой сульфидов и начинают адсорбироваться тетраионат-ионы. После появления тетраионат-ионов интенсивность сигнала от сульфидов золота начинается ослабевать, этот сигнал исчезает при 0,56 В. При этом потенциале начинается катенация серы с образованием поверхностного полимеризованного слоя, который приводит к пассивации Au-электрода при достижении потенциала 0,6 В [25].

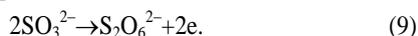
На основании результатов расчётов (рис. 4) и литературных данных [25–28] анодный процесс в области потенциалов $E_{p,1}=0,2...0,6$ В (рис. 2, 3) можно интерпретировать следующим образом. Незначительное увеличение анодного тока на вольтамперограмме в области потенциалов 0,05...0,2 В (рис. 2, а) соответствует началу анодной поляризации электрода от стационарного потенциала ($\sim 0,05$ В) до начала интенсивного повышения анодного тока. В этом диапазоне потенциалов протекает несколько параллельных процессов: хемосорбция тиосульфат-ионов с образованием сульфидного субмонослоя, а также сульфит-ионов; растворение золота с образованием тиосульфатного комплекса и его частичное окисление до сульфитного; окисление тиосульфат-ионов с образованием тетраионат-ионов:



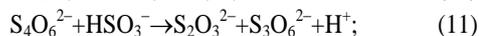
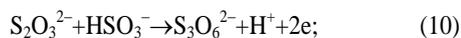
Результатом протекания совокупности процессов (3)–(6) является образование на поверхности Au хемосорбированной (сульфидной) серы, а также сульфит- и тетраионат-ионов. Накопление этих промежуточных продуктов приводит к повышению анодного тока в интервале потенциалов 0,2...0,6 В, отображающегося на вольтамперограмме в виде двух волн ($E_{max} \approx 0,35$ и 0,5 В) при относительно высокой концентрации тиосульфат-ионов в растворе порядка 10^{-4} М (рис. 2, а). В области первой волны происходит окисление хемосорбированной серы и тетраионат-ионов:



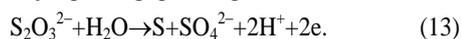
При потенциале второй волны (~0,5 В) происходит окисление сульфита:



При заданных условиях эксперимента образующиеся дитионат-ионы в электродных и химических стадиях не участвуют. Возможность использования величины анодного тока при $E\approx 0,5$ В (х. с. э.) в аналитических целях для определения сульфита по реакции (9) продемонстрирована в работе [29]. Накопление в системе высокорекреационноспособных промежуточных продуктов окисления тиосульфата, образующихся в результате протекания электродных реакций (4)–(9), инициирует ряд побочных реакций с участием полиотионов, разложение которых приводит к образованию серы:



Необходимо отметить, что протекание химических и электродных реакций (6)–(8), (10)–(12) сопровождается подкислением среды прианодного слоя раствора, что также способствует образованию серы за счет разложения тиосульфата. Осаждение серы на поверхности электрода сопровождается её катенацией с образованием полимеризованного слоя, пассивирующего поверхность Au (рис. 3, а). Эффект пассивации Au-электрода в сходных экспериментальных условиях наблюдали в работах [25, 26]. Таким образом, процесс окисления тиосульфат-ионов в области потенциалов 0,2...0,6 В может быть представлен в виде суммарного уравнения (13), содержащего устойчивые в условиях эксперимента ионно-молекулярные формы серы:



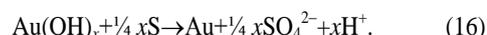
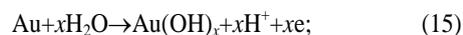
Из анализа совокупности электродных и химических реакций, протекающих на AuУКЭ в области потенциалов $E<0,6$ В, следует, что аналитический сигнал $I_{\text{p},1}$ зависит от большого числа трудно контролируемых факторов, прежде всего от концентрации и стабильности образующихся промежуточных продуктов окисления тиосульфат-ионов и степени блокирования активной поверхности частиц золота осадком серы. Эти особенности позволяют объяснить достаточно узкий концентрационный диапазон, в котором зависимость $I_{\text{p},1}=f[c(\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3)]$ является линейной, а также низкое значение углового коэффициента концентрационной зависимости (рис. 3, б). Следовательно, использование тока анодного окисления $I_{\text{p},1}$ при $E<0,6$ В для определения тиосульфат-ионов нецелесообразно.

В отличие от первого анодного максимума, анодный ток $I_{\text{p},2}$ в интервале потенциалов 0,8...1,3 В характеризуется на порядок большими значениями (рис. 2, а), зависимость $I_{\text{p},2}=f[c(\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3)]$ является линейной в широком интервале концентраций $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ -ионов $1\cdot 10^{-7}$... $1\cdot 10^{-5}$ М и характеризуется высоким значением углового коэффициента (рис. 2, б). Из ре-

зультатов работы [30] по анодному окислению осажденных на поверхность золота плёнок серы следует, что при данных условиях основной электродной реакцией является окисление серы до сульфат-ионов:



Существенное повышение тока $I_{\text{p},2}$ по сравнению с $I_{\text{p},1}$ при одной и той же концентрации $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ -ионов в растворе свидетельствует, с одной стороны, о значительном накоплении серы на поверхности частиц Au за время нарастания потенциала в условиях линейной поляризации, с другой – об электрокаталитической природе процесса (14). Действительно, при $E>0,8$ В происходит формирование метастабильных (гидр)оксидов золота [31] в качестве медиаторов по реакции (15), обуславливающих повышение величины анодного тока за счет каталитической составляющей электродного процесса:



Очевидно, что доля каталитического тока существенно возрастает за счет участия в процессе окисления частиц золота наноразмерного диапазона (рис. 1). Таким образом, анодный ток в области потенциалов 0,8...1,3 В может быть использован в качестве аналитического сигнала для определения достаточно низких концентраций тиосульфат-ионов. Чувствительность метода повышается за счет накопления серы на поверхности частиц Au вследствие протекания электродных и химических реакций с участием многочисленных промежуточных продуктов окисления $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ -ионов, каталитической составляющей тока, а также малых размеров (высокой площади удельной поверхности) частиц Au.

Для уточнения влияния массопереноса на анодный процесс была изучена зависимость величины тока $I_{\text{p},2}$ от скорости развертки потенциалов v . Из полученных данных следует (рис. 5), что зависимость $I_{\text{p},2}=f(v)$ является линейной как от скорости, так и от корня квадратного из скорости развертки потенциалов. По этому признаку, а также по отсутствию на ЦВА катодных токов, соответствующих рассматриваемым анодным токам, и по линейной зависимости $E_{\text{p}}-I_{\text{p}}v$ электродный процесс является необратимым, содержит замедленную стадию диффузии и сопровождается поверхностной реакцией. Образование пассивирующего слоя серы на поверхности частиц Au и протекание поверхностной химической реакции (16) согласуются с этим заключением.

Стабильность работы модифицированного электрода AuУКЭ при продолжительном использовании без обновления его поверхности изучали путем многократной регистрации вольтамперограмм в растворах 0,05 М KNO_3 + $1\cdot 10^{-4}$ М $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ с последующим измерением количества электричества, прошедшего через электрод при поляризации в 0,05 М H_2SO_4 до более высоких положительных потенциалов $E_{\text{кон}}=1,5$ В (рис. 6). Из результатов измерений следует, что многократная регистрация аналитического сигнала (1000 раз) приводит к снижению активной поверхно-

сти электрода на ~20 %. Следовательно, при протекании электродных реакций дисперсность частиц Au и структура их поверхностного слоя не подвергаются

существенным изменениям, электрод может быть многократно использован для регистрации сигнала без обновления поверхности.

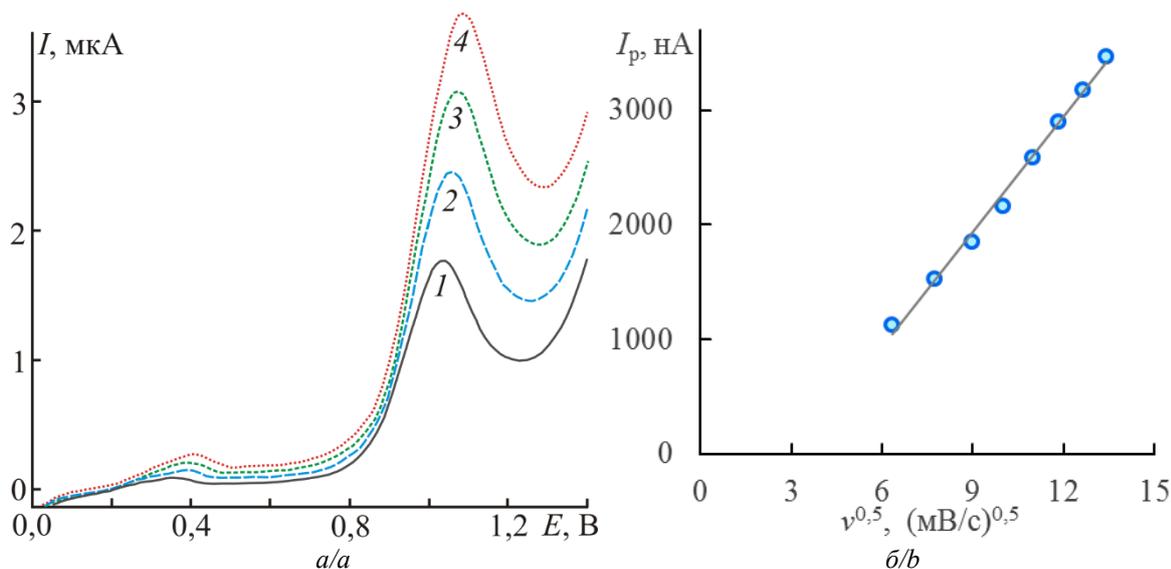


Рис. 5. а) вольтамперограммы модифицированного электрода AuУКЭ в растворе $0,05 \text{ M Na}_2\text{SO}_4 + 1 \cdot 10^{-4} \text{ M Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ($E_{\text{нач}}=0,0 \text{ В}$, $E_{\text{кон}}=1,4 \text{ В}$, $\text{pH}=7$, деаэрирование растворов азотом) при различной скорости развертки потенциалов, мВ/с: 1) 40; 2) 60; 3) 80; 4) 100; б) зависимость тока окисления $I_{p,2}$ при $E_{p,2} \approx 1,1 \text{ В}$ от корня квадратного из скорости развертки потенциала в интервале $v=40 \dots 180 \text{ мВ/с}$ (фоновый электролит $0,05 \text{ M Na}_2\text{SO}_4$)

Fig. 5. a) voltammograms of the modified AuCCE electrode in a solution of $0,05 \text{ M Na}_2\text{SO}_4 + 1 \cdot 10^{-4} \text{ M Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ($E_{\text{init}}=0,0 \text{ V}$, $E_{\text{final}}=1,4 \text{ V}$, $\text{pH}=7$, solutions were deaerated with nitrogen) at different potential sweep rates, mV/s: 1) 40; 2) 60; 3) 80; 4) 100; b) dependence of anodic current $I_{p,2}$ at $E_{p,2} \approx 1,1 \text{ V}$ on the square root of the potential sweep rate in the range of $v=40 \dots 180 \text{ mV/s}$ (supporting electrolyte $0,05 \text{ M Na}_2\text{SO}_4$)

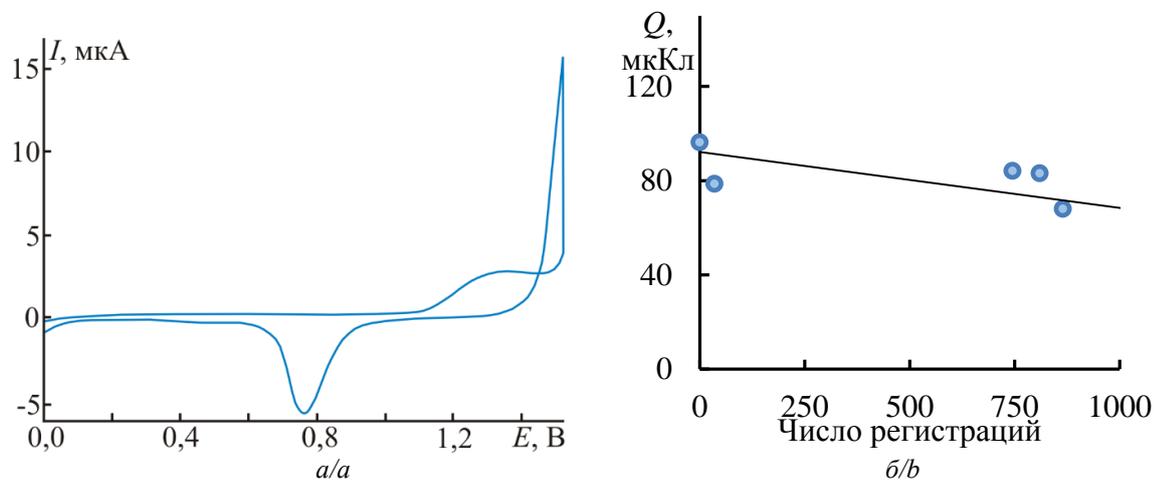


Рис. 6. а) циклическая вольтамперограмма модифицированного электрода AuУКЭ в растворе $0,05 \text{ M H}_2\text{SO}_4$ ($E_{\text{нач}}=0,0 \text{ В}$, $E_{\text{кон}}=1,5 \text{ В}$, $v=100 \text{ мВ/с}$, деаэрирование раствора азотом); б) зависимость количества электричества Q , затраченного на катодное восстановление (гидроксидов Au в интервале потенциалов $1,0 \dots 0,6 \text{ В}$, от числа регистраций вольтамперограмм в растворе $0,05 \text{ M Na}_2\text{SO}_4 + 1 \cdot 10^{-4} \text{ M Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ без обновления поверхности электрода

Fig. 6. a) cyclic voltammogram of the modified AuCCE electrode in a solution of $0,05 \text{ M H}_2\text{SO}_4$ ($E_{\text{init}}=0,0 \text{ V}$, $E_{\text{final}}=1,5 \text{ V}$, $v=100 \text{ mV/s}$, solutions were deaerated with nitrogen); b) dependence of the amount of electricity Q consumed during cathodic reduction of Au (hydr)oxides in the potential range of $1,0 \dots 0,6 \text{ V}$ on the number of the voltammogram recordings in a solution of $0,05 \text{ M Na}_2\text{SO}_4 + 1 \cdot 10^{-4} \text{ M Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ without renewing the electrode surface

Оценку правильности результатов определения концентрации $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ -ионов по предлагаемому методу проводили с использованием метода добавок. Для этого первоначально регистрировали вольтамперо-

грамму в 20 мл деаэрированного раствора фонового электролита ($0,05 \text{ M Na}_2\text{SO}_4$ или KNO_3), затем вводили в ячейку при помощи микродозатора раствор $10^{-4} \text{ M Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ и снова измеряли аналитический сигнал.

Каждое измерение проводили три раза. Для вычисления предела обнаружения c_{\min} использовали метод Кайзера, нижнюю границу определяемых концентраций c_{\lim} находили из зависимости относительного стандартного отклонения s_r от содержания анализа при условии $s_r \leq 0,33$ [32]. Результаты определения тиосульфата приведены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты определения тиосульфат-ионов в растворах методом «введено–найденно» ($V_{\text{нач}}(0,05 \text{ M KNO}_3)=20 \text{ мл}$; $E_{\text{нач}}=0,0 \text{ В}$; $E_{\text{кон}}=1,4 \text{ В}$; $v=100 \text{ мВ/с}$; деаэрирование растворов азотом); $n=3$; $P=0,95$; $t(P, f)=4,3$

Table 2. Results of the determination of $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ ions in solutions using the «introduced–found» procedure ($V_{\text{init}}(0,05 \text{ M KNO}_3)=20 \text{ ml}$; $E_{\text{init}}=0,0 \text{ В}$; $E_{\text{final}}=1,4 \text{ В}$; $v=100 \text{ мВ/с}$; solutions were deaerated with nitrogen); $n=3$; $P=0,95$; $t(P, f)=4,3$

Введено $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$, $c \cdot 10^6 \text{ М}$ Introduced $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$, $c \cdot 10^6 \text{ М}$	Найдено $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$, $c \cdot 10^6 \text{ М}$ Found $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$, $c \cdot 10^6 \text{ М}$
0,20	0,20±0,03
0,40	0,40±0,03
0,60	0,60±0,02
0,80	0,81±0,02
1,00	1,05±0,02

Примечание: предел обнаружения $c_{\min}=5 \cdot 10^{-8} \text{ М}$ (7,9 мкг/л), нижняя граница определяемых концентраций $c_{\lim}=1,2 \cdot 10^{-7} \text{ М}$.
 Note: detection limit $c_{\min}=5 \cdot 10^{-8} \text{ М}$ (7,9 $\mu\text{g} \cdot \text{л}^{-1}$), the lower limit of the determined concentration $c_{\lim}=1,2 \cdot 10^{-7} \text{ М}$.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что качество измерений является удовлетворительным. Погрешность определения в области наиболее низких заданных концентраций $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ -ионов не превышает 15 % (табл. 2). Известно, что наиболее распространенными сопутствующими соединениями в тиосульфат-содержащих растворах являются сульфиды и сульфиты [4]. При разработке методики определения тиосульфата на основе результатов настоящей работы для устранения мешающего влияния этих соединений могут быть использованы осадители и/или маскирующие реагенты, применяемые при определении тиосульфата в аналитической практике (например, сульфит-ионы маскируют введением формальдегида в анализируемый раствор) [4].

Выводы

1. Анодное окисление тиосульфат-ионов на модифицированном частицами золота углеродсодер-

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. The impact and prospects of green chemistry for textile technology / Eds. Shahid-ul-Islam and B.S. Butola. – Kidlington: Woodhead Publishing, Elsevier, 2019. – 568 p.
2. Nashy E.-Sh. H.A., Eid K.A. High exhaustion of chrome tan, enhancement of leather properties and reduction of chrome tanning effluent impact // Egyptian Journal of Chemistry. – 2019. – V. 62. – № 3. – P. 415–428.
3. Basu O.D., De Souza N.P. Comparison of dechlorination rates and water quality impacts for sodium bisulfite, sodium thiosulfate and ascorbic acid // Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua. – 2011. – V. 60. – № 3. – P. 167–177.

жащем композитном электроде AuУКЭ в фоновых электролитах 0,05 М KNO_3 или 0,05 М Na_2SO_4 в условиях постоянноточковой вольтамперометрии с линейной разверткой потенциалов протекает в двух интервалах потенциалов $E=0,2 \dots 0,6 \text{ В}$ и $0,8 \dots 1,3 \text{ В}$ (х. с. э.) с максимумами анодного тока при $E_{p,1} \approx 0,35 \text{ В}$ и $E_{p,2} \approx 1,1 \text{ В}$. Величина анодного тока $I_{p,2}$ на порядок выше величины $I_{p,1}$, концентрационные зависимости величин $I_{p,1}$ и $I_{p,2}$ являются линейными в интервалах $c(\text{S}_2\text{O}_3^{2-})=2 \cdot 10^{-6} \dots 8 \cdot 10^{-6} \text{ М}$ и $1 \cdot 10^{-7} \dots 1 \cdot 10^{-5} \text{ М}$, соответственно. Показана целесообразность использования величины $I_{p,2}$ для определения низких концентраций $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ -ионов.

2. Интерпретация процессов, протекающих в наблюдаемых интервалах потенциалов, проведена на основе расчетов диаграммы метастабильных ионно-молекулярных форм в системе $\text{S}-\text{Au}-\text{H}_2\text{O}$, а также литературных данных. Показано, что максимум анодного тока в области $E_{p,1}$ обусловлен протеканием совокупности электродных и химических реакций с участием промежуточных продуктов окисления тиосульфата (сульфит- и поли-тионат-ионов, серы, комплексов Au). Основным процессом в области $E_{p,2}$ является анодное окисление серы с наложением электрокаталитического процесса с участием (гидр)оксидов Au.
3. Установлены условия вольтамперометрического определения тиосульфат-ионов на AuУКЭ: режим регистрации аналитического сигнала – вольтамперометрия постоянного тока с линейной разверткой потенциалов, скорость развертки $v=100 \text{ мВ/с}$; нейтральный фоновый электролит 0,05 М KNO_3 или 0,05 М Na_2SO_4 ; область потенциалов регистрации аналитического сигнала: $E_{\text{нач}}=0,0 \text{ В}$, $E_{\text{кон}}=1,4 \text{ В}$ (х. с. э.); природа аналитического сигнала: ток анодного окисления I_p в области потенциалов $0,8 \dots 1,3 \text{ В}$, $E_{p,2} \approx 1,1 \text{ В}$; линейность концентрационной зависимости аналитического сигнала наблюдается в интервале концентраций $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ -ионов $1 \cdot 10^{-7} \dots 1 \cdot 10^{-5} \text{ М}$; предел обнаружения $c_{\min}=5 \cdot 10^{-8} \text{ М}$ (7,9 мкг/л), нижняя граница определяемых концентраций $c_{\lim}=1,2 \cdot 10^{-7} \text{ М}$.
4. Полученные в работе результаты могут быть использованы при разработке (усовершенствовании) методик определения низких концентраций $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ -ионов в технологических растворах, объектах окружающей среды, продуктах питания.

4. The importance of thiosalts speciation: review of analytical methods, kinetics, and treatment / J.C. Miranda-Trevino, M. Pappoe, K. Hawboldt, C. Bottaro // Critical Reviews in Environmental Science and Technology. – 2013. – V. 43. – P. 2013–2070.
5. Leaching behavior of gold and silver from concentrated sulfide ore using ammonium thiosulfate / M. Bae, S. Kim, J. Sohn, D. Yang, H. Lee // Metals. – 2020. – V. 10. – P. 1029 (1–9).
6. Sodium thiosulfate improves intestinal and hepatic microcirculation without affecting mitochondrial function in experimental sepsis / J. Schulz, S. Kramer, Y. Kanatli, A. Kuebart, I. Bauer, O. Picker, C. Vollmer, R. Truse, A. Herminghaus // Frontiers in Immunology. – 2021. – V. 12. – P. 671935 (1–12).

7. Hydrogen sulfide metabolite, sodium thiosulfate: clinical applications and underlying molecular mechanisms / M.Y. Zhang, G.J. Dugbartey, S. Juriasingani, A. Sener // *International Journal of Molecular Sciences*. – 2021. – V. 22. – P. 6452 (2–13).
8. Yates S.R., Ashworth D.J., Zhang Q. Effect of surface application of ammonium thiosulfate on field-scale emissions of 1,3-dichloropropene // *Science of the Total Environment*. – 2017. – V. 580. – P. 316–323.
9. Effects of thiosulfate as a sulfur source on plant growth, metabolites accumulation and gene expression in arabidopsis and rice / T. Nakajima, Y. Kawano, I. Ohtsu, A. Maruyama-Nakashita, A. Allahham, M. Sato, Y. Sawada, Y.M. Hirai, T. Yokoyama, N. Ohkama-Ohtsu // *Plant Cell Physiology*. – 2019. – V. 60. – № 8. – P. 1683–1701.
10. СанПиН 2.3/2.4.3590-20. Санитарно-эпидемиологические требования к организации общественного питания населения. – Ростов н/Д: Феникс, 2021. – 76 с.
11. Hemmingsen T. The electrochemical reaction of sulfur – oxygen compounds. P. I. A review of literature on the electrochemical properties of sulphur/sulphur – oxygen compounds // *Electrochim. Acta*. – 1992. – V. 37. – № 15. – P. 2775–2784.
12. Ciglenečki I., Čosović B. Electrochemical determination of thiosulfate in seawater in the presence of elemental sulfur and sulfide // *Electroanalysis*. – 1997. – V. 9. – № 10. – P. 775–780.
13. Krista J., Kopanica M., Novotný L. Cathodic stripping voltammetry of thiosulphate at toxic concentrations // *Analytica Chimica Acta*. – 1999. – V. 386. – № 3. – P. 221–228.
14. Al electrode modified by Au atoms as a novel electrode for electrocatalytic oxidation of thiosulfate / R.E. Sabzi, A. Hassanzadeh, P. Heravi, K. Ghasemlu // *Journal of the Chinese Chemical Society*. – 2007. – V. 54. – P. 977–982.
15. Eftekhari A. Electrochemical behavior and electrocatalytic activity of a zinc hexacyanoferrate film directly modified electrode // *Journal of Electroanalytical Chemistry*. – 2002. – V. 537. – P. 59–66.
16. Pourmoghni-Azar M.H., Razmi H. Electrocatalytic characteristics of thiosulfate oxidation at nickel plated aluminum electrode modified with nickel pentacyanonitrosylferrate films // *Electroanalysis*. – 2001. – V. 13. – № 6. – P. 465–470.
17. Amperometric determination of thiosulfate at a surface-renewable nickel(II) hexacyanoferrate-modified carbon ceramic electrode / P. Wang, Y. Yuan, X. Jing, G. Zhu // *Talanta*. – 2001. – V. 53. – P. 863–869.
18. Shankaran D.R., Narayanan S.S. Amperometric sensor for thiosulphate based on cobalt hexacyanoferrate modified electrode // *Sensors and Actuators B: Chemical*. – 2002. – V. 86. – № 2–3. – P. 180–184.
19. Salimi A., Roushani M., Hallaj R. Micromolar determination of sulfur oxoanions and sulfide at a renewable sol–gel carbon ceramic electrode modified with nickel powder // *Electrochimica Acta*. – 2006. – V. 51. – № 10. – P. 1952–1959.
20. Ensafi A.A., Soleymani H.A., Mirmomtaz E. Determination of sulfur contents of SO_3^{2-} , $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ and S^{2-} based on the electrocatalytic interaction with homogeneous mediator tris(2,2'-bipyridyl)Ru(II) // *Microchemical Journal*. – 2008. – V. 89. – P. 108–115.
21. Raouf J.B., Ojani R., Karimi-Maleh H. Electrocatalytic oxidation of thiosulfate at 2,7-bis(ferrocenylethyl)-fluoren-9-one-modified carbon paste electrode (2,7-BFEFMCPE): Application to the catalytic determination of thiosulfate in real sample // *Chinese Chemical Letters*. – 2010. – V. 21. – № 12. – P. 1462–1466.
22. Casella I.G., Contursi M., Desimoni E. Amperometric detection of sulfur-containing compounds in alkaline media // *Analyst*. – 2002. – V. 127. – № 5. – P. 647–652.
23. Electrocatalytic oxidation and ion chromatography detection of $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$, SO_3^{2-} , I^- and SCN^- at glassy carbon electrode with functionalized multi-wall carbon nanotubes film / J.-M. Xu, Y.-P. Wang, Y.-Z. Xian, L. Jin // *Chemical Research in Chinese Universities*. – 2004. – V. 20. – № 5. – P. 529–533.
24. Amperometric determination of sodium thiosulfate using boron-doped diamond electrodes applied to flow injection analysis / V. Suryanarayanan, Y. Zhang, S. Yoshihara, T. Shirakashi // *Sensors and Actuators B: Chemical*. – 2004. – V. 102. – № 1. – P. 169–173.
25. A spectroelectrochemical study of surface species formed in the gold/thiosulfate system / R. Woods, G.A. Hope, K.M. Watling, M.I. Jeffrey // *Journal of The Electrochemical Society*. – 2006. – V. 153. – № 7. – P. 105–113.
26. SERS and electrochemical studies of the gold–electrolyte interface under thiosulfate based leaching conditions / J.Y. Baron, J. Mirza, E. Nicol, S.R. Smith, J.J. Leitch, Y. Choi, J. Lipkowski // *Electrochimica Acta*. – 2013. – V. 111. – P. 390–399.
27. Green T.A., Roy S. Speciation analysis of Au(I) electroplating baths containing sulfite and thiosulfate // *Journal of The Electrochemical Society*. – 2006. – V. 153. – № 3. – P. C157–C163.
28. Electrolytic oxidation of sodium thiosulfate solution / F. Yokosuka, M. Takizawa, A. Okuwaki, T. Okabe // *Chemistry Letters*. – 1974. – V. 3. – № 4. – P. 319–322.
29. Kovaleva S.V., Aksinenko O.S., Korshunov A.V. Electrooxidation of sulfite ions on a composite carbon-containing electrode modified with submicron gold particles // *Journal of Analytical Chemistry*. – 2020. – V. 75. – № 10. – P. 1348–1357.
30. Electro-oxidation of thiosulphate ion gold. Study by means of cyclic voltammetry and auger electron spectroscopy / A.M. Pedraza, I. Villegas, P.L. Freund, B. Chornik // *Journal of Electroanalytical Chemistry*. – 1988. – V. 250. – P. 443–449.
31. Burke L.D., Nugent P.F. The electrochemistry of gold. I. The redox behaviour of the metal in aqueous media // *Gold Bulletin*. – 1997. – V. 30. – P. 43–53.
32. Doerffel K. Statistik in der analytischen chemie. – Leipzig: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1990. – 256 s.

Поступила 24.11.2021 г.

Информация об авторах

Аксиненко О.С., методист Управления образования Администрации Томского района.

Коршунов А.В., доктор химических наук, профессор кафедры строительного материаловедения Московского государственного строительного университета.

Ковалева С.В., доктор химических наук, профессор кафедры химии и методики обучения химии биолого-химического факультета Томского государственного педагогического университета.

UDC 661.8:542:543.552:546.59

VOLTAMMETRIC DETERMINATION OF THIOSULFATE IONS AT A CARBON-CONTAINING COMPOSITE ELECTRODE MODIFIED WITH GOLD PARTICLES

Olga S. Aksinenko¹,
crumba88@mail.ru

Andrey V. Korshunov²,
korshunovav@mgsu.ru

Svetlana V. Kovaleva³,
svetkovaleva@rambler.ru

¹ Department of Education, Tomsk District Administration,
2a, Kooperativny lane, Tomsk, 634009, Russia.

² Moscow State University of Civil Engineering,
26, Yaroslavskoe highway, Moscow, 129337, Russia.

³ Tomsk State Pedagogical University,
60, Kievskaya street, Tomsk, 634061, Russia.

Relevance. Thiosulfates are widely used in industry (textile production, water treatment, metal extraction), agriculture (plant bloom control, soil fumigation, fertilizers), medicine (detoxification therapy), analytical chemistry. The areas of practical application of thiosulfates are determined by their high reducing and complexing activity, as well as by their oxidation products of practical significance (colloidal sulfur, polythionates). Despite the long experience of practical use of thiosulfates, the search for express, sensitive and accessible methods of their determination in technological media, environmental objects, and food is still ongoing. In this regard, the improvement of methods for the determination of thiosulfates is an urgent task.

Purpose: to determine the conditions for obtaining an analytical signal during the electrooxidation of thiosulfate ions using a carbon-containing composite electrode modified with gold particles.

Objects: sodium thiosulfate solutions.

Methods: DC voltammetry with linear potential sweep, cyclic voltammetry, scanning electron microscopy, energy-dispersive X-ray spectroscopy, modeling of redox equilibria.

Results. Electrooxidation of thiosulfate ions at a carbon-containing composite electrode modified with gold particles under conditions of direct current voltammetry with linear potential sweep (supporting electrolytes 0,05 M KNO₃ or 0,05 M Na₂SO₄) proceeds at potentials of 0,2...0,6 and 0,8...1,3 V (vs. Ag/AgCl/KCl electrode) with anodic current maxima at $E_{p,1} \approx 0,3$ and $E_{p,2} \approx 1,1$ V. The value of the anode current of $I_{p,2}$ is an order of magnitude higher than the value of $I_{p,1}$, the concentration dependences of $I_{p,1}$ and $I_{p,2}$ are linear in the intervals $c(S_2O_3^{2-}) = 1 \cdot 10^{-6} \dots 1 \cdot 10^{-5}$ and $1 \cdot 10^{-7} \dots 1 \cdot 10^{-5}$ M, respectively. The interpretation of electrode processes was carried out using calculated diagrams of metastable ion-molecular species in the S–Au–H₂O system, as well as literature data. It was shown that anodic current in the $E_{p,1}$ region is caused by a combination of electrode and chemical reactions involving intermediate products of thiosulfate oxidation (sulfite, polythionate ions, sulfur, Au complexes). The main process at $E_{p,2}$ is anodic oxidation of sulfur accompanied with electrocatalytic cycle involving Au (hydr)oxides. The use of the value of $I_{p,2}$ at $E_{p,2} \approx 1,1$ V to determine S₂O₃²⁻ ions of low concentrations was shown to be reasonable. The accuracy of the measurement results and the stability of the electrode function were evaluated during multiple registration of the analytical signal. The detection limit of S₂O₃²⁻ ions according to the proposed method is $c_{min} = 5 \cdot 10^{-8}$ M (7,9 μg·l⁻¹), the lower limit of the determined concentration is $c_{lim} = 1,2 \cdot 10^{-7}$ M. The results obtained in the work can be used in the development (improvement) of methods for determining low concentrations of S₂O₃²⁻ ions in technological solutions, environmental objects, food.

Key words:

Thiosulfate ions, gold particles, carbon-containing composite electrode, neutral electrolytes, DC voltammetry, anodic oxidation, metastable ion-molecular species of sulfur.

REFERENCES

1. *The impact and prospects of green chemistry for textile technology.* Eds. Shahid-ul-Islam, B.S. Butola. Kidlington, Woodhead Publ., Elsevier, 2019. 568 p.
2. Nashy E.-Sh. H.A., Eid K.A. High exhaustion of chrome tan, enhancement of leather properties and reduction of chrome tanning effluent impact. *Egyptian Journal of Chemistry*, 2019, vol. 62, no. 3, pp. 415–428.
3. Basu O.D., De Souza N.P. Comparison of dechlorination rates and water quality impacts for sodium bisulfite, sodium thiosulfate and ascorbic acid. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*, 2011, vol. 60, no. 3, pp. 167–177.
4. Miranda-Trevino J.C., Pappoe M., Hawboldt K., Bottaro C. The importance of thiosalts speciation: review of analytical methods, kinetics, and treatment. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2013, vol. 43, pp. 2013–2070.
5. Bae M., Kim S., Sohn J., Yang D., Lee H. Leaching behavior of gold and silver from concentrated sulfide ore using ammonium thiosulfate. *Metals*, 2020, vol. 10, pp. 1029 (1–9).
6. Schulz J., Kramer S., Kanatli Y., Kuebart A., Bauer I., Picker O., Vollmer C., Truse R., Herminghaus A. Sodium thiosulfate improves intestinal and hepatic microcirculation without affecting mitochondrial function in experimental sepsis. *Frontiers in Immunology*, 2021, vol. 12, pp. 671935 (1–12).
7. Zhang M.Y., Dugbartey G.J., Juriasingani S., Sener A. Hydrogen sulfide metabolite, sodium thiosulfate: clinical applications and underlying molecular mechanisms. *International Journal of Molecular Sciences*, 2021, vol. 22, pp. 6452 (2–13).

8. Yates S.R., Ashworth D.J., Zhang Q. Effect of surface application of ammonium thiosulfate on field-scale emissions of 1,3-dichloropropene. *Science of the Total Environment*, 2017, vol. 580, pp. 316–323.
9. Nakajima T., Kawano Y., Ohtsu I., Maruyama-Nakashita A., Allahham A., Sato M., Sawada Y., Hirai Y.M., Yokoyama T., Ohkama-Ohtsu N. Effects of thiosulfate as a sulfur source on plant growth, metabolites accumulation and gene expression in arabidopsis and rice. *Plant Cell Physiology*, 2019, vol. 60, no. 8, pp. 1683–1701.
10. SanPiN 2.3/2.4.3590-20. *Sanitarno-epidemiologicheskie trebovaniya k organizatsii obshchestvennogo pitaniya naseleniya* [The Russ. Sanitary Rules and Regulations 2.3/2.4.3590-20. Sanitary and epidemiological requirements for the organization of public catering]. Rostov-on-Don, Phoenix, 2021. 76 p.
11. Hemmingsen T. The electrochemical reaction of sulfur – oxygen compounds. P. I. A review of literature on the electrochemical properties of sulphur/sulphur – oxygen compounds. *Electrochim. Acta*, 1992, vol. 37, no. 15, pp. 2775–2784.
12. Ciglencečki I., Čosović B. Electrochemical determination of thiosulfate in seawater in the presence of elemental sulfur and sulfide. *Electroanalysis*, 1997, vol. 9, no. 10, pp. 775–780.
13. Krista J., Kopanica M., Novotný L. Cathodic stripping voltammetry of thiosulphate at toxic concentrations. *Analytica Chimica Acta*, 1999, vol. 386, no. 3, pp. 221–228.
14. Sabzi R.E., Hassanzadeh A., Heravi P., Ghasemlu K. Al electrode modified by Au atoms as a novel electrode for electrocatalytic oxidation of thiosulfate. *Journal of the Chinese Chemical Society*, 2007, vol. 54, pp. 977–982.
15. Eftekhari A. Electrochemical behavior and electrocatalytic activity of a zinc hexacyanoferrate film directly modified electrode. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 2002, vol. 537, pp. 59–66.
16. Pournaghi-Azar M.H., Razmi H. Electrocatalytic characteristics of thiosulfate oxidation at nickel plated aluminum electrode modified with nickel pentacyanonitrosylferrate films. *Electroanalysis*, 2001, vol. 13, no. 6, pp. 465–470.
17. Wang P., Yuan Y., Jing X., Zhu G. Amperometric determination of thiosulfate at a surface-renewable nickel(II) hexacyanoferrate-modified carbon ceramic electrode. *Talanta*, 2001, vol. 53, pp. 863–869.
18. Shankaran D.R., Narayanan S.S. Amperometric sensor for thiosulphate based on cobalt hexacyanoferrate modified electrode. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2002, vol. 86, no. 2–3, pp. 180–184.
19. Salimi A., Roushani M., Hallaj R. Micromolar determination of sulfur oxoanions and sulfide at a renewable sol–gel carbon ceramic electrode modified with nickel powder. *Electrochimica Acta*, 2006, vol. 51, no. 10, pp. 1952–1959.
20. Ensafi A.A., Soleymani H.A., Mirmomtaz E. Determination of sulfur contents of SO_3^{2-} , $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ and S^{2-} based on the electrocatalytic interaction with homogeneous mediator tris(2,2'-bipyridyl) Ru(II). *Microchemical Journal*, 2008, vol. 89, pp. 108–115.
21. Raof J.B., Ojani R., Karimi-Maleh H. Electrocatalytic oxidation of thiosulfate at 2,7-bis(ferrocenylethyl)-fluoren-9-one-modified carbon paste electrode (2,7-BFEFMCPE): Application to the catalytic determination of thiosulfate in real sample. *Chinese Chemical Letters*, 2010, vol. 21, no. 12, pp. 1462–1466.
22. Casella I.G., Contursi M., Desimoni E. Amperometric detection of sulfur-containing compounds in alkaline media, *Analyst*, 2002, vol. 127, no. 5, pp. 647–652.
23. Xu J.-M., Wang Y.-P., Xian Y.-Z., Jin L. Electrocatalytic oxidation and ion chromatography detection of $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$, SO_3^{2-} , I^- and SCN^- at glassy carbon electrode with functionalized multi-wall carbon nanotubes film. *Chemical Research in Chinese Universities*, 2004, vol. 20, no. 5, pp. 529–533.
24. Suryanarayanan V., Zhang Y., Yoshihara S., Shirakashi T. Amperometric determination of sodium thiosulfate using boron-doped diamond electrodes applied to flow injection analysis. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2004, vol. 102, no. 1, pp. 169–173.
25. Woods R., Hope G.A., Watling K.M., Jeffrey M.I. A spectroelectrochemical study of surface species formed in the gold/thiosulfate system. *Journal of the Electrochemical Society*, 2006, vol. 153, no. 7, pp. 105–113.
26. Baron J.Y., Mirza J., Nicol E., Smith S.R., Leitch J.J., Choi Y., Lipkowski J. SERS and electrochemical studies of the gold–electrolyte interface under thiosulfate based leaching conditions. *Electrochimica Acta*, 2013, vol. 111, pp. 390–399.
27. Green T.A., Roy S. Speciation analysis of Au(I) electroplating baths containing sulfite and thiosulfate. *Journal of The Electrochemical Society*, 2006, vol. 153, no. 3, pp. C157–C163.
28. Yokosuka F., Takizawa M., Okuwaki A., Okabe T. Electrolytic oxidation of sodium thiosulfate solution. *Chemistry Letters*, 1974, vol. 3, no. 4, pp. 319–322.
29. Kovaleva S.V., Aksinenko O.S., Korshunov A.V. Electrooxidation of sulfite ions on a composite carbon-containing electrode modified with submicron gold particles. *Journal of Analytical Chemistry*, 2020, vol. 75, no. 10, pp. 1348–1357.
30. Pedraza A.M., Villegas I., Freund P.L., Chornik B. Electrooxidation of thiosulphate ion on gold. Study by means of cyclic voltammetry and auger electron spectroscopy. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 1988, vol. 250, pp. 443–449.
31. Burke L.D., Nugent P.F. The electrochemistry of gold. I. The redox behaviour of the metal in aqueous media. *Gold Bulletin*, 1997, vol. 30, pp. 43–53.
32. Doerffel K. *Statistik in der analytischen chemie* [Statistics in analytical chemistry]. Leipzig, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1990. 256 p.

Received: 24 November 2021.

Information about the authors

Olga S. Aksinenko, methodologist, Department of Education, Tomsk District Administration.

Andrey V. Korshunov, Dr. Sc., professor, Moscow State University of Civil Engineering.

Svetlana V. Kovaleva, Dr. Sc., professor, Tomsk State Pedagogical University.

УДК 553.2:549.283 (571.52)

ЗОЛОТО-СУЛЬФИДНО-КВАРЦЕВОЕ РУДОПРЯВЛЕНИЕ ХААК-САИР (ЗАПАДНАЯ ТУВА): ВОЗРАСТ, РТ-ПАРАМЕТРЫ, СОСТАВ ФЛЮИДОВ, ИЗОТОПИЯ S, O И C

Кужугет Ренат Васильевич¹,
rkuzhuget@mail.ru

Анкушева Наталья Николаевна²,
ankusheva@mail.ru

Кадыр-оол Чайна Олекоевна¹,
kadyrool91@mail.ru

Редина Анна Андреевна³,
anna-red@outlook.com

Прокопьев Илья Романович³,
prokopev_ilya@mail.ru

Пономарчук Антон Викторович³,
antponomar@gmail.com

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

² Институт минералогии ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН,
Россия, 456317, г. Миасс, Ильменский заповедник, 1.

³ Институт геологии и минералогии СО РАН,
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Ак. Коптюга, 3.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью определения возраста и условий образования золото-кварцевого рудопроявления Хаак-Саир в лиственитах, характеризующегося своеобразным минеральным составом руд, выраженным в наличии ртутистого золота, селенидов (фишессерита, науманнита, тиманнита, клаусталита) и теллуридов (гессита, теллуровисмутита и колорадоита).

Цель: определение возраста, условий образования, геохимических особенностей рудоносного флюида и его источников, золото-кварцевого рудопроявления Хаак-Саир в Западной Тuve.

Методы. Оптические исследования руд проведены на микроскопах Olympus BX41 и ПОЛАМ П-213М. Состав минералов определен с помощью сканирующего электронного микроскопа MIRA 3 LMU с ЭДС Oxford Instruments Nanoanalysis Ltd. Температуры, солевой состав, концентрации солей и давление при минералообразовании получены по индивидуальным флюидным включениям с использованием термокамеры Linkam TMS-600 и оптического микроскопа Olympus BX 51; газовый состав флюидных включений определен на рамановском спектрометре Ramanor U-1000 с детектором Horiba DU420E-OE-323, лазер Millennia Pro (Spectra-Physics); валовый газовый состав флюида диагностирован на газовом хроматографе Agilent 6890, содержания анионов в вытяжке проанализированы на жидкостном хроматографе ЦВЕТ-3000, катионы и микроэлементы – методом ICP MS (Elan-6100); соотношения $\delta^{34}\text{S}$ в галените определены на газовом масс-спектрометре FinniganTM MAT Delta в режиме двойного напуска (аналитики В.Н. Реутский, М.Н. Колбасова, ИГМ СО РАН); соотношения стабильных изотопов $\delta^{18}\text{C}$ и $\delta^{18}\text{O}$ в кварце и карбонатах определены на масс-спектрометрах Stable Isotope Ratio Mass Spectrometer FinniganTM MAT 253 с пробоотборником Finnigan GasBench II и стандартами IAEA: NBS-18 и NBS-19 (аналитик А.Н. Пыряев, ИГМ СО РАН) и Isoprime с AQS (Akita Quartz Standard, аналитики Х. Каварая, О. Мацубая, Университет г. Акита), соответственно; $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датирование проведено методом ступенчатого прогрева.

Результаты. Установленный $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ методом возраст синрудных лиственитов рудопроявления составляет $379,4 \pm 4,4$ млн лет, что соответствует позднему девону. Термометрическими исследованиями установлено, что вмещающие листвениты рудопроявления образовались при участии водного Na-K-хлоридного флюида с соленостью 3,4–6,5 мас. % NaCl-экв. и температурами не менее 325–200 °С. Золото-сульфидно-кварцевые жилы отплагались при P=0,5–0,75 кбар (~1,5–2,3 км) из углекислотно-водно-хлоридного (Na-K±Fe) флюида, содержащего CH_4 с концентрациями солей 4,5–37,4 мас. % NaCl-экв. при снижении температур от 320 до 120 °С (I рудная стадия – 310–200 °С, II рудная стадия – 320–120 °С) и вариациях $f\text{O}_2$, $f\text{S}_2$, $f\text{Se}_2$ и $f\text{Te}_2$, которые обусловили разнообразие минеральных форм Au, Ag и Hg. Величины $\delta^{34}\text{S}$ галенита изменяются от –0,6 до –0,4 ‰, а вычисленные значения $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$ флюида I рудной стадии находятся в интервале +1,5...+2,1 ‰ (T=280–210 °С), II рудной стадии – +1,6...+2,6 ‰ (T=290–190 °С), что свидетельствует о магматическом происхождении серы. Значения $\delta^{18}\text{O}$ в кварце рудных жил изменяются от 17,0 до 17,4 ‰, доломите – +17,4...+17,8 ‰, кальците – +16,5 ‰, рассчитанные значения $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{S}}$ флюида I рудной стадии находятся в интервале +8,1...+5,7 ‰ (T=250–210 °С), II рудной стадии – +6,7...–2,2 ‰ (T=230–120 °С) позволили предположить, что на ранних стадиях рудообразующего процесса флюид имел магматическое происхождение, а на поздних смешивался с метеорными водами. Величины $\delta^{13}\text{C}$ в доломите I рудной стадии варьируют от –0,4 до –0,7 ‰; в кальците II рудной стадии – –0,3 ‰, а рассчитанные значения $\delta^{13}\text{C}$ во флюиде находятся в интервале –1,2...+0,1 ‰ (T=250–210 °С) и –3,3...+0,5 ‰ (T=230–120 °С), соответственно. Это предполагает поступление углерода из гранитоидных маем и/или замещение его из вмещающих пород. Состав флюида трансформировался от ранних стадий к поздним от углекислотно-водно-хлоридного до водно-хлоридного с уменьшением концентраций хлоридов щелочных и щелочноземельных металлов (от 37,4 до 4 мас. % NaCl-экв.).

Ключевые слова:

Самородное золото, флюидные включения, кварц, возраст, стабильные изотопы, месторождения золота, Тува.

Введение

Золото-кварцевое рудопроявление Хаак-Саир Алдан-Маадырского рудного узла (АМРУ) Западной Тувы считается одним из перспективных объектов на коренное Au в Республике Тыва. АМРУ приурочен к области развития V–C₁ океанических комплексов и S–O пород коллизионного прогиба. Золотое оруденение парагенетически связано с интрузивными породами баянкольского комплекса (D_{3bn}) и сопряжено с процессами березитизации и лиственитизации рудовмещающих пород [1], а также контролируется

опережающими разломами субширотного простирания Саяно-Тувинского глубинного разлома.

Рудопроявление Хаак-Саир было открыто в 1952 г. Дальней экспедицией ВСЕГЕИ под руководством Г.М. Владимирского. В 1954–1955 и 1974–76 гг. оно было опробовано несколькими геологическими партиями в процессе геолого-съёмочных и тематических работ, и были составлены детальные карты участков и рудного поля Сарыгдаш (Хаак-Саир) масштабов 1:200 и 1:10000, соответственно [2].

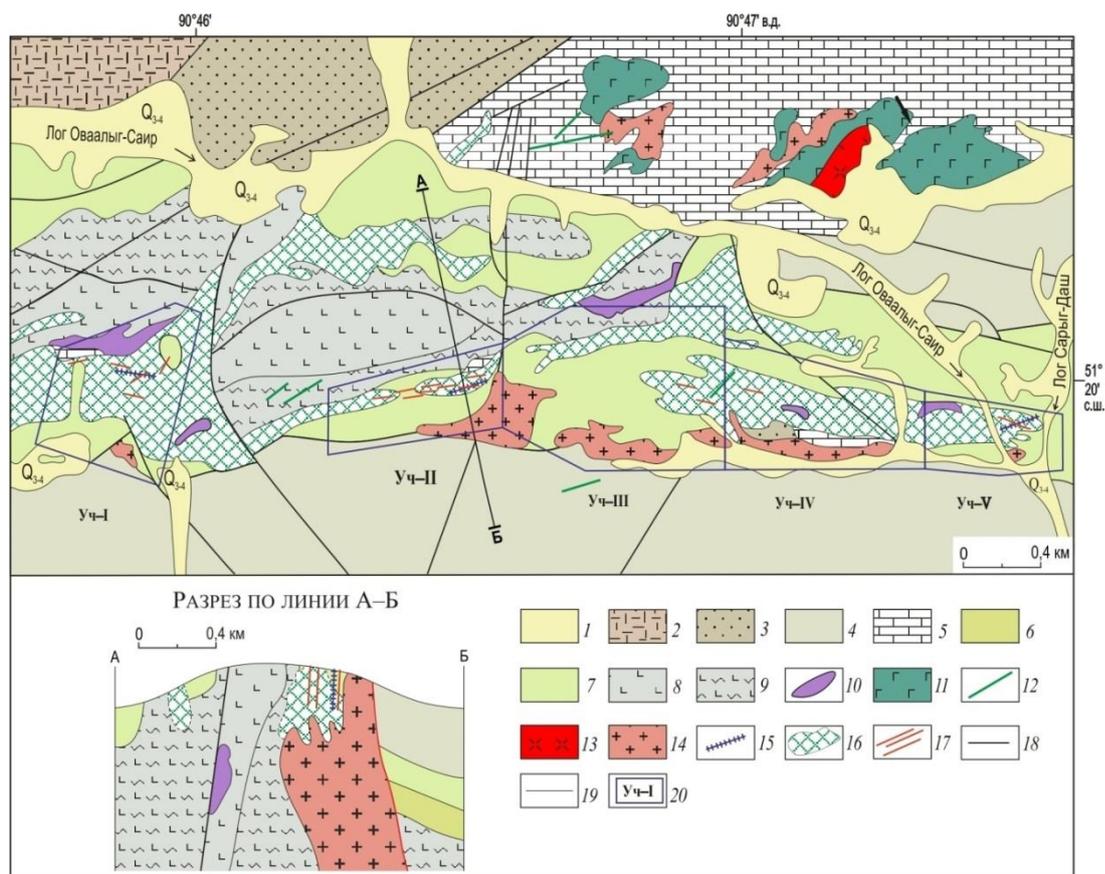


Рис. 1. Схема геологического строения рудопроявления Хаак-Саир (по данным [2] с изменениями): 1 – делювиальные и пролювиальные отложения (Q_{3.4}); 2 – дацит-риолитовые порфиры кендейской свиты (D_{1kn}); 3 – песчаники и алевролиты хондергейской свиты (D_{1hn}); 4 – серицит-глинистые сланцы и алевролиты чергакской свиты (S_{1cr}); 5 – известняки чергакской свиты (S_{1cr}); 6 – алевролиты, гравелиты и песчаники адырташской свиты (O_{3ad}); 7 – конгломераты с линзами песчаников и алевролитов адырташской свиты (O_{3ad}); 8 – спилиты алдынбулакской (чингинской) свиты (V–C_{1at}); 9 – рассланцованные спилиты алдынбулакской свиты (V–C_{1at}); 10 – серпентиниты, перидотиты, пироксениты и габброиды акдовракского офиолитового комплекса (σ V–C_{1ak}); 11–14 – баянкольский интрузивный комплекс (D_{3bn}): 11 – габброиды III фазы; 12 – дайки диоритов III фазы; 13 – интрузии риолит-порфиров II фазы; 14 – интрузии гранодиорит-, тоналит-порфиров I фазы; 15 – кварц-турмалиновые метасоматиты; 16 – листвениты; 17 – рудные жилы; 18 – разрывные нарушения; 19 – границы геологические; 20 – контуры участков рудопроявления Хаак-Саир

Fig. 1. Geological scheme of Khaak-Sair ore occurrence (after [2], modified): 1 – deluvial-proluvial sediments (Q_{3.4}); 2 – effusive rocks, dacite and rhyolite porphyry of the Kendei Formation (D_{1kn}); 3 – siltstones and sandstones of the Khodergei Formation (D_{1hn}); 4 – sericite-clay shales of the Chergak Formation (S_{1cr}); 5 – limestones and greenish-gray siltstone lenses of the Chergak Formation (S_{1cr}); 6 – siltstones, gravelites and sandstones of the Adyrtash Formation (O_{3ad}); 7 – shale medium pebble conglomerates with lenses of siltstones and sandstones of the Adyrtash Formation (O_{3ad}); 8 – spilites of the Aldynbulak Formation (V–C_{1at}); 9 – shales, and shale spilites of the Aldynbulak Formation (V–C_{1at}); 10 – serpentinites, peridotites, pyroxenites, and gabbroids of the Akdovrak ophiolite complex (σ V–C_{1ak}); 11–14 – intrusive rocks of the Bayan-Kol Complex (D_{3bn}): 11 – gabbroids of phase III; 12 – microdiorite dykes of phase III; 13 – rhyolite porphyry of phase II; 14 – granodiorite- and tonalite-porphyry, and granite-porphyry of phase I; 15 – quartz-tourmaline metasomatites; 16 – listwanites; 17 – ore veins; 18 – faults; 19 – geologic boundaries; 20 – Khaak-Sair ore occurrence and the outlines

В 2009–2011 гг. ОАО «Красноярскгеолсъемка» провело на АМРУ государственные ревизионно-поисковые работы на рудное Au. В ходе этих работ в центральной части рудопроявления Хаак-Саир были выявлены жильно-прожилковые зоны протяженностью от 450 до 1200 м и мощностью 2–18 м и ресурсы Au категории P₂ оценены в количестве 18 т [3].

Авторы данной статьи с 2008 г. проводили тематические исследования на объектах АМРУ по изучению их минералого-геохимических особенностей руд, по результатам которых рудопроявления были отнесены к малосульфидной золото-кварцевой вулканогенно-плутоногенной формации [1, 4], т. е. переходного типа от вулканогенных к плутоногенным гидротермальным месторождениям Au.

В 2017–2019 гг. АО «Сибирское ПГО» провело государственные поисковые работы на рудное Au на площади АМРУ, включающие поисковые маршруты, литохимическое опробование по вторичным ореолам рассеяния, площадные геофизические работы, горные, буровые и опробовательские работы. В ходе этих работ авторами статьи были отобраны образцы из горных выработок, использованные для изотопно-геохронологических, изотопно-геохимических и термобарогеохимических исследований, что позволило получить новые данные о возрасте оруденения, геохимических особенностях флюидов и изотопном составе S, O и C флюида.

Геолого-минералогическая характеристика рудопроявления

Детальная геолого-минералогическая характеристика рудопроявления Хаак-Саир приведена в работе [4]. Здесь подчеркнем, что оруденение приурочено к горст-антиклинальной структуре субширотного простирания длиной 9 км и шириной 1–1,5 км. Крылья структуры осложнены субширотными тектоническими нарушениями: на севере – Аржанским разломом,

на юге – Рудным разломом. Ядро структуры сложено V–С₁ вулканогенно-осадочными породами, крылья – О₃–S₁ терригенно-осадочными отложениями (рис. 1). Рудный разлом сбросового типа, контролирующий оруденение, «залечен» тоналит-порфирами I фазы баянкольского комплекса (D_{3bn}), парагенетически связанными с оруденением. Разлом имеет северо-восточное простирание, прослежен на 16 км и насыщен оперяющими трещинами и тектоническими зонами. Падение разлома субвертикальное, реже крутое, на юг или север; амплитуда перемещения 1,5 км.

Тектонически нарушенные зоны стали благоприятной средой для циркуляции гидротермальных флюидов, генерируемых малыми гранитоидными интрузиями баянкольского субвулканического комплекса (D_{3bn}). Это обусловило формирование линейных зон лиственитов с кварцевыми жилами и золотой минерализацией.

На рудопроявлении развиты дорудные кварц-турмалиновые метасоматиты и жилы с W-содержащим рутилом, шеелитом и пиритом (этап I), которые сменяются золото-кварцевыми жилами в березит-лиственитовых метасоматитах (этап II). Кварц-турмалиновый высокотемпературный этап включает турмалиновую (1) и турмалин-кварцевую (2) стадии. Кварц-турмалиновые метасоматиты генетически связаны с малыми интрузиями гранодиорит- и тоналит-порфиров баянкольского комплекса (D_{3bn}) [2]. Они представляют собой метасоматические породы мощностью до 1–2 м, образованные по кварц-полевошпатовым песчаникам ордовика, сложенные бледно- и светло-зеленоватым игольчато-призматическим турмалином с кварц-турмалиновыми и молочно-белыми кварцевыми прожилками последующих стадий (рис. 2). По химическому составу турмалины относятся к промежуточному ряду шерл-дравит-магнезиофойтит с примесью Gr₂O₃ до 1,04 мас. %.

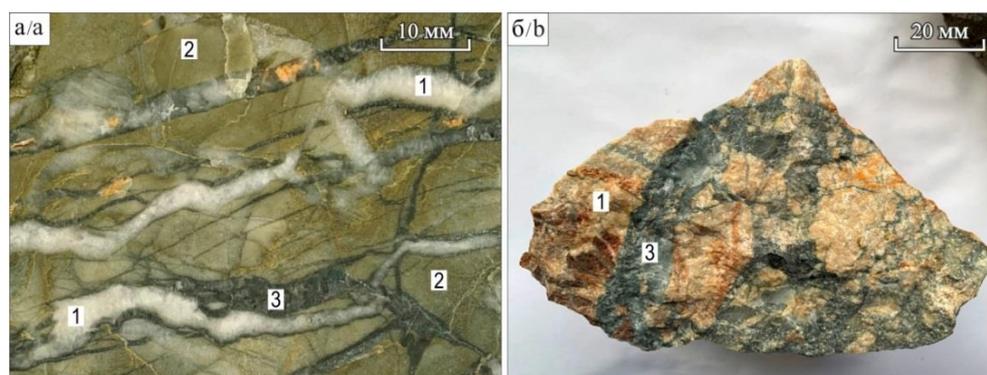


Рис. 2. Кварц-турмалиновые метасоматиты и жилы рудопроявления Хаак-Саир: а) кварц-турмалиновые (3) и кварцевые (1) прожилки в кварц-турмалиновом метасоматите; б) кварц-турмалиновые (3) жилы в карбонатных породах (1)

Fig. 2. Quartz-tourmaline metasomatites and veins of Khaak-Sair ore occurrence: a) quartz-tourmaline (3) and quartz (1) veinlets in quartz-tourmaline metasomatite; b) quartz-tourmaline (3) veins in carbonate rocks (1)

II золото-сульфидно-кварцевый этап включает дорудные (березит-лиственитовую (1) и пирит-кварцевую (2)), рудные (золото-арсенопирит-сульфосольно-кварцевую (3), золото-ртутисто-селенидно-теллуридно-сульфидно-

сульфосольно-кварцевую (4)) и пострудные (хлорит-турмалин-кварцевую (5), карбонат-кварцевую (6) и хлорит-кварцевую (7)) стадии. Гипергенные преобразования руд отнесены к III этапу (табл. 1; рис. 3).

Таблица 1. Последовательность минералообразования на рудопроявлении Хаак-Саир

Table 1. Mineral formation sequence of Khaak-Sair ore occurrence

Минерал/Mineral	Этап/Stages								Гипергенный Supergene	
	Кварц-турмалиновый Quartz-tourmaline		Гидротермальный золото-сульфидно-кварцевый Hydrothermal gold-sulfide-quartz							
	1	2	Стадия/Substage							
		1	2	3	4	5	6	7		
Кварц/Quartz	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	
Турмалин/Tourmaline	◆	◆								
Шеелит/Scheelite	◆			◆						
Рутил/Rutile	◆									
Хлорит/Chlorite	◆		◆				◆		◆	
Пирит/Pyrite	◆		◆		◆					
Кальцит/Calcite			◆			◆		◆		
Доломит/Dolomite			◆		◆			◆		
Сидерит/Siderite			◆					◆		
Анкерит/Ankerite			◆							
Серицит/Sericite			◆							
Парагонит/Paragonite			◆							
Герсдорфит/Gersdorffite			◆		◆	◆				
Галенит/Galena					◆	◆				
Сфалерит/Sphalerite					◆	◆				
Арсенопирит/Arsenopyrite					◆	◆				
Халькопирит/Chalcopyrite					◆	◆				
Блѣкые руды/Fahlores					◆	◆				
Бурнонит/Bourmonite						◆				
Борнит/Bornite						◆				
Золото/Native gold					◆	◆				◆
Электрум/Electrum					◆	◆				
Гессит/Hessite						◆				
Hg-золото/Hg-gold						◆				
Hg-электрум/Hg-electrum						◆				
Hg-кюстелит/Hg-kustelite						◆				
Hg-серебро/Hg-silver						◆				
Колорадоит/Coloradoite						◆				
Акантит/Acanthite					◆	◆				◆
Теллуровисмутит/Tellurobismuthite						◆				
Фишессерит/Fischesserite						◆				
Науманнит/Naumannite						◆				
Клаустолит/Clausthalite						◆				
Тиманнит/Tiemannite						◆				
Se-киноварь/Cinnabar						◆				
Se-имитерит/Se-imiterite						◆				
Ялпайт/Jalpaite						◆				
Барит/Baryte						◆				
Гематит/Hematite				◆					◆	
Ковеллин/Covellite										◆
Халькозин/Chalcocite										◆
Малахит/Malachite										◆
Азурит/Azurite										◆
Гѣтит/Goethite										◆
Скородит/Scorodite										◆
Серебро/Silver										◆
Галогениды Ag/Silver halides										◆
Гипергенные/Supergene										◆

Примечание. Гипергенные – англезит, церуссит, линарит, конихальцит, брошантит, атакамит и т. д.

Note. Hypergenic – anglesite, cerussite, linarite, conichalcite, brochanite, atacamite, etc.

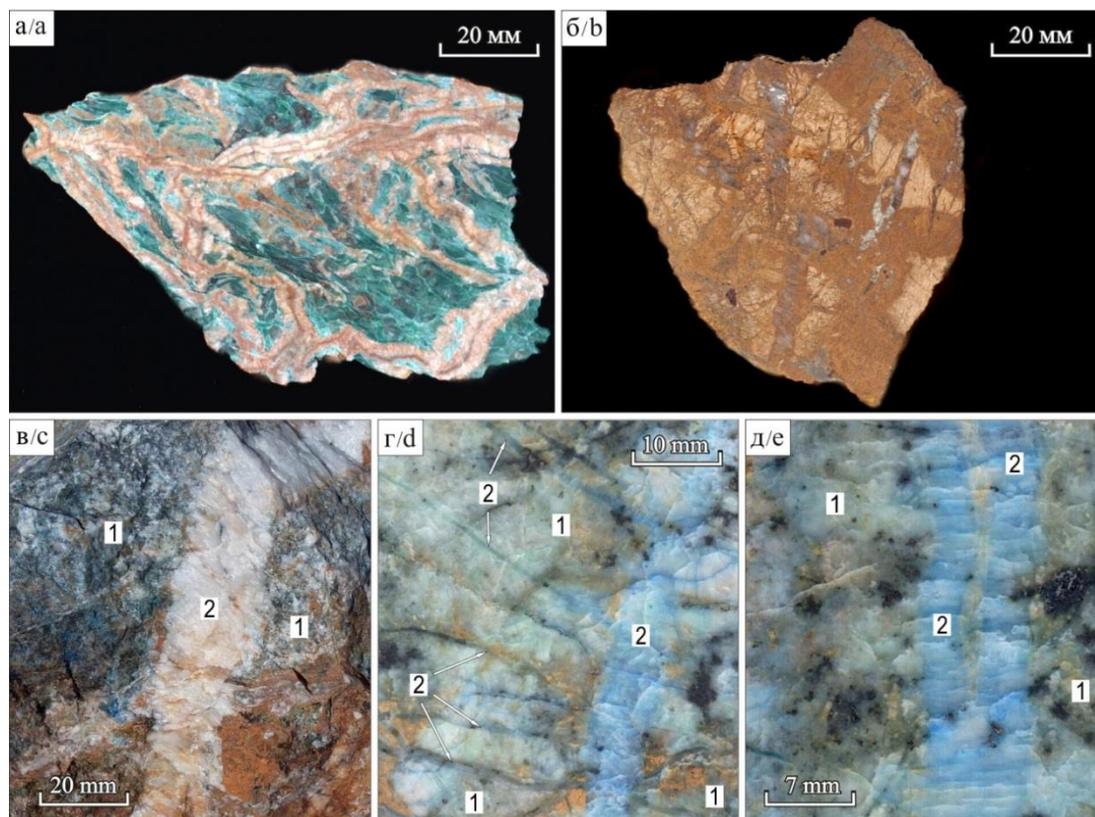


Рис. 3. Листвениты и рудные жилы рудопроявления Хаак-Саир: а, б) листвениты: а) зеленый; б) красновато-бурый; в–д) золото-сульфидно-кварцевые прожилки II рудной стадии (2) в минеральных агрегатах I рудной стадии (1)
Fig. 3. Listwanites and ore veins of Khaak-Sair ore occurrence: а, б) listwanites: а) green; б) reddish-brown; в–е) Au-sulfide-quartz veins of the late ore substage (2) dissecting the mineral aggregates of the early ore substage (1)

Малосульфидные жилы и жильно-прожилковые зоны с крапленой, прожилково-крапленой минерализацией развиты в лиственитах, эффузивах и терригенных породах. Они сложены молочно-белым, серовато-белым среднетонкозернистым или халцедоно-видным кварцем. Среднее содержание Au в рудах составляет 2,5 г/т, Ag – 26,55 г/т; наблюдается корреляция Au с Cu, Sb, As, Ag, В, Pb, Ba, Zn, Mo, W, Bi, Te, Cd и Mg [4].

Рудная стадия I включает две минеральные ассоциации: раннюю золото-галенит-арсенопирит-теннантит-тетраэдрит-кварцевую с бурнонитом ± аргентотеннантит-тетраэдрит (Ag до 50,05 мас. %) и позднюю золото-электрум-галенит-халькопирит-тетраэдрит-кварцевую с герсдорфитом ± пирит ± борнит ± кальцит ± доломит (FeO до 1,09 мас. %) ± Fe-доломит (FeO от 5,84 до 8,62 мас. %, MnO до 0,31 мас. %).

Минералы ранней ассоциации слагают центральные части жил или самостоятельные жилы и рассечены жилами рудной стадии II (рис. 3, в–д). Последние также образуют две минеральные ассоциации: раннюю золото-гессит-науманнит-теннантит-тетраэдрит-кварцевую с Hg-золотом (Hg до 2 мас. %), электрумом, Hg-электрумом, бурнонитом, герсдорфитом (Fe до 1,96 мас. %), халькопиритом, борнитом, теллури-висмутитом, галенитом (Se до 14,5 мас. %, Ag до 5 мас. %), клаусталитом (S до 4,69 мас. %), науманнитом (S до 1,5 мас. %), фишессеритом, тиманнитом, колорадоитом ± Се-имитерит; и позднюю золото-

ртутисто-халькопирит-теннантит-тетраэдрит-кварцевую с теннантит-тетраэдритом (Ag до 15,96 мас. %), тетраэдритом (Ag до 22,76 мас. %), аргентотетраэдритом (Ag до 40,96 мас. %), гесситом, акантитом, герсдорфитом (Fe до 3,76 мас. %, Co до 6,88), Се-галенитом, науманнитом, S-науманнитом, Hg-золотом, электрумом, Hg-электрумом, Hg-кюстелитом, Au-содержащим Hg-серебром, баритом, бурнонитом ± сфалерит ± Се-киноварь ± ялпаит ± кальцит (FeO до 0,89 мас. %, MnO до 0,26).

В рудных жилах широко развиты блеклые руды ряда теннантит-тетраэдрит, низкопробное золото, электрум, кюстелит и их ртутистые разновидности с содержаниями Hg 5–10, 3–17 и 5–17,5 мас. %, соответственно. Пробность золота на рудопроявлении колеблется от 957 до 19 ‰, составляя в среднем 701 ‰.

По составу рудных минералов жил рудопроявления Хаак-Саир отвечает золото-электрум-галенит-халькопирит-сульфосолюному типу с Ag-содержащим тетраэдритом (Ag до 22 мас. %), аргентотетраэдритом (Ag до 40 мас. %) и минералами ряда Au–Ag–Hg.

В коре выветривания рудопроявления развиты многочисленные гипергенные минералы (табл. 1) [4]. Мощность зоны гипергенеза составляет не менее 200 м.

⁴⁰Ar/³⁹Ar возраст оруденения на рудопроявлении

Для определения возраста оруденения был отобран синрудный лиственит (обр. ХС-3, рис. 2, б) из зальбанды золото-сульфидно-сульфосолюно-кварцевой

жилы центрального участка рудопроявления. Прожилково-пятнистый, среднезернистый лиственит имеет красновато-бурую окраску вследствие разложения Fe-содержащих карбонатов, в нем отмечаются кварцевые прожилки, а на их контакте с карбонатами развивается серицит (веерообразные агрегаты из че-

шук размером 0,1–0,3 мм). Лиственит сложен карбонатом (Fe-доломитом, кальцитом) – 60 %, кварцем – 32 %, серицитом ~5 %, лимонитом по пириту ~3 %.
 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датирование, выполненное по монофракциям серицита, отобранного вручную, составляет $379,4 \pm 4,4$ млн лет (рис. 4).

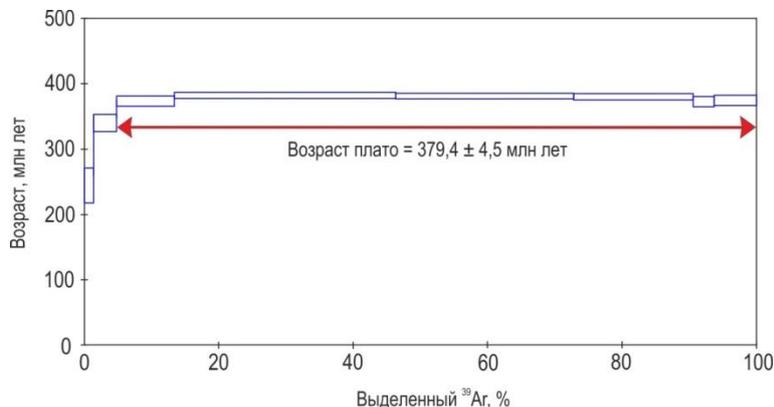


Рис. 4. Результаты $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датирования серицита из лиственитов рудопроявления Хаак-Саир

Fig. 4. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of sericite from Khaak-Sair ore occurrence

Полученный возраст синрудных лиственитов рудопроявления хорошо согласуется с $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ возрастом $376,5 \pm 3,4$ млн лет для даек габбро III фазы баянкольского комплекса (D_3bn) в южной части АМРУ [5].

Условия образования лиственитов и рудных жил

Для установления условий образования дорудных метасоматитов (лиственитов) и золотоносных жил рудопроявления Хаак-Саир исследованы первичные,

псевдотричные и вторичные флюидные включения в кварце [6]. По фазовому составу они разделены на ассоциации: 1) двухфазные газожидкие (VL); 2) трехфазные газожидкие с твердой фазой (VLS); 3) трехфазные, содержащие газовую фазу, жидкую углекислоту и водный раствор (VLC) (рис. 5). Результаты термометрических исследований приведены в табл. 2 и на рис. 6.

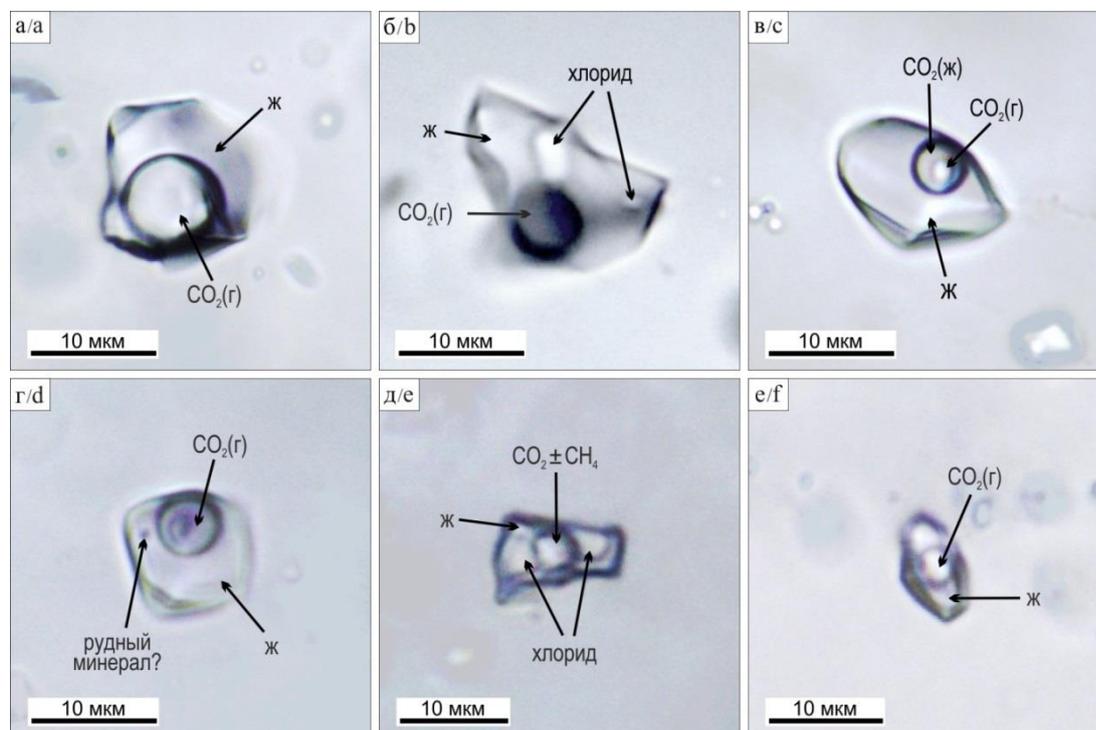


Рис. 5. Флюидные включения в кварце: а) псевдотричное VL (обр. ХС-5); б–д) первичные (обр. ХС-7): б) VLS; в, з) VLC; д) первичное VLS (обр. ХС-3); е) псевдотричное VL (обр. ХС-3); ж – жидкая фаза, з – газовая фаза

Fig. 5. Fluid inclusions in quartz: a) pseudosecondary VL (XC-5); b–d) primary (XC-7): b) VLS; c, d) VLC; e) primary VLS (XC-3); f) pseudosecondary VL (XC-3); ж – liquid phase, з – gas phase

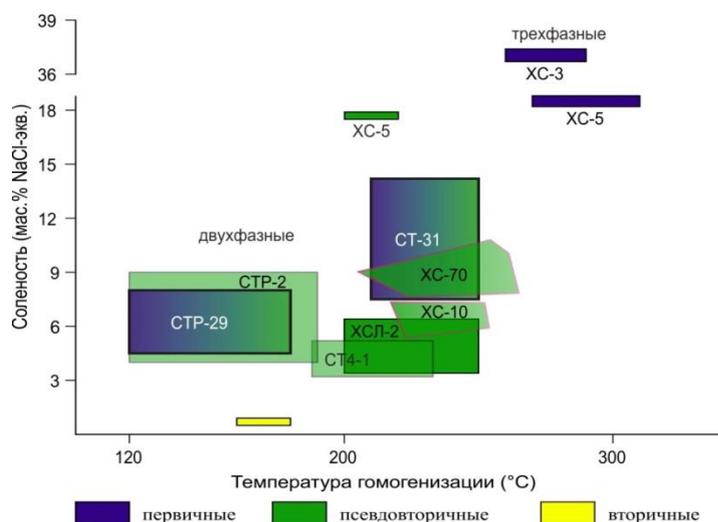


Рис. 6. Диаграмма температур гомогенизации и солёности флюидных включений в кварце. Номера образцов – в табл. 2
 Fig. 6. Homogenization temperatures vs salinity plot of fluid inclusions in quartz. For sample numbers see Table 2

Таблица 2. Результаты изучения флюидных включений в кварце рудопроявления Хаак-Саир
 Table 2. Fluid inclusions data of Khaak-Sair ore occurrence

Образец Sample	Генерация ФВ (FIA)	Фазовый состав (phases)	n	$T_{гом}, °C$ $T_{hom}, °C$	$T_{эвт}, °C$ $T_{eut}, °C$	$T_{пл. льда}, °C$ $T_{ice melt}, °C$	Солёность (мас. % NaCl-экв.) C, wt. %, NaCl equiv	P, бар P, bar	Солевой состав Salt composition
Листвениты/Listwanites									
ХСЛ-2	ПВ	VL	12	250–200	–15	–4––2	3,4–6,5	–	NaCl-KCl-H ₂ O
	В	VL	20	180–160	–	–0,3––0,5	0,5–0,9	–	–
Золото-галенит-арсенопирит-теннантит-тетраэдрит-кварцевая жила (I) Gold-galena-arsenopyrite-tennantite-quartz vein of the early ore substage									
ХС-5	П	VL	10	310–270	–28––30	–15,2––14,5	18,2–18,8	–	NaCl-FeCl ₂ -H ₂ O+ CO ₂ (r)
	ПВ	VL	18	220–200	–21––25	–14,2––13,7	17,5–17,9	–	NaCl-FeCl ₂ -H ₂ O+ CO ₂ (r)
	В	VL	22	180–160	–	–	–	–	–
Золото-электрум-галенит-халькопирит-тетраэдрит-кварцевые жилы (I) Gold-electrum-galena-chalcopryrite-tennantite-tetrahedrite-quartz veins of the early ore substage									
ХС-7	П	VLC	10	280–260	–	–	–	0,75–0,6	CO ₂ (r+ж)
	П	VLS	8	270–260*	–	–	–	–	chlorides-H ₂ O +CO ₂ (r)
СТ-31	ПВ	VL	67	250–210	–22––24	–10,3––4,8	7,5–14,2	–	H ₂ O±CO ₂ (r)+ NaCl-KCl-H ₂ O
Золото-гессит-науманнит-теннантит-тетраэдрит-кварцевые жилы (II) Gold-hessite-naumannite-tennantite-tetrahedrite-quartz veins of the late ore substage									
ХС-8 ХС-3	П	VL	20	320–300	–	–	–	–	+ CO ₂ (r)
		VLS	13	275–270*	–	–	–	–	chlorides- H ₂ O+CO ₂ ±CH ₄ (r)
	ПВ	VL	24	270–250	–	–	–	–	+CO ₂ (r)
	П	VLS	14	290–280	–	–	36,7–37,4	–	chlorides-H ₂ O+CO ₂ (r)
ПВ	VL	25	230–190	–	–	–	–	chlorides + CO ₂ (r)	
Золото-ртутисто-халькопирит-теннантит-тетраэдрит-кварцевые жилы (II) Gold-mercury-chalcopryrite-tennantite-tetrahedrite-quartz veins of the late ore substage									
СТР-2 СТ4-1, СТ-29	П	VL	31	230–180	–21––24	–2,5––5,0	4,5–8,0	–	NaCl-KCl-H ₂ O
	ПВ	VLC	11	190–120	–19––23	–2,5––6,0	4–9	0,5	NaCl-H ₂ O, NaCl-KCl-H ₂ O
	ПВ	VL	48	180–120	–21––24	–2,5––5,0	4,5–8,0	–	NaCl-H ₂ O, NaCl-KCl-H ₂ O
Пострудные кварц-турмалиновые жилы / Post-ore quartz-tourmaline veins									
ХС-70	ПВ	VL	45	265–210	–22––24	–6,4––8	8–10,4	–	NaCl-KCl-H ₂ O
ХС-10	ПВ	VL	23	255–210	–21––23	–3,3––5,1	5,5–8	–	NaCl-KCl-H ₂ O
	П	VL	11	240–252	–33––34	–3,8––5	6–7,9	–	MgCl ₂ -H ₂ O

Примечание: n – количество анализов, $T_{гом}$ – температура гомогенизации, $T_{эвт}$ – температура эвтектики, $T_{пл. льда}$ – температура плавления льда. Включения: П – первичные, ПВ – псевдвторичные, В – вторичные; * – включения декриптитовали; ж – жидкая фаза, г – газовая фаза.

Note: n – number of analyzes, T_{hom} – homogenization temperatures, T_{eut} – eutectic temperatures; $T_{ice melt}$ – final melting temperatures; П – primary inclusions, ПВ – pseudosecondary inclusions, В – secondary inclusions; * – inclusions were decrypted; ж – liquid, г – gas.

В кварце лиственитов выявлены псевдотричные и вторичные VL флюидные включения. Первые тяготеют к трещинам в кварце, образовавшимся в процессе его отложения и не выходящим за пределы крупных зерен. Они имеют овальную и изометричную форму, размеры 9–13 мкм с долей газовой фазы до 40 об. %. Псевдотричные включения содержат хлориды натрия и калия ($T_{эвт.} = -15$ °C). Концентрации солей по температурам плавления льда ($T_{пл.} = -4 \dots -2$ °C) составляют 3,4–6,5 мас. % NaCl-экв. Температуры гомогенизации включений в жидкую фазу составили 220–250 °C.

Вторичные включения имеют округлую и удлиненную форму с неровными краями, размеры до 5 мкм; доля газовой фазы составляет до 15 об. %. Для них получены концентрации солей 0,5–0,9 мас. % NaCl-экв. ($T_{пл.} = -0,3 \dots -0,5$ °C) и температуры гомогенизации (в жидкость) 160–180 °C (табл. 2).

В кварце золото-галенит-арсенопирит-теннантит-теннантит-кварцевой жилы I рудной стадии проанализированы газовой-жидкие (VL) включения нескольких генераций: первичные, псевдотричные и вторичные. Первичные включения встречаются обособленно или в виде малочисленных групп, имеют изометричную форму с элементами кристаллографических граней и размеры до 12 мкм. Псевдотричные включения трассируют залеченные трещины в кристаллах кварца и характеризуются удлиненной формой и размерами 8–12 мкм. Вторичные включения имеют изометричную или округлую форму и размеры 3–7 мкм и маркируют поздние прожилки в кварце. По данным рамановской спектроскопии, первичные VL включения в газовой фазе содержат углекислоту. Для них получены температуры эвтектики, равные $-30 \dots -28$ °C, и температуры плавления льда от $-15,2$ до $-14,5$ °C. Эти данные отвечают хлоридному раствору, содержащему ионы Fe и Na, с концентрацией 18,2–18,8 мас. % NaCl-экв. Температуры гомогенизации (в жидкость) составили 270–310 °C. Псевдотричные VL включения содержат раствор хлоридов Fe и Na с концентрацией 17,5–17,9 мас. % NaCl-экв. ($T_{эвт.} = -27 \dots -25$ °C; $T_{пл.} = -14,2 \dots -13,7$ °C). Газовая фаза представлена углекислотой. Температуры их гомогенизации (в жидкость) составляют 200–220 °C. Вторичные VL включения гомогенизируются в жидкую фазу при 160–180 °C (табл. 2).

В кварце золото-электрум-галенит-халькопирит-тетраэдрит-кварцевой жилы I рудной стадии проанализированы первичные VLC и VLS и псевдотричные VL включения. Первичные включения имеют округлую изометричную, реже остроугольную или вытянутую форму с элементами кристаллографических граней и размеры 7–18 мкм. Солевой состав растворов, оцененный по температурам эвтектики, соответствует хлоридному с ионами Na и K с концентрациями 7,5–14 мас. % NaCl-экв. Температуры гомогенизации включений (в жидкость) составили 210–250 °C. Псевдотричные включения имеют изометричную и удлиненную форму и размеры 5–9 мкм. Газовая фаза первичных VLS включений представлена углекислотой, минеральная фаза – светлоокрашен-

ная изотропная кубического габитуса, вероятно, является хлоридом. При нагревании включения декрипитировали при температурах 260–270 °C. В первичных VLC включениях при комнатной температуре газовые фазы не наблюдались. При их охлаждении наблюдалось отделение газовой вакуоли, которая переходила обратно в газовую фазу при температурах $+8 \dots +9,2$ °C. Температуры гомогенизации первичных VLC включений варьируют от 260 до 280 °C. Полученным температурам гомогенизации углекислоты и полной гомогенизации включений соответствуют плотность углекислоты $\approx 0,13 \dots 0,12$ г/см³ и давление 750–600 бар. В отдельных случаях во включениях этого типа наблюдается черная минеральная фаза, вероятно, представленная рудным минералом (рис. 3, з). Сонахождение пересыщенных VLS и существенно углекислотных VLC включений свидетельствует о процессе кипения флюида [7]. Псевдотричные VL включения в газовой фазе содержат углекислоту, иногда отмечается водяной пар. Температуры гомогенизации установить не удалось, так как при нагреве до температур 190–250 °C включения декрипитировали (табл. 2).

В кварце золото-гессит-науманнит-теннантит-тетраэдрит-кварцевой жилы II рудной стадии изучены первичные VL и VLS и псевдотричные VL включения, расположенные в виде групп или одиночно, размером 4–7 мкм с элементами кристаллографических граней. Первичные VL включения в газовой фазе содержат углекислоту. Для них установлены температуры гомогенизации (в жидкость) 300–320 °C. Первичные VLS включения имеют изометричную и удлиненную форму и размеры до 20 мкм. Они содержат изотропную светлоокрашенную минеральную фазу, вероятно, представленную хлоридом. В отдельных случаях во включениях находится несколько твердых фаз. Газовая фаза первичных VLS включений представлена CO₂ с примесью CH₄. Их температуры гомогенизации (в жидкость) равны 280–290 °C, а концентрации солей – 36,7–37,4 мас. % NaCl-экв. В ряде случаев гомогенизация включений не была достигнута, получены температуры декрипитации VLS включений, равные 270–275 °C. Псевдотричные VL включения характеризуются изометричной формой и размерами 3–5 (до 12) мкм. Они также содержат углекислоту в составе газовой фазы, однако характеризуются более низкими температурами гомогенизации (в жидкость) – 190–270 °C (табл. 2).

В кварце золото-ртутисто-халькопирит-теннантит-тетраэдрит-кварцевых жил II рудной стадии изучены VLC и VL первичные и псевдотричные включения. Включения имеют округлую или вытянутую форму и размеры до 15 мкм. Солевой состав, оцененный по температурам эвтектики, соответствует хлоридному флюиду с ионами Na и K с концентрациями 3,2–5,2 мас. % NaCl-экв. Температуры их гомогенизации (в жидкость) составили 230–180 °C. Жидкая фаза в трехфазных VLC включениях представлена углекислотой. Температура плавления углекислоты ($-56,6$ °C) свидетельствует об отсутствии примесей других газов. Температуры гомогенизации CO₂ в

жидкую фазу (26,5–28,7 °С) и полной (230–180 °С) гомогенизации VLC включений в жидкость указывают на давление флюида ~0,5 кбар. Флюид содержит хлориды Na и K. Температуры гомогенизации (в жидкость) псевдотричных VL и VLC включений составляют 190–120 °С.

В кварце пострудных кварц-турмалиновых прожилков изучены первичные и псевдотричные двухфазные VL флюидные включения. Они имеют размеры до 15 мкм, овальную либо округлую форму с крупными газовыми вакуолями (до 20–25 об. %). Плавление эвтектики растворов первичных включений происходило при температурах от –33 до –33,9 °С, следовательно, флюид имеет MgCl₂-H₂O состав. Температуры гомогенизации (в жидкость) варьируют от 240 до 250 °С. Соленость флюида составляет 6–8 мас. % NaCl-экв. Температуры эвтектики псевдотричных включений образуют интервал –21...–24 °С, что отвечает NaCl-KCl₂-H₂O флюиду с концентрациями солей 5,5–10 мас. %. Температуры гомогенизации составили 210–265 °С.

Геохимические особенности флюида

Валовый анализ водных и газовых вытяжек из флюидных включений из монофракций кварца по методике [8] дал информацию об элементном составе флюида рудных стадий рудопроявления Хаак-Саир. Во включениях в кварце I рудной стадии (табл. 3) среди катионов (г/кг H₂O) преобладает Na (4,54), в подчиненном количестве находятся K (0,24), Ca (0,14) и Mg (0,004). Установлены значимые количества (г/кг H₂O): CO₂ (131), HCO₃⁻ (10,43), Cl⁻ (1,39) и CH₄ (0,08). Из микрокомпонентов в значительных количествах присутствует (мг/кг р-ра): B (393,6), Sb (134,7), As (112,5), Ba (18), Sr (15,4), Fe (5,5), Cu (1,12) и Ag (1,73).

Во включениях в кварце II рудной стадии также преобладает (г/кг H₂O) Na (4,3–7,17), а Ca (0,00–1,8), K (0,37–1,6) и Mg (0,2–0,46) находятся в подчиненном количестве. Содержания летучих компонентов флюида выявлены в следующих концентрациях (г/кг H₂O): CO₂ (27,8–154,9), HCO₃⁻ (17,69–20,68), Cl⁻ (0,34–1,74) и CH₄ (0,071–0,236). Из микрокомпонентов в значимых количествах присутствуют (мг/кг р-ра): Sb (1539–7441), As (120–804), B (123–1076), Ba (449–2807), Sr (41,7–78,8), Fe (8,3–26,7), Mn (4,1–25,2), Pb (0,09–62), Ni (2,8–26,8), Mo (3–6,7), Cu (10,2), Ag (2–6,24), W (6,24) и Bi (до 0,02).

Средний химический состав флюида рудопроявления Хаак-Саир показан на рис. 7.

Изотопный состав S, O и C

Значение δ³⁴S галенита из жил I рудной стадии составляет –0,6 ‰, II рудной стадии – –0,4 ‰, т. е. величины изотопного состава характеризуются устойчивыми околонулевыми значениями в интервале от –0,6 до –0,4 ‰.

Значения δ³⁴S_{H₂S} флюида в соответствии с уравнением фракционирования [9, 10] I рудной стадии находятся в интервале +1,5...+2,1 ‰ (T=280–210 °С),

II рудной стадии – +1,6...+2,6 ‰ (T=290–190 °С), что свидетельствует об участии магматической серы и магматическом генезисе флюида [9–12].

Величина δ¹⁸O кварца рудных жил рудопроявления изменяется от 17,0 до 17,4 ‰, в том числе в кварце ранней рудной стадии – от 17,2 до 17,4 ‰, II – 17,0 ‰ [13]. Значения δ¹⁸O флюида в соответствии с уравнением фракционирования [14, 15] I рудной стадии находятся в интервале +8,0...+5,7 ‰ (T=250–210 °С), II рудной стадии – +6,7...–1,7 ‰ (T=230–120 °С).

Таблица 3. Валовый состав растворов флюидных включений в кварце

Table 3. Bulk fluid inclusion composition in quartz

Компоненты Components	Рудные стадии/Ore substages				Среднее Average
	I		II		
	Проба/Sample				
	СТ-31-8	СТ-31-6	СТ-4-1	СТ-29	
<i>Макрокомпоненты, г/кг воды</i> <i>Bulk components, g/kg H₂O</i>					
CO ₂	131,36	154,99	27,85	63,91	94,53
CH ₄	0,075	0,071	0,129	0,236	0,13
Cl ⁻	1,39	0,34	1,74	0,72	1,05
HCO ₃ ⁻	10,43	17,69	18,40	20,68	16,80
Na	4,54	4,66	7,17	4,38	5,19
K	0,24	0,37	0,85	1,61	0,77
Ca	0,14	1,40	0,00	1,80	0,83
Mg	0,004	0,210	0,212	0,457	0,22
<i>Микрокомпоненты, 10⁻³ г/кг воды</i> <i>Trace elements, 10⁻³ g/kg H₂O</i>					
Sb	134,73	1539,05	–	7441,08	2278,72
Ba	18,01	449,57	1428,77	2807,79	1176,04
B	393,64	679,13	122,57	1076,02	567,84
As	112,25	288,2	119,93	804,44	331,21
Sr	15,36	41,75	66,37	78,81	50,57
Fe	5,56	8,32	20,58	26,67	15,28
Mn	1	4,15	25,2	27,49	14,46
Pb	0,1	2,42	0,09	62,16	16,19
Mo	–	3,07	6,59	6,47	4,033
Li	1,55	3,24	5,73	5,26	3,95
Ni	1,98	2,84	26,76	3,43	8,75
Cu	1,12	–	10,2	–	2,83
Zn	–	141,71	–	–	35,43
Ag	1,73	2,03	6,24	4,31	3,58
W	–	0,77	6,24	–	1,75
Rb	0,23	0,79	0,85	2,13	1
Cr	0,09	0,29	1,55	0,49	0,61
Cd	0,27	1,03	0,21	0,27	0,45
Cs	0,38	0,45	0,35	0,23	0,35
Co	0,07	0,49	0,36	0,31	0,31
Hg	0,24	–	–	0,76	0,25
Ge	0,1	0,06	0,02	0,18	0,09
Au	0,02	0,05	–	0,14	0,05
Tl	–	0,01	0,02	0,05	0,02
Bi	–	0,01	0,02	–	0,008
REE	0,02	0,26	0,96	0,58	0,46
Na/K	18,92	12,59	8,47	2,72	10,68
CO ₂ /CH ₄	1751,47	2182,96	215,9	270,81	1105,29
K/Rb	1043	468	1000	756	816

Примечание. Анализы выполнены в ФГУП ЦНИГРИ (аналитик С.Г. Кряжев). «–» – не обнаружено.

Note. The analyses are performed in FSBI TSNIGRI (operator S.G. Kryazhev). «–» – below the detection limit.

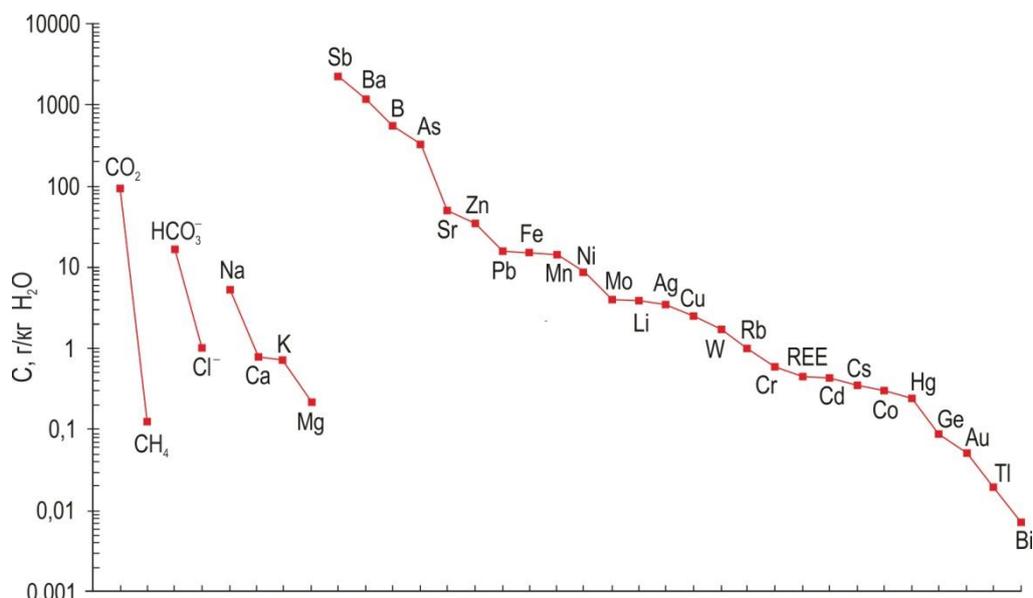


Рис. 7. Средний химический состав флюида рудопроявления Хаак-Саир.
 Fig. 7. Average chemical fluid composition of Khaak-Sair ore occurrence

Величины $\delta^{18}\text{O}$ доломита I рудной стадии находятся в интервале от +17,4 до +17,8 ‰, кальцита II рудной стадии – +16,5 ‰. Изотопные составы $\delta^{18}\text{O}$ флюида, из которого отлагался доломит, в соответствии с уравнением фракционирования [9, 10], образуют интервал от +8,1 до +5,7 ‰ ($T=250\text{--}210^\circ\text{C}$),

кальцита – –2,2 ... +5,9 ‰ ($T=230\text{--}120^\circ\text{C}$). Соответственно, изотопный состав кислорода флюида, ответственного за отложение минеральных ассоциаций I рудной стадии, характеризуется значениями от +8,1 до +5,7 ‰, II рудной стадии – +6,7 ... –2,2 ‰ (рис. 8).

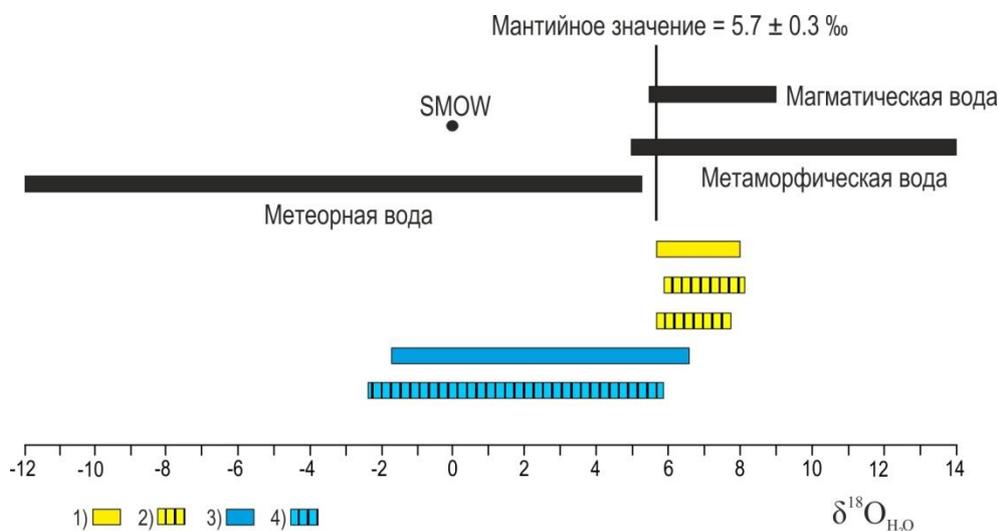


Рис. 8. Изотопный состав кислорода флюида I (1 – кварц, 2 – доломит) и II (3 – кварц, 4 – кальцит) рудных стадий рудопроявления Хаак-Саир

Fig. 8. Oxygen isotopic composition of the fluid of I (1 – quartz, 2 – dolomite) and II (3 – quartz, 4 – calcite) ore substages of Khaak-Sair ore occurrence

Изотопные данные кислорода флюида I рудной стадии попадают в область значений для флюидов как магматического, так и метаморфического происхождения, но не выходят за пределы поля магматического флюида. Эти данные и значения $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$ флюида от +1,5 до +2,1 ‰, предполагают поступление воды из магматического источника ($\delta^{18}\text{O}=+5,5 \dots +9 \text{ ‰}$). Изотопные данные кислорода флюида (от +6,7 до –2,2 ‰) II рудной стадии указывают на смешение рудонос-

ных магматических флюидов с метеорной водой (рис. 6).

Величины $\delta^{13}\text{C}$ доломита II рудной стадии варьируют от –0,4 до –0,7 ‰; кальцита II рудной стадии составляет –0,3 ‰, и рассчитанные величины изотопного состава $\delta^{13}\text{C}$ во флюиде, в соответствии с уравнениями [16, 17], изменяются от –1,2 до +0,1 ‰ ($T=250\text{--}210^\circ\text{C}$) и от –3,3 до +0,5 ‰ ($T=230\text{--}120^\circ\text{C}$), соответственно.

Изотопный состав $\delta^{13}\text{C}$ флюида (от $-3,3$ до $+0,5$ ‰) предполагает поступление в гидротермальную систему углерода из разных источников: гранитоидных магм и заимствование его из вмещающих карбонатных и терригенных пород. Отметим, что значения мантийного $\delta^{13}\text{C}$ составляют от -7 до -2 ‰, гранитоидных магм $-6...-2$ ‰ [18].

Обсуждение результатов

Результаты $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датирования синрудных лиственитов ($379,4 \pm 4,4$ млн лет) рудопроявления хорошо согласуются с $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ возрастом ($376,5 \pm 3,4$ млн лет) даек габбро III фазы баянкольского комплекса (D_3bn), что подтверждает парагенетическую связь оруденения с баянкольским комплексом позднего девона.

Проведенные исследования флюидных включений в кварце методами термометрии и рамановской спектроскопии показали, что сопряженные листвениты отлагались при участии Na-K хлоридного флюида с соленостью $3,5-6,5$ мас. % NaCl-экв. при температурах не менее $200-250$ °C. Эти данные согласуются с ранее полученными результатами по флюидным включениям в кварце из лиственитов Сарыгдашского рудного поля (Хаак-Саирского рудопроявления) [19], установившими, что турмалинсодержащие листвениты образовались при участии углекислых растворов при $150-325$ °C и $P \sim 0,4...1,0$ кбар ($\sim 1,2...3$ км). Отметим, что по данным [20] при близких температурах ($150-275$ °C) и солености $6-8$ мас. % NaCl экв. образовались турмалинсодержащие листвениты Эдыгейского гипербазитового массива, расположенного в 25 км к ЮЗ от рудопроявления Хаак-Саир.

Ранние рудные жилы рудопроявления с золотом, электрумом, арсенопиритом и блеклыми рудами отлагались при $P \sim 0,6-0,75$ кбар ($\sim 1,8-2,3$ км) водно-углекислотным флюидом состава NaCl-KCl-H₂O, NaCl-FeCl₂-H₂O±CO₂ с концентрациями солей $7,5-18,8$ мас. % NaCl-экв. при $210-310$ °C.

Поздние рудные жилы с ртутистым золотом, селенидами Au, Ag и Hg, гесситом, акантитом, бурнонитом, аргентотетраэдритом и баритом отлагались при $P \sim 0,5$ кбар ($\sim 1,5$ км) при участии флюида состава NaCl-H₂O, NaCl-KCl-H₂O±CO₂±CH₄ с концентрациями солей $4-32,9$ мас. % при $120-320$ °C.

Сосуществующие однофазные газовые, жидкостные и более концентрированные VL и VLS включения свидетельствуют о гетерогенизации флюида [21], что позволяет считать температуры гомогенизации включений истинными температурами флюида при минералообразовании. В свою очередь, наличие гетерогенного флюида, состоящего из высококонцентрированного водно-солевого раствора в равновесии с газовой фазой, свидетельствует о его вскипании, а уменьшение концентраций солей при снижении температур могло быть вызвано их смешением с метеорными водами [22]. Об этом свидетельствует также разброс и падение значений $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ флюида от $+8,0$ до $-1,6$ ‰, что обеспечено участием в рудообразовании низкоконцентрированных изотопно-облегченных метеорных вод [23].

Пострудные кварц-турмалиновые прожилки образовались из водно-хлоридного Na-K±Mg флюида с концентрациями солей $5,5...10,4$ мас. % NaCl-экв. при температурах $200-360$ °C. Сравнивая с генетически родственным рудопроявлением Улуг-Саир АМРУ, можно предположить, что ранние предрудные кварц-турмалиновые жилы на Хаак-Саире отлагались при более высоких температурах из растворов с хлоридами Na, K, Mg, т. к., по нашим данным, на рудопроявлении Улуг-Саир сходные ранние предрудные турмалин-кварцевые жилы отлагались из комплексных растворов состава MgCl₂-H₂O+NaCl-KCl-H₂O с концентрациями солей $8...10,6$ мас. % NaCl-экв. при $320-375$ °C.

Развитие кварц-турмалиновых метасоматитов и жил на рудопроявлении Хаак-Саир косвенно указывает на магматогенное происхождение минералообразующего флюида [24]. В пользу этого также свидетельствует изотопный состав $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$ флюида I (от $+1,5$ до $+2,1$ ‰) и II ($+1,6...+2,6$ ‰) рудных стадий. Кроме того, это подтверждают высокие значения солености флюида и его комплексный солевой состав с хлоридами натрия, калия и магния и гидрокарбонатами. Подобные признаки участия магматических флюидов установлены в ряде современных [25] и палеозойских золотосодержащих гидротермальных систем [26, 27].

По данным ICP-MS, среди анионов во флюиде преобладают гидрокарбонаты, концентрации которых существенно выше концентрации хлора. Из катионов флюид наиболее обогащен Na с примесями Ca, K и Mg, и его можно отнести к гидрокарбонатно-хлоридно-натриевому типу, что не противоречит данным термометрии. Обогащение флюида рудными элементами (Sb, As, Cu, Zn, Pb, Ag, Ba, Sr) отражает состав сульфосолей, сульфидов и сульфатов золотосодержащих минеральных ассоциаций. Присутствие в нем Mo, Ba и Sr свидетельствует о генетической связи оруденения с гранитоидным магматизмом, а Ni, Co и Cr обусловлены составом рудовмещающих пород.

Обобщая результаты исследования флюидных включений, установлено, что флюид имел метан-углекислотно-водно-хлоридный состав. В процессе минералообразования от ранних жил к поздним наблюдается снижение доли CO₂ во флюиде. На заключительных стадиях минералообразования флюид представлен водно-солевым раствором с повышенными содержаниями Ba, Sb и As, что согласуется с минералогическими данными (наличием барита и широким развитием блеклых руд). Степень окисленности флюида (CO₂/CO₂+CH₄) стабильна и составляет $0,9$.

Изотопный состав кислорода воды и серы флюида рудопроявления Хаак-Саир свидетельствует об участии магматогенного флюида в отложении минеральных ассоциаций ранних стадий, а на завершающих стадиях происходило смешение магматического флюида с метеорными водами.

Изотопные значения углерода флюида (от $-3,3$ до $+0,5$ ‰) свидетельствуют о заимствовании части углерода из вмещающих терригенных пород.

Минеральные парагенезисы ранней рудной стадии (I) свидетельствуют о том, что рудоотложение происходило при высокой фугитивности (f) сульфидной серы $\lg f(S_2) = 10^{-15.5} - 10^{-6}$ (при $T = 200$ °C), поздней рудной стадии (II) – при $\lg f(S_2) = 10^{-25} - 10^{-9}$, $\lg f(Fe_2) = 10^{-21} - 10^{-9}$ и $\lg f(Se_2) = 10^{-21} - 10^{-12}$ (при $T = 200$ °C) [28–30]. Уменьшение fS_2 сопровождалось ростом fO_2 , т. к. широкое развитие минералов ртутистого золота и селенидов Au, Ag и Hg в поздних рудных жилах свидетельствует о рудообразовании при высокой fO_2 , предположительно, из-за смешения рудоносного флюида с высокоаэрированными метеорными водами [31].

Относительно невысокое давление (0,5–0,75 кбар), определенное для рудных стадий, косвенно указывает на малый уровень среза, а также на близость значений полученных температур гомогенизации к истинным температурам минералообразования. Эти результаты согласуются с минералого-геохимическими особенностями руд на рудопроявлении Хаак-Саир (широкое развитие минералов ртутистого золота, серебристых блеклых руд, минералов селена и теллура), свидетельствующими о близповерхностном (~1,5–3 км) уровне отложения оруденения [1].

Таким образом, результаты изотопно-геохимических и термобарогеохимических исследований хорошо согласуются с полученными ранее данными по минеральным парагенезисам и типоморфным особенностям золота [4]. Важную роль в процессе рудообразования играли температурный геохимический барьер и гетерофазное состояние флюида, связанное с его вскипанием [22], фиксирующимся, по термобарогеохимическим данным, наличием высококонцентрированного (до 37 мас. % NaCl-экв.) водно-солевого флюида в равновесии с газовой фазой. Полученные результаты указывают на сходство генезиса рудопроявления Хаак-Саир с эпитер-

мальными Au-Ag месторождениями, где часто наблюдается участие метеорных вод и широкий разброс значений изотопного состава $\delta^{18}O$ [32–42].

Заключение

Возраст синрудных лиственитов (379,4±4,4 млн лет) рудопроявления Хаак-Саир соответствует возрасту становления баянкольского комплекса позднего девона. Рудные жилы отлагались при давлении 0,5–0,75 кбар (~1,5–2,3 км) с участием гетерофазного метан-углекислотно-водно-хлоридного (Na-K±Fe) флюида с вариациями солёности 4–37 мас. % NaCl-экв. в температурном интервале 320–120 °C при изменениях fO_2 , fS_2 , fSe_2 и fTe_2 .

Рудоотложение протекало в условиях эволюции единого по генезису гетерофазного магматического флюида, сопровождающейся его вскипанием и/или смешением с высокоаэрированными приповерхностными водами. Предполагается, что в процессе отложения ранних рудных жил участвовал среднеконцентрированный магматический флюид, а на завершающих стадиях он смешивался с метеорными водами, становясь более низкотемпературным водно-солевым раствором с пониженной солёностью. Вовлечение в рудообразующую систему метеорных вод, обогащенных кислородом, способствовало росту fO_2 с одновременным понижением fS_2 , что обусловило разнообразие минеральных форм Au, Ag и Hg.

Авторы благодарны Е.К. Дружковой за помощь в проведении работ. Полевые и изотопные исследования выполнены по государственному заданию ТувИКОПР СО РАН (0384-2016-0012, 0307-2021-0002), термобарогеохимические исследования выполнены в рамках государственных заданий ИГМ СО РАН (0330-2016-0002) и ИМин ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кужугет Р.В. Золото-теллуридное оруденение Алдан-Маадырского рудного узла (Западная Тува): минералого-геохимические особенности руд и условия их образования: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Новосибирск, 2014. – 20 с.
2. Рудные формации Тувы / В.В. Зайков, В.И. Лебедев, В.Г. Тюлькин, В.Н. Гречищева, К.С. Кужугет. – Новосибирск: Наука, 1981. – 201 с.
3. Кононенко Н.Б. Предварительные результаты по золотоносной Алдан-Маадырской зоне (Республика Тыва) // Геология и минеральные ресурсы Центральной Сибири: Материалы научно-практической конференции. – Красноярск: Красноярскгеолсъемка, 2011. – С. 162–166.
4. Золоторудная минерализация Хаак-Саирского золото-кварцевого рудопроявления в лиственитах (Западная Тува) / Р.В. Кужугет, В.В. Зайков, В.И. Лебедев, А.А. Монгуш // Геология и геофизика. – 2015. – Т. 56. – № 9. – С. 1693–1712.
5. Монгуш А.А., Кужугет Р.В., Дружкова Е.К. Особенности состава магматических пород и Ag-Ag данные о возрасте базитовых даек Алдан-Маадырской золоторудной зоны (Западная Тува) // Металлогения древних и современных океанов-2011. – Миасс: ИМин УрО РАН, 2011. – С. 262–268.
6. Реддер Э. Флюидные включения в минералах. – М.: Мир, 1978. – Т. 1. – 360 с.
7. Особенности эпитермального рудообразования в Кедонском палеозойском вулканоплутоническом поясе Северо-Востока России, по данным геохимических исследований Au–Ag оруденения / А.В. Волков, А.А. Сидоров, Н.Е. Савва, В.Ю. Прокофьев, Е.Е. Колова, К.Ю. Мурашов, М.И. Земскова // Вулканология и сейсмология. – 2016. – № 6. – С. 3–21.
8. Кряжев С.Г., Прокофьев В.Ю., Васюта Ю.В. Использование метода ICP MS при анализе рудообразующих флюидов // Вестник МГУ. Серия 4. Геология. – 2006. – № 4. – С. 30–36.
9. Ohmoto H., Rye R.O. Isotopes of sulfur and carbon // Geochemistry of hydrothermal ore deposits. – N.Y.: John Wiley and Sons, 1979. – P. 509–567.
10. Li Y., Liu J. Calculation of sulfur isotope fractionation in sulfides // Geochimica Cosmochimica Acta. – 2006. – V. 70. – P. 1789–1795.
11. Ohmoto H. Stable isotope geochemistry of ore deposits // Review Mineralogy. – 1986. – V. 16. – P. 491–560.
12. Hoefs J. Stable isotope geochemistry. – Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2009. – 281 p.
13. Мелекесцева И.Ю., Каварая Х., Мацубая О. Источник флюида при формировании золото-кварцевых жил Хаак-Саирского и Улуг-Саирского месторождений (Западная Тува) по данным изотопного состава кислорода // Металлогения древних и современных океанов-2012. – Миасс: ИМин УрО РАН, 2012. – С. 210–213.
14. Oxygen isotope fractionation in the quartz-water-salt system / L-G. Zhang, J.-X. Liu, H.B. Zhou, Z.-S. Chen // Economic Geology. – 1989. – V. 89. – P. 1643–1650.
15. Zheng Y.F. Oxygen isotope fractionation in carbonate and sulfate minerals // Geochemical Journal. – 1999. – V. 33. – P. 109–126.
16. Bottinga Y. Calculated fractionation factors for carbon and hydrogen isotope exchange in the system calcite-carbon dioxide-

- graphite-methane-hydrogen-water vapor // *Geochimica et Cosmochimica Acta.* – 1969. – V. 33. – P. 49–64.
17. Sheppard S.M.F., Schwartz H.P. Fractionation of carbon and oxygen isotopes and magnesium between coexisting metamorphic calcite and dolomite // *Contributions to Mineralogy and Petrology.* – 1970. – V. 26. – P. 161–198.
 18. Jia Y., Kerrich R. Giant quartz vein systems in accretionary orogenic belts: the evidence for a metamorphic fluid origin from $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{13}\text{C}$ studies // *Earth and Planetary Science Letters.* – 2000. – V. 184. – P. 211–224.
 19. Лебедев В.И. Кобальтовые месторождения Тувы и сопредельных регионов Центральной Азии. – Барнаул: Изд-во «Новый формат», 2018. – 203 с.
 20. Борисенко А.С. Физико-химические условия формирования листовитов Алтае-Саянской складчатой области (по данным изучения газово-жидких включений // *Геология и генезис рудных месторождений Юга Сибири.* – Новосибирск: Наука, 1977. – С. 144–157.
 21. Исследование флюидных включений в минералах Олимпиадинского Au-(Sb-W) месторождения (Енисейский край) / В.Ю. Прокофьев, З.Б. Афанасьева, Г.Ф. Иванова, М.К. Буарон, Х. Мариньяк // *Геохимия.* – 1994. – Т. 7. – С. 1012–1029.
 22. Wilkinson J.J. Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits // *Lithos.* – 2001. – V. 55. – P. 229–272.
 23. Состав магматогенных флюидов, факторы их геохимической специализации и металлоносности / А.С. Борисенко, А.А. Боровиков, Л.М. Житова, Г.Г. Павлова // *Геология и геофизика.* – 2006. – Т. 47 (12). – С. 1308–1325.
 24. Бор и борные кислоты в эндогенных рудообразующих флюидах / В.Ю. Прокофьев, И.С. Перетяжко, С.З. Смирнов, Н.Н. Акинфиев, Ф.Г. Рейф, Ю.М. Ишков, Б.Р. Тагиров, Е.О. Грознова, М.В. Воронин. – М.: Пасва, 2003. – 192 с.
 25. Gold-rich polymetallic sulfides from the Lau back arc and implications for the geochemistry of gold in sea-floor hydrothermal systems of the Southwest Pacific / P.M. Herzig, M.D. Hannington, Y. Fouquet, U. Stackelberg, S. Petersen // *Economic Geology.* – 1993. – V. 88. – № 8. – P. 2182–2209.
 26. Бакшеев И.А., Прокофьев В.Ю., Устинов В.И. Условия формирования жильного кварца Березовского золоторудного поля, Средний Урал, по данным изучения флюидных включений и изотопным данным // *Материалы Уральской летней минералогической школы-1998.* – Екатеринбург: УГГА, 1998. – С. 41–49.
 27. Yang K., Scott S.D. Magmatic fluids as a source of metals in seafloor hydrothermal systems // *Geophysical Monograph Series.* – 2006. – № 166. – P. 163–184.
 28. Barton P.B., Skinner B.J. Sulfide mineral stabilities // *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits* / Ed. by H.L. Barnes. – New York: John Wiley and Sons, 1979. – P. 278–403.
 29. Afifi A.M., Kelly W.C., Essene E.J. Phase relations among tellurides, sulfides, and oxides: I. Thermochemical data and calculated equilibria // *Economic Geology.* – 1988. – V. 83. – P. 377–394.
 30. Физико-химические условия образования минеральных парагенезисов золота и серебра на месторождении Валунистое (Чукотка) / Т.В. Журавкова, Г.А. Пальянова, Ю.А. Калинин, Н.А. Горячев, В.Ю. Зинина, Л.М. Житова // *Геология и геофизика.* – 2019. – Т. 60. – № 11. – С. 1565–1576.
 31. Бортников Н.С., Генкин А.Д., Коваленкер В.А. Минералогическо-геохимические показатели условий гидротермального рудообразования // *Эндогенные рудные районы и месторождения.* – М.: Наука, 1987. – С. 40–59.
 32. Berger B.R., Henley R.W. Advances in understanding of epithermal gold-silver deposits with special reference to the Western United States // *Economic Geology.* – 1989. – V. 84. – P. 405–423.
 33. Hedenquist J.W., Brown P.R., Allis R.G. Epithermal gold mineralization // *Applied Geology Association.* – Wairakei: New Zealand, 1998. – 162 p.
 34. Physicochemical models of formation of gold-silver ore mineralization at the Rogovik deposit (Northeastern Russia) / T.V. Zhuravkova, G.A. Palyanova, K.V. Chudnenko, R.G. Kravtsova, I.R. Prokopyev, A.S. Makshakov, A.S. Borisenko // *Ore Geology Reviews.* – 2017. – V. 91. – P. 1–20.
 35. Условия формирования Au-Ag эпitherмальной минерализации Кайенмываамского рудного поля (Центральная Чукотка) / В.Ю. Прокофьев, А.В. Волков, Ю.Н. Николаев, И.А. Калько, Е.А. Власов, А.А. Сидоров // *Руды и металлы.* – 2019. – № 1. – С. 52–57.
 36. Contrasting fluids in the Svetlinsk gold-telluride hydrothermal system, South Urals / O. Vikent'eva, V. Prokofiev, E. Groznova, I. Vikentyev, N. Bortnikov, A. Borovikov, S. Kryazhev, M. Pritchkin // *Minerals.* – 2020. – V. 1. – P. 1–27.
 37. Таежное эпitherмальное жильное месторождение серебряных руд (Сихотэ-Алинь): региональная позиция, условия образования, геохимия и минеральный состав / В.В. Раткин, Л.Ф. Симаненко, В.А. Пахомова, О.А. Елисеева // *Тихоокеанская геология.* – 2021. – Т. 40. – № 2. – С. 21–38.
 38. Mineral chemistry, fluid inclusion and stable isotope studies of the Suyoc epithermal veins: Insights to Au-Cu mineralization in southern Mankayan Mineral District, Philippines / O.B. Soberano, J.A.S. Gabo-Rati, K.L. Queaño, C.B. Dimalanta, Jr.G.P. Yumul, E.S. Andal, K. Yonezu and A.J. Boyce // *Ore Geology Reviews.* – 2021. – V. 131. – P. 104035.
 39. A review of intermediate sulfidation epithermal deposits and subclassification / L. Wang, K.-Z. Qin, G.-X. Song, G.-M. Li // *Ore Geology Reviews.* – 2019. – V. 10. – P. 434–456.
 40. Гусев А.И., Табакаева Е.М. Магматизм и эпitherмальное Ag-Au оруденение Красноярского рудного поля Горного Алтая // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов.* – 2019. – Т. 330. – № 1. – С. 26–38.
 41. Условия формирования Au-Ag эпitherмальной минерализации Амгуэмо-Канчаланского вулканического поля (Восточная Чукотка) / А.В. Волков, В.Ю. Прокофьев, А.А. Сидоров, С.Ф. Винокуров, А.А. Елманов, К.Ю. Мурашов, Н.В. Сидорова // *Вулканология и сейсмология.* – 2019. – № 5. – С. 68–80.
 42. Эпitherмальное Au-Ag месторождение Валунистое (Восточная Чукотка, Россия): геологическое строение, минералогическо-геохимические особенности и условия рудообразования / А.В. Волков, В.Ю. Прокофьев, С.Ф. Винокуров, О.В. Андреева, Г.Д. Киселева, А.Л. Галямов, К.Ю. Мурашов, Н.В. Сидорова // *Геология рудных месторождений.* – 2020. – Т. 62. – № 2. – С. 107–133.

Поступила 28.10.2021 г.

Информация об авторах

Кужугет Р.В., кандидат геолого-минералогических наук, директор Тувинского института комплексного освоения природных ресурсов СО РАН.

Анкушева Н.Н., кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник лаборатории минералогии рудогенеза Института минералогии ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН.

Кадыр-оол Ч.О., инженер лаборатории геодинимики, магматизма и рудообразования Тувинского института комплексного освоения природных ресурсов СО РАН.

Редина А.А., младший научный сотрудник лаборатории рудоносности щелочного магматизма Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН.

Прокофьев И.Р., кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник лаборатории рудоносности щелочного магматизма Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН.

Пономарчук А.В., младший научный сотрудник лаборатории изотопно-аналитической геохимии Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН.

UDC 553.2: 549.283 (571.52)

KHAAK-SAIR GOLD-SULFIDE-QUARTZ ORE OCCURRENCE (WESTERN TUVA): DATING, PT PARAMETERS, FLUID COMPOSITION, AND ISOTOPES OF S, O AND C

Renat V. Kuzhuget¹,
rkuzhuget@mail.ru

Natalia N. Ankusheva²,
ankusheva@mail.ru

Chayana O. Kadyr-ool¹,
kadyrool91@mail.ru

Anna A. Redina³,
anna-red@outlook.com

Ilya R. Prokopyev³,
prokopev_ilya@mail.ru

Anton V. Ponomarchuk³,
antponomar@gmail.com

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

² Institute of Mineralogy SU FRC MG UB RAS,
1, Ilmenny Reserve, Miass, 456317, Russia.

³ VS Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS,
3, Academician Koptyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

The relevance of the research is caused by the need to determine the age and fluid regime of formation of Khaak-Sair gold-sulfide-quartz ore occurrence in listwanites, characterized by a peculiar ore mineral composition, expressed in the presence of mercurial gold, selenides (fichesserite, naumannite, timannite, claustallite) and tellurides (hessite, Te-bismuthite and coloradoite).

The research is aimed to date and examine PT ore-bearing fluid parameters and geochemical peculiarities, and the fluid sources of Khaak-Sair gold-sulfide-quartz ore occurrence in Western Tuva.

Methods. ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating was carried out by the method of step heating. The optical studies of ores were performed on Olympus BX41 and P-213M optical microscopes. The mineral composition was detected using MIRA 3 LMU scanning electron microscope with EDU of Oxford Instruments Nanoanalysis Ltd. The temperatures, salt composition, salinities and fluid pressures were obtained from individual fluid inclusions using Linkam TMS-600 stage equipped with Olympus BX 51 optical microscope; the volatile composition of fluid inclusions was examined on Ramanor U-1000 spectrometer with the Horiba DU420E-OE-323 detector, Millennia Pro laser (Spectra-Physics); the bulk volatile composition of the fluid was determined on the Agilent 6890 gas chromatograph, the anions in the water extraction was estimated on the CVET-3000 ion chromatograph, the cation and trace elements were detected by ICP MS (Elan-6100); the sulfur isotope ratios in galena were calculated on Finnigan MAT Delta gas mass-spectrometer in double-entry mode (analysts V.N. Reutsky and M.N. Kolbasova, IGM SB RAS); $\delta^{18}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ isotopic ratios in quartz and carbonates were examined on Stable Isotope Ratio Mass Spectrometer FinniganTM MAT 253 with Finnigan GasBench II sampler and IAEA standards: NBS-18 and NBS-19 (analyst M.N. Pyryaev, IGM SB RAS) and Isoprime with AQS (Akita Quartz Standard, analysts H. Kavarai, O. Matsubaya, University of Akita), respectively.

Results. The ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating of synore listwanites is shown 379,4±4,4 million years that corresponds to the Late Devonian. We identified that the ore hosted listwanites were formed due to aqueous Na-K-chloride fluid with salinity of 3,4–6,5 wt. % NaCl eqv and temperatures at least 325–200 °C. Gold-sulfide-quartz veins were formed at P~0,5–0,75 kbar (~1,5–2,3 km) due to CO₂-water chloride (Na-K±Fe) fluid containing CH₄ with salinity ranged between 4,5 and 37,4 wt. % NaCl eqv. and temperatures from 320 up to 120 °C (I ore substage – 310–200 °C and II ore substage – 320–120 °C), and with fO₂, fS₂, fSe₂ and fTe₂ variations that have contributed to the diversity of Au, Ag and Hg mineral forms. The values of $\delta^{34}\text{S}$ from galena vary from –0,6 to –0,4 ‰, and the calculated values of $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$ of I ore substage fluid vary from +1,5 to +2,1 ‰ (for T=280–210 °C), and II ore substage fluid – +1,6...+2,6 ‰ (for T=290–190 °C), which indicates the magmatic origin of sulfur. Values of $\delta^{18}\text{O}$ in quartz from ore veins vary from 17,0 to 17,4 ‰, dolomite – +17,4...+17,8 ‰, calcite – +16,5 ‰, and calculated values of $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{S}}$ of I ore substage fluid vary from +8,1 to +5,7 ‰ (for T=250–210 °C), and II ore substage – +6,7 ‰. ...–2,2 ‰ (for T=230–120 °C) suggested that in the early stages of the ore-forming process fluid was of magmatic origin, and in later stages it was mixed with meteoric waters. The values of $\delta^{13}\text{C}$ in dolomite of I ore substage vary from –0,4 to –0,7 ‰; calcite of II ore substage – –0,3 ‰, and the calculated values of $\delta^{13}\text{C}$ in the fluid vary from –1,2 to +0,1 ‰ (for T=250–210 °C) and from –3,3 to +0,5 ‰ (for T=230–120 °C), respectively. This presupposes carbon inflow from granitoid magmas and/or its borrowing from host rocks. The composition of the fluid was transformed from early to late substages from carbon dioxide to water chloride with a decrease in chloride amounts of alkali and alkali-earth metals (from 37,4 to 4 wt. % NaCl eqv).

Key words:

Native gold, fluid inclusions, quartz, dating, stable isotopes, gold deposits, Tuva.

The authors are grateful to Evgenia K. Druzhkova for research assistance. Mineralogical, geochemical and isotopic researches were supported by the State Contract of TuvIEN SB RAS (0384-2016-0012, 0307-2021-0002), fluid inclusion study was supported by State Contract of the Institute of Geology and Mineralogy SB RAS (0330-2016-0002) and Institute of Mineralogy SU FRC MG UB RAS.

REFERENCES

- Kuzhuget R.V. *Zoloto-telluridnoe orudnenie Aldan-Maadyrskogo rudnogo uzla (Zapadnaya Tuva): mineralogo-geokhimicheskie osobennosti rud i usloviya ikh obrazovaniya*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Gold-telluride mineralization of the Aldan-Maadyr ore cluster (Western Tuva): mineralogical and geochemical peculiarities of ores and their formation conditions. Cand. Diss. Abstract]. Novosibirsk, 2014. 20 p.
- Zaykov V.V., Lebedev V.I., Tyulkin V.G., Grechishcheva V.N., Kuzhuget K.S. *Rudnye formatsii Tuvy* [Ore formations of Tuva]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1981. 201 p.
- Kononenko N.B. *Predvaritelnye rezultaty po zolotonosnoy Aldan-Maadyrskoy zone (Respublika Tyva)* [Preliminary results of the Aldan-Maadyr gold-bearing zone (Republic of Tyva)]. *Geologiya i mineralnye resursy Tsentralnoy Sibiri: Materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Geology and Mineral Resources of Central Siberia. Proceedings of the Scientific and Practical Conference]. Krasnoyarsk, Krasnoyarskgeolsemka Publ., 2011. pp. 162–166.
- Kuzhuget R.V., Zaikov V.V., Lebedeva V.I., Mongush A.A. Gold mineralization of the Khaak-Sair gold-quartz ore occurrence in listwanites (western Tuva). *Russian Geology and Geophysics*, 2015, vol. 56, pp. 1332–1348.
- Mongush A.A., Kuzhuget R.V., Druzhkova E.K. *Osobennosti sostava magmaticheskikh porod i Ar-Ar dannye o vozraste bazitovykh daek Aldan-Maadyrskoy zolotorudnoy zony (Zapadnaya Tuva)* [Composition of igneous rocks and Ar-Ar data on the age of basic dikes of the Aldan-Maadyr gold ore zone (Western Tuva)]. *Metallogeniya drevnikh i sovremennykh okeanov-2011* [The metallogeny of ancient and modern oceans]. Miass, IMin UB RAS Publ., 2011. pp. 262–268.
- Roedder E. *Flyuidnye vklucheniya v mineralakh* [Fluid inclusions in minerals]. Moscow, Mir Publ., 1987. 360 p.
- Volkov A.V., Sidorov A.A., Savva N.E., Prokofev V.Yu., Kolova E.E., Murashov K.Yu., Zemskova M.I. Epithermal mineralization in the Kedon Paleozoic volcano-plutonic belt, Northeast Russia: Geochemical studies of Au–Ag mineralization. *Journal of Volcanology and Seismology*, 2019, vol. 11, no. 1, pp. 1–19.
- Kryazhev S.G., Prokofiev V.Yu., Vasyuta Yu.V. *Ispolzovanie metoda ICP MS pri analize rudoobrazuyushchikh flyuidov* [The usage of ICP MS for ore-forming fluid analysis]. *Vestnik MGU*, 2006, no. 4, pp. 30–36.
- Ohmoto H., Rye R.O. *Isotopes of sulfur and carbon. Geochemistry of hydrothermal ore deposits*. N.Y., John Wiley and Sons, 1979. pp. 509–567.
- Li Y., Liu J. Calculation of sulfur isotope fractionation in sulfides. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 2006, vol. 70, pp. 1789–1795.
- Ohmoto H. Stable isotope geochemistry of ore deposits. *Review Mineralogy*, 1986, vol. 16, pp. 491–560.
- Hoefs J. *Stable isotope geochemistry*. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2009. 281 p.
- Melekestseva I.Yu., Kavaraya H., Matsubaya O. *Istochnik flyuida pri formirovani zoloto-kvartsevykh zhil Khaak-Sairskogo i Ulug-Sairskogo mestorozhdeniy (Zapadnaya Tuva) po dannym izotopnogo sostava kisloroda* [The fluid source at the gold-quartz veins formation of Khaak-Sair and Ulug-Sair deposits (Western Tuva)]. *Metallogeniya drevnikh i sovremennykh okeanov-2012* [The metallogeny of ancient and modern oceans]. Miass, IMin UB RAS Publ., 2012. pp. 210–213.
- Zhang L.-G., Liu J.-X., Zhou H.B., Chen Z.-S. Oxygen isotope fractionation in the quartz-water-salt system. *Economic Geology*, 1989, vol. 89, pp. 1643–1650.
- Zheng Y.F. Oxygen isotope fractionation in carbonate and sulfate minerals. *Geochemical Journal*, 1999, vol. 33, pp. 109–126.
- Bottinga Y. Calculated fractionation factors for carbon and hydrogen isotope exchange in the system calcite-carbon dioxide-graphite-methane-hydrogen-water vapor. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1969, vol. 33, pp. 49–64.
- Sheppard S.M.F., Schwartz H.P. Fractionation of carbon and oxygen isotopes and magnesium between coexisting metamorphic calcite and dolomite. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1970, vol. 26, pp. 161–198.
- Jia Y., Kerrich R. Giant quartz vein systems in accretionary orogenic belts: the evidence 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.
- Lebedev V. I. *Kobaltovye mestorozhdeniya Tuvy i sopredelnykh regionov Tsentralnoy Azii* [Cobalt deposits of Tuva and adjacent regions of Central Asia]. Barnaul, New format Publ., 2018. pp. 173–174.
- Borisenko A.S. *Fiziko-khimicheskie usloviya formirovaniya listvenitov Altae-Sayanskoy skladchatoy oblasti (po dannym izucheniya gazovo-zhidkikh vklucheniya)* [Physicochemical conditions for the formation of listvenites of the Altai-Sayan folded area (according to the study of gas-liquid inclusions)]. *Geologiya i genezis rudnykh mestorozhdeniy Yuga Sibiri* [Geology and genesis of ore deposits in the South of Siberia]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1977. pp. 144–157.
- Prokofev V.Yu., Afanaseva Z.B., Ivanova G.F., Buaron M.K., Marinyak H. *Issledovanie flyuidnykh vklucheniya v mineralakh Olimpiadinskogo Au-(Sb-W) mestorozhdeniya (Eniseyskiy kryazh)* [Fluid inclusion study of minerals from Olimpiadinsky Au-(Sb-W) deposit (the Yenisey Ridge)]. *Russian Geochemistry*, 1994, vol. 7, pp. 1012–1029.
- Wilkinson J.J. Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. *Lithos*, 2001, vol. 55, pp. 229–272.
- Borisenko A.S., Borovikov A.A., Zhitova L.M., Pavlova G.G. Composition of magmatogenic fluids and factors determining their geochemistry and metal contents. *Russian Geology and Geophysics*, 2006, vol. 47, no. 12, pp. 1308–1325. In Rus.
- Prokofev V.Yu., Peretyazhko I.S., Smirnov S.Z., Tagirov B.R., Groznova E.O., Samsonova E.A. *Bor i bornye kisloty v endogennykh rudoobrazuyushchikh flyuidakh* [Boron and boric acid in endogenous ore-forming processes]. Moscow, PASVA Publ., 2003. 192 p.
- Herzig P.M., Hannington M.D., Fouquet Y., Stackelberg U., Petersen S. Gold-rich polymetallic sulfides from the Lau back arc and implications for the geochemistry of gold in sea-floor hydrothermal systems of the Southwest Pacific. *Economic Geology*, 1993, vol. 88, no. 8, pp. 2182–2209.
- Baksheev I.A., Prokofev V.Yu., Ustinov V.I. *Usloviya formirovaniya zhilnogo kvartsa Berezovskogo zolotorudnogo polya, Sredniy Ural, po dannym izucheniya flyuidnykh vklucheniya i izotopnym dannym* [Conditions of formation of vein quartz of the Berezovsky gold ore field, the Middle Urals: fluid inclusions and isotope data]. *Materialy Uralskoy letney mineralogicheskoy shkoly-1998* [Materials of the Ural Summer Mineralogical School-1998]. Ekaterinburg, UGGGA Publ., 1998. pp. 41–49.
- Yang K., Scott S.D. Magmatic fluids as a source of metals in sea-floor hydrothermal systems. *Geophysical Monograph Series*, 2006, no. 166, pp. 163–184.
- Barton P.B., Skinner B.J. Sulfide mineral stabilities. *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*. Ed. by H.L. Barnes. New York, John Wiley and Sons, 1979. pp. 278–403.
- Affii A.M., Kelly W.C., Essene E.J. Phase relations among tellurides, sulfides, and oxides: I. Thermochemical data and calculated equilibria; II. Applications to telluride-bearing ore deposits. *Economic Geology*, 1988, vol. 83, pp. 377–394.
- Zhuravkova T.V., Palyanova G.A., Kalinin Y.A., Goryachev N.A., Zinina V.Y., Zhitova L.M. Physicochemical conditions of formation of gold and silver parageneses at the valunistoe deposit (Chukchi peninsula). *Russian Geology and Geophysics*, 2019, vol. 60 (11), pp. 1247–1256.
- Bortnikov N.S., Genkin A.D., Kovalenker V.A. *Mineralogo-geokhimicheskie pokazateli usloviy gidrotermalnogo rudoobrazovaniya* [Mineralogical and geochemical indicators of hydrothermal ore formation conditions]. *Endogennye rudnye rayony i mestorozhdeniya* [Endogenous ore regions and deposits]. Moscow, Nauka Publ., 1987. pp. 40–59.
- Berger B.R., Henley R.W. Advances in understanding of epithermal gold-silver deposits with special reference to the Western United States. *Economic Geology*, 1989, vol. 84, pp. 405–423.
- Hedenquist J.W., Brown P.R., Allis R.G. Epithermal gold mineralization. *Applied Geology Association*. Wairakei, New Zealand, 1998. 162 p.
- Zhuravkova T.V., Palyanova G.A., Chudnenko K.V., Kravtsova R.G., Prokopyev I.R., Makshakov A.S., Borisenko A.S. Physicochemical models of formation of gold-silver ore mineralization at the

- Rogovik deposit (Northeastern Russia). *Ore Geology Reviews*, 2017, vol. 91, pp. 1–20.
35. Prokofyev V.Yu., Volkov A.V., Nikolayev Yu.N., Kalko I.A., Vlasov E.A., Sidorov A.A. Au-Ag epithermal mineralization formation conditions at Kaienmyvaamskoe ore field, Central Chukotka. *Rudy i metally*, 2019, no. 1, pp. 52–57. In Rus.
 36. Vikenteva O., Prokofiev V., Groznova E., Vikentyev I., Bortnikov N., Borovikov A., Kryazhev S., Pritchinn M. Contrasting fluids in the Svetlinsk gold-telluride hydrothermal system, South Urals. *Minerals*, 2020, vol. 1, pp. 1–27.
 37. Ratkin V.V., Simanenkov L.F., Pakhomova V.A., Eliseeva O.A. Taehznyi epithermal deposit of silver ore (Sikhote-Alin): regional position, formation conditions, geochemistry and mineral composition. *Russian Journal of Pacific Geology*, 2021, vol. 40, no. 2, pp. 21–38. In Rus.
 38. Soberano O.B., Gabo-Ratio J.A.S., Queaño K.L., Dimalanta C.B., Yumul Jr., G.P., Andal E.S., Yonezu K., Boyce A.J. Mineral chemistry, fluid inclusion and stable isotope studies of the Suyoc epithermal veins: insights to Au-Cu mineralization in southern Mankayan Mineral District, Philippines. *Ore Geology Reviews*, 2021, vol. 131, pp. 104035.
 39. Wang L., Qin K.-Z., Song G.-X., Li G.-M. A review of intermediate sulfidation epithermal deposits and subclassification. *Ore Geology Reviews*, 2019, vol. 107, pp. 434–456.
 40. Gusev A.I., Tabakaeva E.M. Magmatism and epithermal Ag-Au ore mineralization of Krasnoyarsk gold ore field of Gorny Altai. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 1, pp. 26–38. In Rus.
 41. Volkov A.V., Prokofiev V.Y., Sidorov A.A., Vinokurov S.F., Elmanov A.A., Murashov K.Yu., Sidorova N.V. The conditions of formation of Au–Ag epithermal mineralization of the Amguemo-Kanchalan volcanic field (Eastern Chukotka). *Journal of Volcanology and Seismology*, 2019, vol. 13, no. 5, pp. 335–347. In Rus.
 42. Volkov A.V., Prokofiev V.Y., Vinokurov S.F., Andreeva O.V., Kiseleva G.D., Galyamov A.L., Murashov K.Yu., Sidorova N.V. Valunistoe Epithermal Au–Ag Deposit (East Chukotka, Russia): geological structure, mineralogical–geochemical peculiarities and mineralization conditions. *Geology of Ore Deposits*, 2020, vol. 62, no. 2, pp. 97–121.

Received: 28 October 2021.

Information about the authors

Renat V. Kuzhuget, Cand. Sc., director, Tuvinian Institute for Exploration of Natural Resources SB RAS.

Natalia N. Ankusheva, Cand. Sc., scientist, Institute of Mineralogy SU FRC MG UB RAS.

Chayana O. Kadyr-ool, engineer, Tuvinian Institute for Exploration of Natural Resources SB RAS.

Anna A. Redina, junior researcher, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS.

Ilya R. Prokopyev, Cand. Sc., scientist, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS.

Anton V. Ponomarchuk, graduate student, junior researcher, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS.

УДК 541.183

МОДИФИЦИРУЮЩИЙ ЭФФЕКТ ПРОДУКТОВ ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ НЕФТЕХИМИИ В ПРОЦЕССАХ СМАЧИВАНИЯ И СТАБИЛИЗАЦИИ ТВЕРДОФАЗНЫХ ЧАСТИЦ

Дюрягина Антонина Николаевна¹,
adyuryagina@inbox.ru

Островной Кирилл Александрович¹,
kostrovnoy@mail.ru

Козик Дарья Юрьевна¹,
daria.kozik@mail.ru

¹ Некоммерческое акционерное общество Северо-Казахстанский университет им. М. Козыбаева,
Республика Казахстан, 150000, г. Петропавловск, ул. Пушкина, 86.

Актуальность. Как свидетельствует опыт мировой практики, для лакокрасочных материалов на основе традиционных пленкообразующих требуется введение модифицирующих добавок различного функционального назначения, чтобы обеспечить оптимальные декоративные и защитные свойства. Отсутствие собственных производителей широкого спектра модифицирующих добавок приводит к необходимости их импорта из стран дальнего зарубежья, что значительно повышает себестоимость лакокрасочных материалов. Наличие огромных отходов нефтехимии (в крупнотоннажных масштабах) дает возможность производить дешевые, эффективные и конкурентоспособные модифицирующие добавки. Интеграция научно-производственных предприятий позволит повысить рентабельность производства лакокрасочной продукции, а также решить ряд вопросов, связанных с приготовлением, хранением и улучшением эксплуатационных характеристик покрытий. Стабильными считаются лакокрасочные композиции, в которых осуществляется стабилизация пигментных дисперсий за счет формирования адсорбционно-сольватных слоев вокруг частиц пигмента из макромолекул пленкообразователя и добавляемых поверхностно-активных веществ. В связи с этим огромный практический интерес представляют дифильные соединения, играющие роль поверхностно-активного вещества стабилизирующего действия

Цель: исследование смачивающего и стабилизирующего эффекта низкомолекулярного аминопроизводного АС-1, синтезированного из отходов нефтехимии (КОН-92), в составе лакокрасочных материалов.

Объекты: алкидно-уретановый лак «Уралкид», растворитель – уайт-спирит, пигмент – диоксид титана рутильной формы марки Р-02; в качестве модифицирующих добавок – аминоксодержащие амфифильные вещества (АС, ПЭПА, ТЕЛАЗ).

Методы: пипеточный метод седиментационного анализа суспензий, метод адгезированного пузырька воздуха для измерения краевых углов смачивания.

Результаты. Установлен смачивающий и стабилизирующий эффект синтезированного из нефтехимических отходов аминопроизводного АС, что позволяет при дозированном его расходе получать седиментационно-устойчивые композиции без расслоения и выпадения осадка. Доказано влияние пленкообразующего и поверхностно-активного вещества на процессы стабилизации дисперсии диоксида титана в алкидно-уретановых композициях.

Ключевые слова:

Отходы нефтехимии, лакокрасочные материалы, скорость седиментации, краевой угол смачивания, диоксид титана, алкид-уретан, поверхностно-активное вещество.

Введение

В настоящее время защита объектов нефтегазовой отрасли, находящихся в эксплуатации, осуществляется в основном за счет применения лакокрасочных материалов (ЛКМ), отличающихся от других видов защиты доступностью, относительной дешевизной и простотой их использования. Как свидетельствует опыт мировой практики, качество ЛКМ обеспечивается максимальным диспергированием пигментов и стабилизацией мелких фракций в дисперсной системе путем подбора соответствующего пленкообразователя и добавки различных поверхностно-активных веществ (ПАВ) [1–3]. В отношении большого ряда пленкообразующих российских и казахстанские производители ЛКМ не уступают европейским, поскольку синтез пленкообразователей базировался на достижениях научной школы химии и технологии высокомолекулярных соединений, однако в применении модифицирующих добавок отставание экстремально. Наибольшее распространение получили поверхностно-активные модификаторы

«ТЕЛАЗ» ЗАО «Автотеконинвест», выпускаемые одним из немногих в России предприятий по производству модифицирующих добавок. Между тем [4], для красок на основе традиционных пленкообразующих требуется введение свыше 10 модифицирующих добавок различного функционального назначения, чтобы обеспечить оптимальные декоративные и защитные свойства. Как результат, при одном и том же пленкообразующем и пигменте качество ЛКМ уступает западным аналогам по реологическим свойствам, диспергированию и стабилизации дисперсной фазы, также по предотвращению расслоения краски. Причина такого явления заключается в том, что при отсутствии собственных производителей широкого спектра модифицирующих добавок в основном они закупаются из стран дальнего зарубежья, и это приводит к значительному повышению себестоимости ЛКМ. Между тем, при наличии огромных отходов нефтехимии (в крупнотоннажных масштабах) можно производить дешевые, эффективные и конкурентоспособные модифицирующие добав-

ки. Интеграция научно-производственных предприятий позволит повысить рентабельность производства лакокрасочной продукции, а также решить ряд вопросов, связанных с приготовлением, хранением и улучшением эксплуатационных характеристик покрытий ЛКМ [5, 6].

При разработке наполненных лакокрасочных материалов необходимо обеспечить агрегативную и седиментационную устойчивость, что предотвращает образование плотного пигментного осадка при хранении эмали или краски. Пигментированные лакокрасочные материалы представляют собой высококонцентрированные дисперсии пигментов [7–9]. Пигментные дисперсии, как всякие коллоидные системы, имеют склонность к разрушению, при этом пигмент выпадает в осадок. Высокодисперсные системы могут быть устойчивы при условии сильных межмолекулярных взаимодействий между поверхностью пигмента и дисперсионной фазой композиции, в результате которых происходит максимальное понижение краевого угла смачивания жидкостью поверхности твердого тела [10, 11]. Стабильными считаются лакокрасочные композиции, в которых осуществляется стабилизация пигментных дисперсий за счет формирования адсорбционно-сольватных слоев вокруг частиц пигмента из макромолекул пленкообразователя и добавляемых ПАВ [6–8]. В связи с этим огромный практический интерес представляют дифильные соединения, играющие роль ПАВ стабилизирующего действия [12, 13]. При этом эффективность свойств

ПАВ определяется структурой и длиной углеводородного радикала, а также природой и содержанием полярных групп [14].

Для расширения ассортимента эффективных модифицирующих добавок представлялось целесообразным исследовать стабилизирующий эффект низкомолекулярного аминопроизводного АС, синтезированного из отходов нефтехимии (КОН-92), в сравнении с высокомолекулярными аминопроизводными ТЕЛАЗ и ПЭПА, которые изготавливаются промышленно. Это потребовало:

- изучения закономерностей развития процессов смачивания и седиментации дисперсий пигментированного диоксида титана в бинарных «растворитель–ПАВ» и тройных «растворитель–пленкообразующее–ПАВ» системах;
- оценки влияния концентрационных параметров и составов композиций на динамику осаждения частиц пигмента.

Методы и материалы

При проведении исследований использовали пленкообразующее – алкидно-уретановый лак «Уралкид» (ТУ 2311-023-45822449-2002), растворитель – уайт-спирит (ТУ 2388-004-23172471-98) и пигмент – диоксид титана рутильной формы марки Р-02 (ГОСТ 9804-84). В качестве модифицирующих добавок использовали амносодержащие амфифильные вещества (табл. 1) [15–18].

Таблица 1. Характеристики исходных материалов

Table 1. Characteristics of raw materials

Название Name	Мг, а.е.м Mg, a.m.u.	Аминное число (мг HCl/г) Amine number (mg HCl/g)	Технические условия Technical specifications	Краткое описание технического продукта Brief description of the technical product
АС/AS	283	30	655-ПК 056006434-002-2000	смесь первичных и вторичных аминов mixture of primary and secondary amines
ПЭПА PEPA	4950	31	2413-357-40203447-99	смесь высокомолекулярных аминов mixture of high molecular weight amines
ТЕЛАЗ TELAZ	2121	32	2461-060-27991970-02	продукт конденсации растительных масел с диаминами condensation product of vegetable oils with diamines

Методика проведения эксперимента

Скорость седиментации и краевые углы смачивания измеряли в изотермических условиях ($T=293$ К). В опытах варьировали массовое содержание алкидно-уретанового лака ($C_{ур}$) от 0 до 50 % за счет разбавления уайт-спиритом уралкида, расходы ПАВ ($C_{ПАВ}$, % 0–4 на массу пигмента), время отбора суспензии ($\tau=10$ –28800 с). Для более полного смачивания порошка диоксида титана и стабилизации всех равновесных характеристик суспензию перемешивали 30 мин.

Методика приготовления растворов с различным содержанием пленкообразующего заключалась в предварительном разведении уайт-спиритом алкидно-уретанового лака в следующих массовых соотношениях: 1:9 ($C_{ур}=10$ %), 3:7 ($C_{ур}=30$ %), 1:1 ($C_{ур}=50$ %). Полученные растворы (в дальнейшем А) направляли

на приготовление суспензий, которое осуществляли при температуре 293 К в герметичном реакторе (объемом 0,2 дм³, коэффициент заполнения – 0,60), снабженном перемешивающим устройством (импеллерная мешалка, частота – 300 мин⁻¹). Количественное содержание пигмента диоксида титана в растворе А задавали постоянным 3,86 г. Методика приготовления суспензий ЛКМ с различным содержанием аминопроизводных ($C_{ПАВ}$, %, 0–4 на массу пигмента) заключалась в добавлении определенной массы аминопроизводного в суспензию.

Влияние содержания пленкообразующего и расходов ПАВ на седиментационную устойчивость суспензий диоксида титана определяли пипеточным методом, сущность которого заключалась в отборе строго определенного объема оседающей суспензии через различные промежутки времени на высоте h и нахождении массы твердофазных частиц в отобранной пробе.

Пробирку с суспензией закрепляли в неподвижный штатив, и через установленные промежутки времени отбирали 1,5 мл суспензии, опуская пипетку на глубину 2/3 пробирки. Пробу помещали в фарфоровую чашку, доведенную до постоянной массы и выпаривали до полного испарения легколетучего растворителя. Остатки нелетучей органической части суспензии сжигали в муфельной печи при 600 °С. Далее находили массу пигмента с точностью до 0,001 г.

На основании полученных данных были построены типичные кинетические зависимости седиментации (рис. 1). На зависимости седиментационного осаждения частиц пигмента изучаемых систем можно выделить два участка: первый участок – последовательное осаждение частиц пигмента TiO₂; второй – выход кривых на насыщение к моменту завершения процесса осаждения.

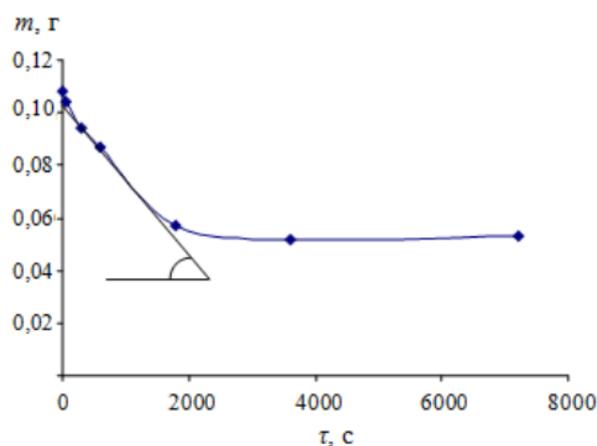


Рис. 1. Типичная зависимость массы пигмента от времени его осаждения: концентрация пленкообразующего 10 %

Fig. 1. Typical dependence of the pigment mass on the time of its deposition: concentration of the film-forming agent 10 %

Динамика осаждения частиц пигмента характеризуется скоростью седиментации, которую находили графически. Для этого к первому прямолинейному участку проводили касательную и рассчитывали тангенс угла наклона. Скорость (г/с) определяли по уравнению $V = \tan \alpha$.

Измерение краевых углов смачивания (θ) модифицированными суспензиями поверхности диоксида титана осуществляли изотермически ($T=293$ К) по методу адгезированного пузырька воздуха. Качество поверхности диоксида титана оценивали по параметру шероховатости (R_z) с применением компьютерно-микрооптического метода (на базе микроскопа МИС-11) [19]. Образцы диоксида титана с параметром шероховатости (R_z) свыше 0,8–1,0 мкм отбраковывали. Методика эксперимента [20] была разработана так, чтобы получить изображение пузырька воздуха, подведенного под нижнюю поверхность диоксида титана, погруженного (на незначительную глубину) в исследуемую суспензию. По контуру зафиксированного его изображения (в области контакта с поверхностью TiO₂) определяли высоту h и диаметр пузырька d .

Краевой угол смачивания между твердой поверхностью и касательной к точке соприкосновения трех фаз рассчитывали, усредняя результаты трех параллельных измерений, по формуле (1):

$$\theta = 180^\circ - \theta', \quad (1)$$

θ' рассчитывали через $\cos \theta'$:

$$\cos \theta' = \frac{(d/2)^2 - h^2}{(d/2)^2 + h^2}. \quad (2)$$

Результаты и их обсуждение

На первом этапе были проведены исследования влияния ПАВ на скорость осаждения частиц TiO₂ в растворителе, что исключает возможное влияние пленкообразующего на седиментационные процессы. Эффект трех разновидностей аминопроизводных в уайт-спирите на скорость седиментации характеризуют зависимости, представленные на рис. 2, кривые 1–3.

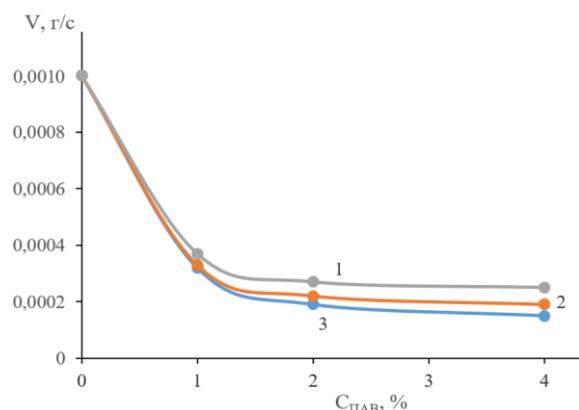


Рис. 2. Зависимость скорости седиментации от концентрации ПАВ: 1 – АС, 2 – ПЭПА, 3 – ТЕЛАЗ

Fig. 2. Sedimentation rate dependence on the surfactant concentration: 1 – AS, 2 – PEPA, 3 – TELAZ

Введение ПАВ сопровождается существенными изменениями в кинетике осаждения частиц пигмента. По мере увеличения концентрации ПАВ ($C_{\text{ПАВ}} \leq 1\%$) в суспензиях, не содержащих пленкообразующее, скорость седиментации замедляется в 3,1–3,7 раза (в сравнении с базовым вариантом – без ПАВ). За пределами этого концентрационного участка ($C_{\text{ПАВ}} > 1\%$) процессы стабилизации суспензий получают дальнейшее развитие, но с различной интенсивностью. Наблюдаемые различия в развитии процессов седиментации определяются молекулярно-массовым составом и одновременно структурой трех разновидностей аминопроизводных, которые отвечают за создание защитного адсорбционно-сольватного слоя на поверхности частиц пигмента. В изоконцентрационных по содержанию ПАВ суспензиях наибольшим эффектом обладают более высокомолекулярные разновидности ПЭПА, ТЕЛАЗ (рис. 2, кривые 2, 3) в сравнении с низкомолекулярным аминопроизводным АС (рис. 2, кривая 1). Так, в суспензиях низкомолеку-

лярного АС по мере повышения его содержания до 4 % скорость осаждения частиц пигмента стабилизировалась на минимальном уровне – $0,31 \cdot 10^{-3}$ г/с, что в 3,8 раза меньше, чем в суспензии без ПАВ. В присутствии же высокомолекулярных аминопроизводных суспензии становились напротив все более седиментационно устойчивыми; скорость седиментации TiO_2 снизилась вплоть до значений $0,15 \cdot 10^{-3}$ и $0,10 \cdot 10^{-3}$ г/с в суспензиях с ПЭПА и ТЕЛАЗ, то есть в 6,6 и 9,8 раза соответственно.

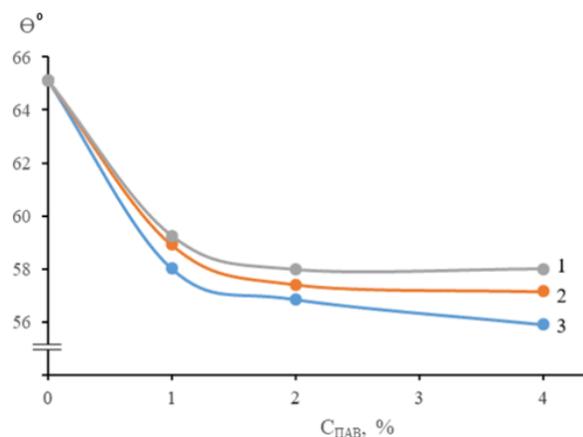


Рис. 3. Изотермы ($T=293$ К) краевых углов смачивания диоксида титана: 1 – АС, 2 – ПЭПА, 3 – ТЕЛАЗ

Fig. 3. Isotherms ($T=293$ K) of the edge angles of wetting of titanium dioxide: 1 – AS, 2 – PEPA, 3 – TELAZ

Улучшение седиментационной устойчивости объясняется глубокой лиофилизацией поверхности диоксида титана, которую наглядно демонстрирует уменьшение краевых углов смачивания θ в растворах ПАВ (рис. 3, кривые 1–3). При этом прослеживается тесная корреляция между этими двумя зависимостями (рис. 2, 3).

Равностепенный смачивающий эффект всех аминоксодержащих растворов в той же области малых концентраций ($c \leq 1$ %); угол θ уменьшается на $6-7^\circ$ в сравнении с уайт-спиритом ($\theta=65^\circ$). За пределами этого концентрационного участка ($c > 1$ %) аминоксодержащие в порядке увеличения смачивающей активности в отношении диоксида титана образуют ряд: ТЕЛАЗ > ПЭПА > АС.

Таким образом, по результатам проведенных исследований можно заключить, что все разновидности аминоксодержащих обладают смачивающим и стабилизирующим действиями. Максимальный эффект ($\min V$ и $\min \theta$) достигается в случае использования ТЕЛАЗ при его содержании в суспензии 4 % (рис. 2, кривая 3 и рис. 3, кривая 3).

На втором этапе были проведены исследования влияния ПАВ на скорость осаждения частиц TiO_2 в суспензиях с различным содержанием пленкообразующего в растворителе. Влияние природы и количественных содержаний аддитивов на седиментационную устойчивость дисперсий диоксида титана в алкидно-уретановых суспензиях ($C_{yp}=10-50$ %) отражают зависимости на рис. 4.

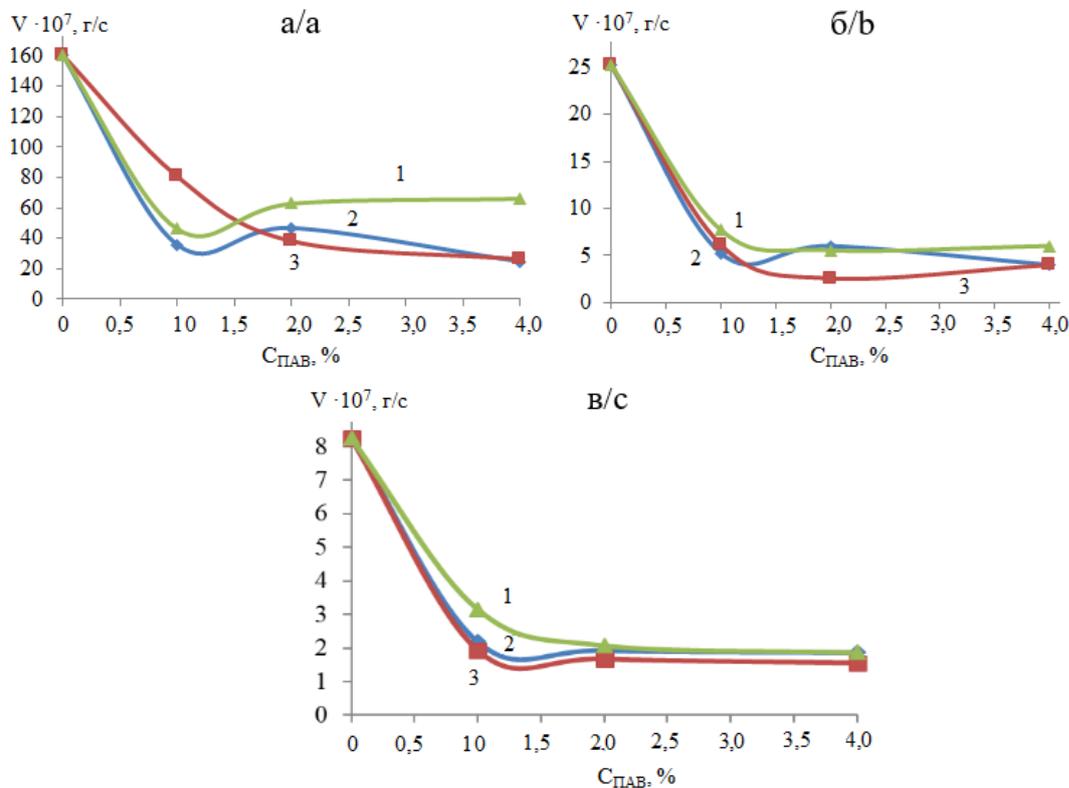


Рис. 4. Влияние содержания пленкообразующего и концентрации ПАВ на скорость седиментации: концентрация пленкообразующего: а) 10 %; б) 30 %; в) 50 %. 1 – АС, 2 – ПЭПА, 3 – ТЕЛАЗ

Fig. 4. Effect of the film-forming agent content and the concentration of surfactants on the sedimentation rate: concentration of the film-forming agent: а) 10 %; б) 30 %; в) 50 %. 1 – AS, 2 – PEPA, 3 – TELAZ

Анализ полученных результатов показывает, что при отсутствии ПАВ ($C_{ПАВ}=0\%$) скорость седиментации суспензий диоксида титана зависит от содержания в них пленкообразующего. В сравнении с показателем седиментации TiO_2 в уайт-спирите ($C_{пл}=0\%$) скорость осаждения твердофазных частиц уменьшается в суспензии ($C_{пл}=10\%$) в 60 раз и составляет $160,42 \cdot 10^{-7}$ г/с.

Судя по резкому снижению скорости седиментации при введении 10 % уралкида в растворитель (рис. 4, а) произошло блокирование части поверхности диоксида титана макромолекулами пленкообразующего. Об этом свидетельствует уменьшение значения θ не менее чем на 12° ($\theta=52,70^\circ$) при увеличении концентрации пленкообразующего от 0 до 10 % (табл. 2).

Таблица 2. Экспериментальные значения краевых углов смачивания

Table 2. Experimental values of the wetting edge angles

Концентрация ПАВ, % Surfactant concentration, %	Концентрация пленкообразующего/Film-forming agent concentration					
	0 %			10 %		
	ТЕЛАЗ/TELAZ	ПЭПА/PEPA	АС/AS	ТЕЛАЗ/TELAZ	ПЭПА/PEPA	АС/AS
0	65,13	65,13	65,13	52,70	52,70	52,70
1	58,02	58,92	59,26	48,28	49,28	49,62
2	57,79	57,88	57,88	47,37	48,59	48,13
3	56,85	58,15	57,05	46,46	47,72	47,56
4	55,35	57,14	57,26	45,17	46,60	44,14
	Концентрация пленкообразующего/Film-forming agent concentration					
	30 %			50 %		
	ТЕЛАЗ/TELAZ	ПЭПА/PEPA	АС/AS	ТЕЛАЗ/TELAZ	ПЭПА/PEPA	АС/AS
0	46,46	46,46	46,46	44,73	44,73	44,73
1	44,42	45,72	44,71	42,97	43,30	43,81
2	45,31	44,84	44,16	40,90	41,31	41,24
3	43,49	44,59	41,46	38,80	39,00	38,46
4	42,29	43,21	38,15	36,32	36,88	36,75

Однако при дальнейшем повышении содержания уралкида наблюдается тенденция к снижению темпов стабилизации. Увеличение концентрации пленкообразующего на 20 % (от 10 до 30 %) уменьшает скорость седиментации только в 6,4 раза ($V=25,21 \cdot 10^{-7}$ г/с), что в 10 раз меньше эффекта, наблюдаемого при введении 10 % уралкида (рис. 4, б). В сравнении с суспензией ($C_{пл}=10\%$) краевой угол смачивания снижается на $7,97^\circ$ и составляет $46,46^\circ$ (табл. 2). При последующем увеличении содержания пленкообразующего на 20 % (от 30 до 50 %) фиксировали (рис. 4, в) еще меньшее снижение (в 3 раза) скорости осаждения твердофазных частиц ($V_{сед}=8,25 \cdot 10^{-7}$ г/с). Очевидно, что эффект олеофилизации и, как следствие, стабилизации твердофазных дисперсий пигмента в немодифицированных суспензиях ограничивает процесс ассоциации макромолекул, который усиливается по мере увеличения концентрации пленкообразующего. Это указывает на ограниченное число сегментов ассоциатов, закрепленных на твердой поверхности TiO_2 . В результате этого интенсивность процессов олеофилизации постепенно ослабевает, и при переходе концентрации пленкообразующего от 30 к 50 % значение краевого угла смачивания θ (табл. 2) меняются незначительно ($\Delta\theta=1,75^\circ$).

Введение аминоксодержащих ПАВ в алкидно-уретановые суспензии открывает дополнительные возможности к снижению скорости седиментации (рис. 4).

Как свидетельствуют экспериментальные данные, максимум стабилизирующей активности ПАВ в алкидно-уретановых суспензиях находится в той же области концентраций аддитивов ($C_{ПАВ}=4\%$), что и в суспензиях TiO_2 в уайт-спирите. Наибольший стабилизирующий эффект в суспензиях с 10 и 30 % алкид-уретана был достигнут при введении ПЭПА и ТЕЛАЗ. При дозировании 4 % высокомолекулярных ПЭПА и ТЕЛАЗ в такие суспензии фиксировали равностепенные (по скорости

седиментации) характеристики стабилизации, которые составили $(24,56...26,66) \cdot 10^{-7}$ г/с при $C_{пл}=10\%$ и $(3,98...4,03) \cdot 10^{-7}$ г/с при $C_{пл}=30\%$. В суспензиях ($C_{пл}=10-30\%$) с низкомолекулярным АС эффект стабилизации при той же концентрации ($C_{ПАВ}=4\%$) был ниже: значения скорости седиментации уменьшились до $66,13 \cdot 10^{-7}$ г/с при $C_{пл}=10\%$ и до $5,99 \cdot 10^{-7}$ г/с при $C_{пл}=30\%$.

Таким образом, по усилению стабилизирующего эффекта в отношении дисперсий диоксида титана в изоконцентрационных по содержанию ПАВ ($C_{ПАВ}=4\%$) алкид-уретановых суспензиях ($C_{пл}=10-30\%$) модификаторы образуют ряд: ПЭПА=ТЕЛАЗ>АС.

Однако при дальнейшем повышении концентрации пленкообразующего в суспензии ($C_{пл}=50\%$) данная последовательность нарушается и имеет вид: ПЭПА=АС≈ТЕЛАЗ. Значения скорости седиментации твердофазных частиц в изоконцентрационных по содержанию ПАВ суспензиях уменьшились до близких значений и составили $1,87 \cdot 10^{-7}$ г/с (ПЭПА, АС) и $1,75 \cdot 10^{-7}$ г/с (ТЕЛАЗ).

Причину изменений влияния ПАВ на устойчивость суспензий по мере увеличения концентрации пленкообразующего позволяет понять сопоставительный анализ относительных изменений скорости седиментации. Относительные изменения скорости седиментации ($V_{отн}$) рассчитывали по формуле (3):

$$V_{отн} = \frac{V_{f=0}}{V_f}, \quad (3)$$

где $V_{f=0}$ – скорость на нулевом уровне варьируемых факторов; V_f – скорости седиментации при вариациях концентрации ПАВ и пленкообразующего.

Рассчитанные значения относительного изменения скорости седиментации в зависимости от содержания пленкообразующего и концентрации ПАВ представлены в табл. 3.

Таблица 3. Относительные изменения скорости осаждения диоксида титана в суспензиях

Table 3. Relative changes in the deposition rate of titanium dioxide in suspensions

Концентрация ПАВ Surfactant concentration, %	ПЭПА/PEPA				ТЕЛАЗ/TELAZ				АС/AS			
	Концентрация пленкообразующего/Film-forming agent concentration, %											
	0	10	30	50	0	10	30	50	0	10	30	50
1	3,7	4,5	4,8	3,8	3,5	2,0	4,1	4,3	3,1	3,5	3,3	2,6
2	5,0	3,4	4,2	4,3	6,7	4,2	9,9	4,9	3,6	2,6	4,6	4,0
4	6,6	6,5	6,3	4,4	9,8	6,0	6,3	4,7	3,8	4,1	4,2	4,4

Сопоставительный анализ показал, что введение пленкообразующего практически не повлияло на вклад АС в изменение седиментационной устойчивости суспензий. В алкид-уретановых суспензиях TiO_2 при любом содержании пленкообразующего в айт-спирите АС ($C_{ПАВ}=4\%$) уменьшает скорость седиментации в 4,1...4,4 раза, то есть на том же уровне, что и в суспензиях растворителя. Это указывает на отсутствие конкурентной адсорбции между полимером и вводимым ПАВ, то есть АС сорбируется на активных участках поверхности пигмента, свободных от макромолекул пленкообразующего. Учитывая возможные кислотно-основные взаимодействия, концентрирование органического аминопроизводного АС происходит на кислотных центрах.

Однако для ПЭПА глубина изменения седиментационной устойчивости (в 6,3...6,6 раза) суспензий под его влиянием ($C_{ПАВ}=4\%$) остается неизменной только при увеличении содержания пленкообразующего от 0 до 30 % в суспензиях диоксида титана. Дальнейшее концентрирование алкид-уретана ($C_{пл}=50\%$) сопровождалось снижением относительного изменения скорости седиментации от 6,3 до 4,4, то есть до значения равнозначного с АС (табл. 3).

Другая разновидность высокомолекулярного органического аминопроизводного ТЕЛАЗ, в отличие от ПЭПА, снижает свой стабилизирующий эффект в 1,6 раза (от 9,8 до 6,0...6,3) уже при $C_{пл}=10-30\%$. Снижение его глубины (от 6,3 до 4,7) получает дальнейшее развитие при $C_{пл}=50\%$, и в результате стабилизирующий эффект ТЕЛАЗ становится близким к эффекту АС.

Таким образом, экспериментально установленные закономерности устойчивости тройных систем «пигмент–пленкообразующее–ПАВ» наглядно демонстрируют влияние длины и структуры углеводородного радикала ПАВ на процессы смачивания и стабилизации. В концентрированных по содержанию пленкообразующего суспензиях образование плотного адсорбционно-сольватного слоя на поверхности диоксида титана ограничивает движение молекул ПАВ с длинными углеводородными радикалами (ТЕЛАЗ и ПЭПА) и препятствует их адсорбции на свободных кислотных центрах TiO_2 . Как следствие, смачивающий эффект ПЭПА и ТЕЛАЗ в таких суспензиях ($C_{пл}=50\%$) на 20 % ниже, чем в суспензиях TiO_2 в растворителе. Краевые углы смачивания в присутствии ($C_{ПАВ}=4\%$) ПЭПА и ТЕЛАЗ уменьшились на

7–8° по сравнению с немодифицированной суспензией ($C_{пл}=50\%$) и составили 36–37° (табл. 2).

При этих же условиях АС с коротким углеводородным радикалом легко проникает сквозь полости ассоциатов макромолекул пленкообразующего и адсорбируется на кислотных центрах TiO_2 . Как результат, смачивающий эффект АС остается на том же уровне (табл. 2), что и в суспензиях TiO_2 без пленкообразующего ($\Delta\theta=7,98^\circ$).

Выравнивание смачивающего эффекта всех трех ПАВ, обусловленного стерическими препятствиями для длинных углеводородных радикалов высокомолекулярных аминопроизводных, по мере заполнения пигмента пленкообразующим приводит, в конечном счете, к равному снижению скорости седиментации модифицированных суспензий. Надежная стабилизация модифицированных суспензий достигается за счет формирования межфазного адсорбционно-сольватного барьера, толщина которого превышает зону притяжения частиц.

Выводы

1. Эффект стабилизации дисперсии диоксида титана в алкидно-уретановых композициях является аддитивной величиной, определяемой вкладом пленкообразующего и поверхностно-активного вещества.
2. Процессы седиментации лимитируются процессом смачивания, который, в свою очередь, изменяется в зависимости от концентрации и особенностей состава аминопроизводных (длины и структуры углеводородного радикала).
3. АС является эффективным смачивающим и стабилизирующим поверхностно-активным веществом, что позволяет при дозированном его расходе получать седиментационно-устойчивые композиции без расслоения и выпадения осадка.
4. В рабочих рецептурах лакокрасочных материалов на основе алкид-уретанового пленкообразующего ($C_{пл}=50\%$) рекомендуется введение 4 % АС, которое обеспечивает снижение скорости седиментации в 4,4 раза ($V_{сед}=1,87 \cdot 10^{-7}$ г/с). При введении такого же количества ПЭПА и ТЕЛАЗ достигается равный эффект.

Работа выполнена при финансовой поддержке МОН РК (грант № AP08856284).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кирбятъева Т.В. Атмосферостойкие лакокрасочные покрытия для защиты от коррозии технологического оборудования и металлоконструкций // Лакокрасочные материалы и их применение. – 2001. – № 1. – С. 30–35.
2. Transferral of HMs pollution from road-deposited sediments to stormwater runoff during transport processes / Q. Wang, Q. Zhang, M. Dzakpasu, N. Chang, X. Wang // Frontiers of Environmental Science and Engineering. – 2019. – V. 13. – P. 193–198.

3. Хохлачева Н.М. Коррозия металлов и средства защиты от коррозии. – М.: Изд-во ИНФРА-М, 2016. – 118 с.
4. Толстая С.Н. Физико-химические основы адсорбционной активации минеральных наполнителей и пигментов в полимерных системах: автореф. дис. ... д-ра хим. наук. – М., 1970. – 34 с.
5. Snow-dirt sludge as an indicator of environmental and sedimentation processes in the urban environment / A. Seleznev, I. Yarmoshenko, G. Malinovsky, E. Pgasheva, E. Baglaeva, A. Ryanskaaya, D. Kiseleva, T. Gulyaeva // Scientific Reports. – 2019. – V. 9. – P. 1–12.
6. Опанасенко О.Н., Яковец Н.В., Крутько Н.П. Флокуляция и седиментация нефтяных дисперсных систем в присутствии добавок, содержащих amino- и фосфатные группы // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия химических наук. – 2017. – № 1. – С. 99–108.
7. Нефедов Н.И., Семенова Л.В., Кузнецова В.А., Веренинова Н.П. Лакокрасочные покрытия для защиты металлических и полимерных композиционных материалов от старения, коррозии и биоповреждения // Авиационные материалы и технологии. – 2019. – № 5. – С. 393–404.
8. Iron nanoparticles-based magnetorheological fluids: a balance between MR effect and sedimentation stability / W. Zhu, X. Dong, H. Huang, M. Qi // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2019. – V. 491. – P. 165556.
9. Сумм Б.Д., Горюнов Ю.В. Физико-химические основы смачивания и растекания. – М.: Химия, 1976. – 232 с.
10. Толстая С.Н., Шабанова С.А. Применение поверхностно-активных веществ в лакокрасочной промышленности. – М.: Химия, 1979. – 176 с.
11. Davis R.H., Birdsel J. Hindered settling of semidilute monodisperse and polydisperse suspensions // The AIChE Journal. – 1988. – V. 34. – № 1. – P. 123–129.
12. Procalcitonin, C-reactive protein, and erythrocyte sedimentation rate for the diagnosis of acute pyelonephritis in children / K.J. Shaikh, V.A. Osio, M.M. Leeflang, N. Shaikh // Cochrane Database of Systematic Reviews. – 2015. – V. 1. – P. CD009185.
13. Patwardhan V.S., Chi Tien Sedimentation and liquid fluidization of solid particles of different sizes and densities // Chemical Engineering Science. – 1985 – V. 40. – P. 1051–1060.
14. Sedimentation of nanoplastics from water with Ca/Al dual flocculants: characterization, interface reaction, effects of pH and ion ratios / Z. Chen, J. Liu, C. Chen, Z. Huang // Chemosphere. – 2020. – V. 252. – P. 126450.
15. Способ получения ингибитора кислотной коррозии металлов. пат. РК №22296, заявл. 11.07.2008; опубл. 15.02.2010. Бюл № 2. – 5 с.
16. Barfod N. Concentration dependence of sedimentation rate of particles in dilute suspensions // Powder Technology Journal. – 1972. – № 6 – P. 39–43.
17. Passowa U., Stout S.A. Character and sedimentation of «lingering» Macondo oil to the deep-sea after the Deepwater Horizon oil spill // Marine Chemistry. – 2020. – V. 218. – P. 10373310.
18. Dyuryagina A.N. Modification of composites by surfactants. – Petropavlovsk: NKZU, 2020. – 183 p.
19. Компьютерно-микрооптический комплекс для качественно-количественной оценки качества поверхности изделий. Свидетельство № 0806РК0079, заявл. 06.07.2006. – 41 с.
20. Особенности влияния синтезированного модификатора АС на регулирование межфазных процессов в системе «пигмент-растворитель» / А.Н. Дюрягина, Ю.С. Бызова, К.А. Островной, А.А. Кондратов, А.М. Лукманова // Актуальные проблемы науки и образования в области естественных и сельскохозяйственных наук: Материалы II Международной научно-практической конференции. – Петропавловск: Северо-Казахстанский государственный университет, 2014. – С. 142–147.

Поступила 01.12.2021 г.

Информация об авторах

Дюрягина А.Н., профессор кафедры химии и химических технологий, Некоммерческое акционерное общество Северо-Казахстанский университет им. М. Козыбаева.

Островной К.А., старший преподаватель кафедры химии и химических технологий, Некоммерческое акционерное общество Северо-Казахстанский университет им. М. Козыбаева.

Козик Д.Ю., студент кафедры химии и химических технологий, Некоммерческое акционерное общество Северо-Казахстанский университет им. М. Козыбаева.

UDC 541.183

MODIFYING EFFECT OF PETROCHEMICAL WASTE PROCESSING PRODUCTS ON WETTING AND STABILIZATION OF SOLID-PHASE PARTICLES

Antonina N. Dyuryagina¹,
adyuryagina@inbox.ru

Kirill A. Ostrovnoy¹,
kostrovnoy@mail.ru

Daria Yu. Kozik¹,
daria.kozik@mail.ru

¹ NC JSC North Kazakhstan University named after M. Kozybayev,
86, Pushkin street, Petropavlovsk, 150000, Kazakhstan.

Relevance. As evidenced by the experience of the world practice, for paint and varnish materials based on traditional film-forming materials, the introduction of modifying additives of various functional purposes is required to ensure optimal decorative and protective properties. The lack of own manufacturers of a wide range of modifying additives leads to the need to import them from foreign countries, which significantly increases the cost of paint and varnish products. The presence of huge petrochemical waste (on a large scale) makes it possible to produce cheap, effective and competitive modifying additives. The integration of research and production enterprises will increase the profitability of the production of paint and varnish products, as well as solve a number of issues related to the preparation, storage and improvement of the performance characteristics of paint and varnish coatings. Paint and varnish compositions are considered stable, the stabilization of pigment dispersions is carried out due to the formation of adsorption-solvate layers around the pigment particles from the film-forming macromolecules and the added surfactants. In this regard, diphilic compounds that play the role of surfactants with a stabilizing effect are of great practical interest

The main aim of the research is to study the wetting and stabilizing effect of the low-molecular-weight amino derivative AC-1, synthesized from petrochemical waste (CRP-92), in the composition of paint coatings

Methods: pipette method of sedimentation analysis of suspensions, the method of the adhered air bubble for measuring the edge angles of wetting.

Result. The wetting and stabilizing effect of the amine-derived AC synthesized from petrochemical waste has been established, which makes it possible to obtain sedimentation-resistant compositions without stratification and precipitation at its dosed consumption. The effect of the film-forming agent and surfactant on stabilization of the titanium dioxide dispersion in alkyd-urethane compositions was proved.

Key words:

Petrochemical waste, paint and varnish materials, sedimentation rate, wetting edge angle, titanium dioxide, urethane alkyd, surfactant.

The research was financially supported by the MES RK (grant no. AP08856284).

REFERENCES

- Kirbyateva T.V. Atmosferostoykie lakokrasochnye pokrytiya dlya zashchity ot korrozii tekhnologicheskogo oborudovaniya i metallokonstruktsy [Weather-resistant paint and varnish coatings for corrosion protection of technological equipment and metal structures]. *Lakokrasochnye materialy i ikh primeneniye*, 2001, no. 1, pp. 30–35.
- Wang Q., Zhang Q., Dzakpasu M., Chang N., Wang X. Transferral of HMs pollution from road-deposited sediments to stormwater runoff during transport processes. *Frontiers of Environmental Science and Engineering*, 2019, vol. 13, pp. 193–198.
- Khokhlacheva N.M. *Korrosia metallov i sredstva zashchity ot korrozii* [Corrosion of metals and means of corrosion protection]. Moscow, INFRA-M Publ., 2016. 118 p.
- Tolstaya S.N. *Fiziko-khimicheskie osnovy adsorbtsionnoy aktivatsii mineralnykh napolniteley i pigmentov v polimernykh sistemakh*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Physico-chemical bases of adsorption activation of mineral fillers and pigments in polymer systems. Cand. Diss. Abstract]. Moscow, 1970. 34 p.
- Seleznev A., Yarmoshenko I., Malinovsky G., Ilgasheva E., Baglaeva E., Ryanskaya A., Kiseleva D., Gulyaeva T. Snow-dirt sludge as an indicator of environmental and sedimentation processes in the urban environment. *Scientific Reports*, 2019, vol. 9, pp. 17241.
- Opanasenko O.N., Yakovets N.V., Krutko N.P. Flocculation and sedimentation of petroleum dispersed systems in the presence of additives containing amino and phosphate groups. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2017, vol. 1, pp. 99–108. In Rus.
- Nefedov N.I., Semenova L.V., Kuznetsova V.A., Vereninova N.P. Paint and varnish coatings for the protection of metal and polymer composite materials from aging, corrosion and bio-damage. *Aviation materials and technologies*, 2019, vol. 5, pp. 62–67. In Rus.
- Zhu W., Dong X., Huang H., Qi M. Iron nanoparticles-based magnetorheological fluids: a balance between MR effect and sedimentation stability. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2019, vol. 491, pp. 165556.
- Summ B.D., Goryunov Yu.V. *Fiziko-khimicheskie osnovy smachivaniya i rastekaniya* [Physico-chemical bases of wetting and spreading]. Moscow, Khimiya Publ., 1976. 232 p.
- Tolstaya S.N., Shabanova S.A. *Primeneniye poverkhnostno-aktivnykh veshchestv v lakokrasochnoy promyshlennosti* [Application of surface-active substances in the paint and varnish industry]. Moscow, Khimiya Publ., 1979. 176 p.
- Davis R.H., Birdsel JKH. Hindered settling of semidilute monodisperse and polydisperse suspensions. *AIChE Journal*, 1988, vol. 34, pp. 123–129.
- Shaikh K.J., Osio V.A., Leeftang M.M., Shaikh N. Procalcitonin, C-reactive protein, and erythrocyte sedimentation rate for the diagnosis of acute pyelonephritis in children. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, 2020, vol. 1, pp. CD009185.
- Patwardhan V.S., Chi Tien. Sedimentation and liquid fluidization of solid particles of different sizes and densities. *Chemical Engineering Science*, 1985, vol. 40, pp. 1051–1060.

14. Chen Z., Liu J., Chen C., Huang Z. Sedimentation of nanoplastics from water with Ca/Al dual flocculants: Characterization, interface reaction, effects of pH and ion ratios. *Chemosphere*, 2020, vol. 252, pp. 126450.
15. Bolatbaev K.N., Dyuryagina A.N., Ostrovnoy K.A. *Sposob polucheniya inhibitora kislotnoy korrozii metallov* [Method for producing an inhibitor of acid corrosion of metals]. Patent RK, no. 22296, 2010.
16. Barfod N. Concentration dependence of sedimentation rate of particles in dilute suspensions. *Z Powder Technology*, 1972, no. 6, pp. 39–43.
17. Passowa U., Stout S.A. Character and sedimentation of «lingering» Macondo oil to the deep-sea after the Deepwater Horizon oil spill. *Marine Chemistry*, 2020, vol. 6, pp. 39–43.
18. Dyuryagina A.N. *Modification of composites by surfactants*. Petropavlovsk, NKZU, 2020. 183 p.
19. Dyuryagina A.N., Tukachev A.A., Bolatbaev K.N., Lugovitskaya T.N. *Kompyuterno-mikroopticheskiy kompleks dlya kachestvenno-kolichestvennoy otsenki kachestva poverkhnosti izdeliy* [Computer-micro-optical complex for qualitative and quantitative assessment of the surface quality of products]. Certificate RK, no. 0806PK0079, 2006.
20. Dyuryagina A.N., Byzova Yu.S., Ostrovnoy K.A., Kondratov A.A., Lukmanova A.M. Osobennosti vliyaniya sintezirovannogo modifikatora AS na regulirovanie mezhfaznykh protsessov v sisteme «pigment–rastvoritel» [Features of the influence of the synthesized AC modifier on the regulation of interphase processes in the «pigment–solvent» system]. *Materialy II mezhdunarodnoy prakticheskoy konferentsii. Aktualniye problemi nauki i obrazovaniya v oblasti estestvennykh i selskokhozyaystvennykh nauk* [Materials of the II International scientific and Practical Conference. Actual problems of science and education in the field of natural and agricultural sciences]. Petropavlovsk, North Kazakhstan State University Publ., 2014. pp. 142–147.

Received: 1 December 2021.

Information about the authors

Antonina N. Dyuryagina, Cand. Sc., associate professor, head of the Chemistry and chemical technologies Department, NC JSC North Kazakhstan University named after M. Kozybayev.

Kirill A. Ostrovnoy, senior lecturer, NC JSC North Kazakhstan University named after M. Kozybayev.

Daria Yu. Kozik, student, NC JSC North Kazakhstan University named after M. Kozybayev.

УДК 620.952

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПО УТИЛИЗАЦИИ ЖИДКИХ ПРОДУКТОВ МЕДЛЕННОГО ПИРОЛИЗА ДРЕВЕСНОЙ БИОМАССЫ

Слюсарский Константин Витальевич¹,
slyuskonst@gmail.com

Ларионов Кирилл Борисович²,
laryk070@gmail.com

Ивашкина Елена Николаевна¹,
ivashkinaen@tpu.ru

Заворин Александр Сергеевич¹,
zavorin@tpu.ru

Губин Владимир Евгеньевич¹,
gubin@tpu.ru

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

² Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева,
Россия, 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28.

Актуальность работы обусловлена возрастающим интересом к технологиям пиролиза биомассы для снижения углеродного следа процессов её переработки. Для повышения экономической и энергетической эффективности данных технологических решений необходимо максимально полное использование всех материальных и энергетических потоков, одним из которых является формирование жидких продуктов пиролиза (т. н. пиролизной жидкости, или бионефти).

Цель: классификация и выделение технологических решений для утилизации жидких продуктов пиролиза древесной биомассы с определением уровня технической готовности.

Методы: аналитический обзор тематических публикаций с использованием материалов баз данных РИНЦ, Scopus и Web of Science, уровень технической готовности оценивался согласно шкале TRL.

Результаты. Идентифицированы, классифицированы и описаны основные методы утилизации пиролизной жидкости, получаемой в результате медленного пиролиза древесной биомассы. Представлен обзор технологических решений и научно-исследовательских работ в области утилизации жидких продуктов медленного пиролиза. Наиболее распространенными технологиями преобразования пиролизной жидкости с получением тепловой и/или электрической энергии являются прямое сжигание в горелках котлов и теплогенераторов, в камере сгорания газотурбинных двигателей, газификация с получением синтез-газа, а также использование в качестве топлива поршневых двигателей. Технологии получения химических продуктов и веществ разделяются на простые (получение компонент дорожного строительства, консерванта для древесины, фенолформальдегидных и омыленных смол и др.) и сложные, требующие комплексной многостадийной переработки. Установлено, что наибольшим уровнем технической готовности обладают технологии энергетического применения данного продукта, в то время как наибольшей экономической эффективностью обладают технологии химического применения, несмотря на относительно низкий уровень готовности. Коммерческие решения по утилизации пиролизной жидкости доступны в области её сжигания в горелках и дизель-генераторах.

Ключевые слова:

Пиролиз, биомасса, сжигание, горение, бионефть, пиролизная жидкость, биоуголь.

Введение

Интеграция биомассы в ТЭЖ является одним из приоритетных направлений развития энергетической отрасли из-за экологичности данного вида топлива (биомасса является углероднонейтральным топливом [1]). Отходы лесопиления – один из самых распространенных видов биомассы, особенно в России. Известно, что пиролитическая обработка древесины является перспективной технологией для получения различных полезных продуктов в твердой, жидкой и газообразной фазой [2].

Существующие технологии пиролиза могут быть классифицированы по нескольким признакам: по составу используемой газовой среды (азот, водяной пар или диоксид углерода), по конструкции реактора (ре-

акторы плотного, кипящего слоя) и т. п. Однако одним из наиболее значимых признаков, с точки зрения характеристик получаемых продуктов, является скорость нагрева. По скорости нагрева выделяют технологии флэш (>1000 °C/c), быстрого (>10 °C/c) и медленного (<1 °C/c) пиролиза [2, 3]. Быстрый пиролиз характеризуется высоким выходом жидкой фракции (до 75 мас. %), а медленный пиролиз приводит к более высокому содержанию в продуктах твердой и газовой фазы (до 40 и 35 мас. % соответственно) [2, 4–6]. Для повышения конкурентоспособности таких технологий твердый продукт пиролиза можно использовать в качестве сорбента [5, 6], удобрений [7] или древесного угля [4, 8]. Для увеличения доли получаемого твердофазного продукта обычно используют медлен-

ный пиролиз. Несмотря на то, что основным продуктом медленного пиролиза является продукт в твердой фазе, в ходе его реализации образуется порядка 30 мас. % жидких продуктов. Для повышения эффективности технологий пиролиза биомассы эти материальные потоки также должны максимально эффективно утилизироваться. Дополнительными достоинствами технологий медленного пиролиза является простота топливоподготовки и малые размеры реактора, что позволяет их использовать непосредственно на месте получения биомассы [9]. Это позволяет снизить затраты на транспортировку биомассы, что является важным фактором для обеспечения эффективности данных технологий [10]. Поэтому технологии утилизации жидких продуктов также должны быть достаточно простыми.

Технологии промышленного использования жидких продуктов именно быстрого пиролиза биомассы в настоящее время наиболее хорошо разработаны [11] ввиду более высокого выхода жидкофазных продуктов конверсии (до 75 % от начальной массы). К особенностям данного метода относится крайне низкий выход продукта в твердой фазе [12], что ограничивает его применимость к технологиям получения биококка и его аналогов. Для производства биококка и его аналогов более подходящими являются методы, основанные на процессах пиролиза в условиях медленного нагрева (менее 10 °С/мин), позволяющие достигать более высокого выхода твердофазного продукта (до 40–45 % от массы исходного сырья [13–15]). Несмотря на значительные отличия реализации непосредственно процесса, состав жидкофазных продуктов быстрого и медленного пиролиза достаточно близок. В общем случае пиролизная жидкость содержит органические соединения широкого спектра, среди которых наибольшая концентрация альдегидов, кетонов, моносахаридов и фенолов [16]. Помимо выделения отдельных компонент для дальнейшего использования [17], данная жидкость может использоваться в качестве топлива котельных установок [18] и камер сгорания различных установок [19, 20]. Условно подобные технологии можно разделить на две группы: технологии энергетического применения и химической переработки.

Целью настоящей публикации является комплексная оценка технологических решений в области утилизации жидких углеводородов, полученных в результате медленного пиролиза древесных отходов. Аналитический обзор направлен на решения с учетом уровня их технологической готовности и опыта реализации, причем наибольшее внимание уделяется наиболее приближенным к практическому внедрению. Поскольку наиболее востребованным продуктом медленного пиролиза является углеродистый остаток, обзор посвящен технологическим решениям, соответствующим по уровню сложности технологиям пиролиза в данной области.

Технологии энергетического применения пиролизной жидкости

Процесс пиролиза сопряжен с высокими затратами теплоты на нагрев среды и компенсацию эндотерми-

ческих реакций и процессов, таких как, например, испарение адсорбированных и полученных в ходе термодеструкции жидких компонентов. Поэтому большинство промышленных комплексов пиролиза древесного сырья используют энергию сгорания данных веществ для полной или частичной компенсации энергозатрат. Наиболее проработанными на данный момент решениями являются технологии применения пиролизной жидкости в качестве топлива котлоагрегатов [18, 21, 22] и дизель-генераторов [23, 24]. Использование пиролизной жидкости в качестве топлива для газотурбинных и газификационных установок [11, 24, 25] является технологическим решением с меньшей степенью проработки.

Технологии прямого сжигания пиролизной жидкости

Сжигание пиролизной жидкости с использованием стандартного энергетического оборудования усложняется существенным отличием ряда характеристик от классического жидкого топлива. В частности, такими особенностями называют относительно высокую кислотность и зольность, большую долю балласта в составе (в основном воды), меньшую теплотворную способность и необходимость поддерживать высокую полноту сгорания, т. к. продукты неполного сгорания некоторых компонент пиролизного масла могут быть токсичны [20].

Наибольший прогресс был достигнут применительно к установкам быстрого пиролиза топлива. Однако схожесть составов жидкостей, получаемых в результате быстрого и медленного пиролиза древесной биомассы, позволяет проецировать данный опыт на исследуемые условия [11]. Рядом компаний было реализовано промышленное внедрение комплексных установок по получению пиролизной жидкости и её использованию для целей производства теплоты для собственных нужд и внешних потребителей. К таким компаниям относятся Fortum (Финляндия) [26, 27], Ensyn Fuels (Канада) [28], Valmet (Финляндия) [29], Stork (Нидерланды) [30] и др. Так, например, Valmet предлагает комплексные решения по сжиганию био-нефти для совместного производства тепловой и электрической энергии, а компания Stork предлагает готовые решения по сжиганию пиролизной жидкости для производства перегретого пара [30] (рис. 1).



Рис. 1. Внешний вид парового котла фирмы Stork, использующего пиролизную жидкость в качестве топлива [30]

Fig. 1. Image of steam boiler by Stork [30] which uses pyrolysis liquid as fuel

В России зрелые технологические решения в данной сфере в настоящее время либо отсутствуют, либо находятся на ранних стадиях научно-технических исследований и апробации [24, 31, 32]. При этом, как было отмечено ранее, схожесть теплотворной способности классического жидкого топлива с теплотой сгорания пиролизной жидкости позволяет использовать существующие горелочные устройства. Например, в [22, 32] представлены результаты успешной апробации универсальной горелки «Kroll GmbH» KG/UB 55 при работе на пиролизной жидкости, полученной в ходе быстрого пиролиза древесины. Было установлено, что стабильное зажигание и горение топлива достигается при незначительном предварительном нагреве – менее 80 °С – и увеличении мощности устройства электрического розжига (или использование дополнительной «подсветки» классическим топливом). Полученные данные хорошо согласуются с результатами аналогичных исследований за рубежом [20]. При этом во всех работах отмечается, что использование пиролизной жидкости позволяет улучшить экологические характеристики процесса горения – отмечается снижение выбросов оксидов азота. В [32] указано, что на базе ООО «Энергетика» (Казань, Россия) были проведены испытания котла мощностью 80 кВт при сжигании бιονефти. При использовании испарительных горелок наблюдалось протекание вторичных реакций пиролиза с образованием пека смол (коксование поверхностей).

Основные рекомендации по модернизации стандартных горелочных устройств для использования пиролизной жидкости: должны использоваться коррозионностойкие материалы для форсунок, предварительный подогрев топлива должен быть ограничен, рекомендовано использование дополнительного устройства для розжига, а также необходим строгий контроль высокого уровня полноты сгорания топлива.

Использование пиролизной жидкости в качестве топлива для камер сгорания газовых турбин является гораздо менее проработанным техническим решением. Несмотря на схожие с котельными установками принципы эксплуатации, ввиду более суровых (в сравнении с горелками котельных установок) условий эксплуатации (высокие температуры и давление) указанные ранее недостатки играют более важную роль. Причем негативное воздействие распространяется не только на материалы непосредственно камеры сгорания, но и на расположенное за нею оборудование – активные и сопловые лопатки газовой турбины. Ввиду высокой стоимости последней негативное влияние на данные элементы должно быть минимизировано.

Однако возможность присутствия твердых частиц в пиролизной жидкости и относительно высокая зольность могут сделать её использование в газотурбинной установке затруднительным. Между тем, одной из немногих опубликованных работ с описанием опыта промышленной эксплуатации подобной системы является [33]. Образец турбины ОГТ2500 мощностью 2,5 МВт был модифицирован сотрудниками корпорации Orenda Aerospace Corporation (Канада) для работы на биотопливе различного происхождения (рис. 2).



Рис. 2. Внешний вид установки ОГТ2500 [33]

Fig. 2. Image of the OGT2500 unit [33]

Указано, что существующая газотурбинная установка была модифицирована для работы на биотопливе. Была модифицирована камера сгорания, установлена система горячей очистки и дополнительной обработки топлива. При этом последние опубликованные данные по работе данной установки датируются 2005 г., и, по представленной в [11] информации, после модификации установка практически не эксплуатировалась. В [11] также упоминаются газотурбинные установки фирмы OPRA Turbines (Финляндия). На сайте корпорации [34] приведено описание газовой турбины OP-16, способной, по заверениям производителя, работать на различном топливе, в том числе и пиролизной жидкости. В материалах конференций последних лет описывается успешный опыт демонстрационной эксплуатации газотурбинных двигателей OPRA OP16 при работе на бιονефти [35, 36], однако данные по опыту промышленной эксплуатации подобных установок в литературе не представлены.

Отечественные разработки в данной сфере находятся на уровне научно-исследовательских работ [32]. В [37] представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований (преимущественно, зарубежных) при работе камер сгорания с использованием жидких биотоплив различного происхождения – одной марки бιονефти, полученной в ходе пиролиза автомобильных покрышек, и двух марок, полученных в ходе переработки двух разновидностей древесины. На основе представленных данных и опыта промышленной эксплуатации были сформированы характерные рекомендации по применению, схожие с рекомендациями, сформированными для горелочных устройств [37]. Помимо них, были выявлены следующие дополнительные требования: необходимость отсутствия твердых частиц большого размера в топливе, необходимость более строгого контроля значений рН топлива и, при необходимости, влияния на данное значение путем внесения кислотных или щелочных добавок, более строгий контроль за содержанием серы в топливе для контроля и предотвращения образо-

вания отложений (рис. 3) и высокотемпературной коррозии.



Рис. 3. Внешний вид отложений в камере сгорания газовой турбины при работе на жидких продуктах пиролиза древесины без контроля содержания серы [37]

Fig. 3. Image of deposits into gas turbine combustion chamber after using liquid products of wood pyrolysis as fuel without sulfur control [37]

Применение пиролизной жидкости в качестве топлива дизель-генераторов исследовано в зарубежной литературе достаточно детально. Наиболее полный обзор подобных научно-исследовательских работ представлен в [38]. Обширные опытно-промышленные испытания проводились с участием VTT (Финляндия) [39] и Wärtsilä (Финляндия) [40]. Все указанные ранее недостатки (кислотность, низкая теплота сгорания, высокая зольная балластность, возможность присутствия твердых частиц) сказывались и на особенностях эксплуатации дизель-генератора, в частности, на явлении ускоренного износа форсуночных игл (рис. 4). Установлено, что использование пиролизной жидкости позволяет достигать предельно высоких значений термического КПД – до 45 % – и значительно снизить выбросы оксидов азота, а также увеличить скорость горения топлива и уменьшить температурные градиенты в цилиндрах за счет высокой теплопроводности водяного пара.

Дополнительные требования к эксплуатации дизель-генераторов были сформулированы следующим образом.

1. Вся линия топливоснабжения (баки, фильтры, трубопроводы, форсунки и пр.) должна быть выполнена из коррозионностойких материалов для снижения негативного воздействия низкого pH топлива.
2. Необходимость организации контроля температуры и постоянного перемешивания пиролизной жидкости в баке для предотвращения её расслоения.
3. Необходимость строго контроля теплотворной способности топлива и отсутствия твердых частиц. Нерешенной остаётся проблема износа форсунок и интенсивного образования лакового нагара в двигателе.

Возможными решениями могут стать использование добавок, предотвращающих данный процесс, или выборочное удаление элементов, имеющих наибольший вклад в процесс лакообразования. Также значительной проблемой является высокая вязкость подобного топлива, что усугубляется невозможностью значительного подогрева (выше 80 °С) для снижения вязкости. Содержание спиртов в жидкости также приводит к ухудшению его низкотемпературных свойств.

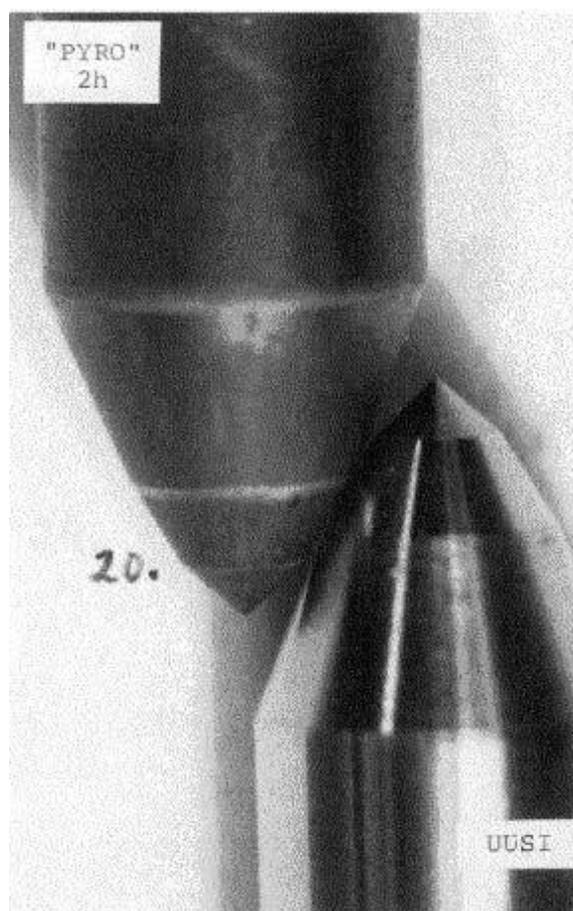


Рис. 4. Внешний вид форсуночных игл: новой (снизу) и после двух часов эксплуатации (сверху) [41]

Fig. 4. Image of the atomizing needle: new (at the bottom) and after 2 h of operation (at the top) [41]

Во многих работах [11, 23, 41] отмечается необходимость использования различных вспомогательных топлив и присадок для обеспечения стабильного зажигания и горения исследованных составов. Наиболее перспективной добавкой к пиролизной жидкости является бутанол [42–44], позволяющий не только улучшить энергетические характеристики топлива, но и предотвратить его расслаивание и снизить вязкостные характеристики. Так, например, в [45] указано, что добавка 15 мас. % бутанола позволяет достигать удовлетворительных характеристик работы дизельного двигателя, сопоставимых с параметрами, наблюдаемыми при работе на обычном дизельном топливе. Помимо бутанола и различных цетановых присадок, предлагается использование различных веществ, та-

ких как этанол [46] или непосредственно дизель [23], что приводит к улучшению эксплуатационных характеристик, хотя и не столь существенному.

В отечественной литературе подобные работы практически не представлены. Имеется ограниченное число работ по применению схожих веществ в качестве топлива дизель-генераторов [47].

Wärtsilä в России предлагает поставку дизель-генераторов, способных работать на топливе различного происхождения, в т. ч. и из отходов различного происхождения. Предприятие BTG Biomass Technology Group (Нидерланды) [48] имеет опыт модификации существующих установок для работы на пиролизной жидкости [11]. При этом нередко требовался достаточно большой объем модификаций, целесообразность которых должна оцениваться в каждом конкретном случае.

Следует отметить, что в данном разделе не рассматривались системы, работающие на синтез-газе, полученном в ходе газификации/окисления пиролизной жидкости.

Технологии газификации пиролизной жидкости

Газификация пиролизной жидкости – процесс преобразования пиролизной жидкости в горючий газ за счет реакций неполного окисления углеродсодержащих компонент воздухом и/или водяным паром. Технологии использования газообразного топлива различного состава разработаны достаточно хорошо благодаря простоте обращения и универсальности соответствующих подходов [2, 49–52] – большинство оборудования, спроектированного для работы на классическом газообразном топливе, может использоваться при работе на газе различного состава с минимальным количеством модификаций. Большой спектр камер сгорания, поршневых двигателей и газотурбинных установок поставляются адаптирован-

ными для работы в подобных условиях. Существует три принципиально отличающихся подхода к организации непосредственно процесса газификации [52, 53]: газификация в плотном слое, газификация в кипящем слое, газификация в потоке.

Применительно к жидкому топливу пригоден только последний способ – газификация пиролизной жидкости в потоке. В большинстве случаев такая газификация реализуется совместно с процессом пиролиза исходной древесины. Как правило, для этого достаточно поддерживать высокую температуру выделяющегося пиролизного газа во всем тракте. В таком случае могут применяться все указанные выше подходы. Однако такое решение приводит к максимально высокой доле балласта в получаемых продуктах, т. е. при частичной конденсации продуктов значительная часть влаги может быть отведена. Учитывая, что сконденсированная влага содержит фенол в значительной концентрации, иногда такой подход оправдан.

В зарубежной литературе представлено большое число исследований различной степени разработки и масштаба (рис. 5). В последнее время превалирует мнение о необходимости обеспечения максимальной компактности подобных установок ввиду низкой энергетической плотности биотоплива и большой стоимости его транспортировки, особенно на большие расстояния, поэтому большинство современных установок имеют невысокую мощность.

При этом имеющиеся промышленные образцы технологий газификации биомассы (например, технологии Siemens [56, 57]) не выделяют элементов конденсации жидких продуктов реакции (рис. 6). Примечательно, что такие установки основаны на принципиально отличающемся от пиролиза подходе к переработке биомассы.



a/a



b/b

Рис. 5. Опытно-промышленные установки газификации: а) часть стенда газификации биомассы мощностью 2 МВт в г. Сайтама, Япония [54]; б) опытнo-промышленный стенд комплексной слоевой газификации мощностью 5 МВт в г. Сотакарбо, Италия [55]

Fig. 5. Pilot-scale gasification units: a) part of 2 MW biomass gasification plant in Saitama, Japan [54]; b) 5 MW pilot-scale fixed bed gasification unit in Sotacarbo, Italy [55]

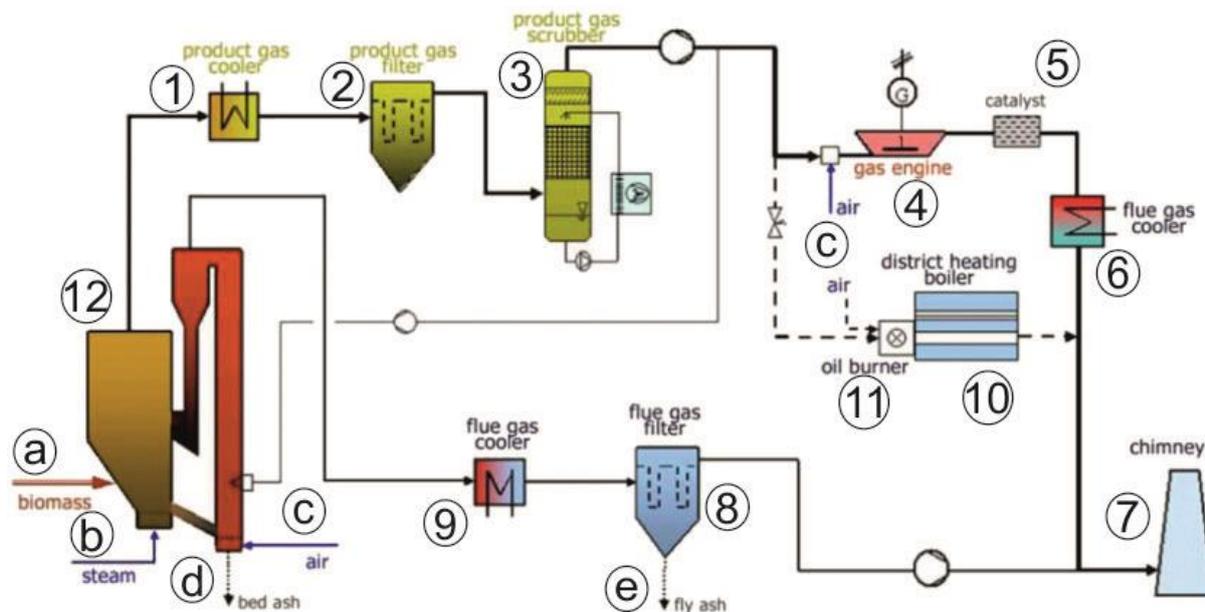


Рис. 6. Принципиальная схема газификационной установки DFB в Госсинге, Австрия [57]: 1 – охладитель синтез-газа, 2 – фильтр синтез-газа, 3 – скруббер синтез-газа, 4 – газовая турбина, 5 – катализатор, 6 – охладитель дымовых газов, 7 – дымовая труба, 8 – фильтр дымовых газов, 9 – охладитель дымовых газов, 10 – котел сетевой воды, 11 – мазутная горелка, 12 – газификатор, а – биомасса, б – водяной пар, с – воздух, d – шлак, e – зола

Fig. 6. Principal scheme of the DFB gasification plant in Gossing, Austria [57]: 1 – product gas filter, 2 – product gas scrubber, 3 – product gas scrubber, 4 – gas engine, 5 – catalyst, 6 – flue gas cooler, 7 – chimney, 8 – flue gas filter, 9 – flue gas cooler, 10 – district heating boiler, 11 – oil burner, 12 – gasificator, a – biomass, b – steam, c – air, d – bed ash, e – fly ash

Отечественные технологии газификации пиролизной жидкости находятся на стадии опытно-экспериментальных разработок и исследований [25, 58]. В указанных работах приводятся результаты расчета технологических системы, включающей в себя процессы газификации древесной биомассы, а также результаты экспериментальных исследований. Несмотря на существенно отличающуюся химию процесса газификации, её техническая реализация практически идентична процессам горения соответствующих топлив. Главным отличием является более высокое давление распыления и, как результат, необходимость установки топливных насосов.

Технологии химического применения пиролизной жидкости

Ввиду многокомпонентного состава пиролизной жидкости и наличия ряда ценных для химической промышленности веществ соответствующие технологии представляют повышенный интерес. Относительно высокая добавочная стоимость получаемых продуктов позволит повысить конкурентоспособность технологий утилизации древесной биомассы в целом. В составе пиролизной жидкости с высокой концентрацией содержатся фенолы и спирты, что обуславливает преобладание технологий получения соответствующих компонентов. Однако одной из основных проблем является достижение высокой чистоты получаемых материалов с адекватными затратами. Учитывая высокую растворимость фенолов в указанных веществах и воде, вопросы чистоты и безопасности

получаемого продукта становятся особенно актуальными. Условно технологии химического производства можно разделить на две группы: требующие и не требующие высокой чистоты получаемого продукта.

Технологии низкой чистоты получаемого продукта

Одной из наиболее проработанных технологий промышленного использования пиролизной жидкости является её использование для производства вяжущего компонента для дорожного строительства. Несмотря на относительную неприязательность данного применения к составу жидкости, для эффективного использования, тем не менее, необходима простая, но многостадийная процедура подготовки жидкости (рис. 7 [17, 59, 60]), которая приводит к формированию загрязненных отходов (в первую очередь, воды с примесями фенолов), которые необходимо утилизировать. Возможность замещения классического связующего на производные жидкого продукта пиролиза ограничена относительно низкими значениями в 5–10 % [17]. Вкупе с относительно невысокой добавочной стоимостью получаемого продукта наиболее распространенные технологии основаны на предположении о географической близости объекта получения пиролизной жидкости и предприятия дорожного строительства, т. к. транспортировка на большие расстояния видится нерентабельной.

Несмотря на относительную простоту (основным технологическим процессом подготовки продукта является сепарация), опыт промышленного внедрения подобных установок крайне ограничен. В зарубежной

литературе опыт промышленного внедрения подобных технологий не описан [62, 63]. В литературном обзоре 2020 г. [63] сообщается о нахождении соответствующей технологии на стадии пилотных испытаний. В работе [61] указывается на внедрение подобных решений в ОАО «Асфальтобетонный завод», г. Красноярск в 2006 г., однако более детальной информации о практике подобного внедрения не найдено. При этом были проведены комплексные исследования данных технологических решений требованиям соответствующих ГОСТов [17], указывающие на высокую степень готовности таких технологий к практической реализации.

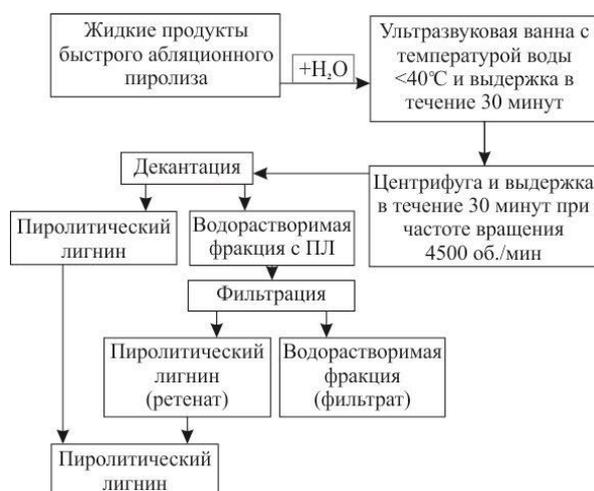


Рис. 7. Схема подготовки пиролизной жидкости для использования в качестве компонента дорожного строительства [61]

Fig. 7. Scheme of the pyrolysis liquid processing for using as a component for road building [61]

Другим подобным решением является использование пиролизной жидкости в качестве компонента древесного консерванта. Ввиду высокого содержания фенольной фракции, а также кислородсодержащих групп, использование пиролизной жидкости может привести к повышению сопротивляемости обработанной древесины к грибковому воздействию [16, 64–68] и воздействию насекомых [68]. При этом в различных работах используются разные подходы к реализации данного процесса, которые условно можно разделить на три группы:

- использование чистой сепарированной пиролизной жидкости;
- использование пиролизной жидкости в смеси с классическими компонентами (например, спиртами);
- использование сконденсированной при определенных температурах фракции пиролизной жидкости.

При реализации первого подхода [66] исследовались фунгицидные свойства пиролизной жидкости в исходном состоянии. Было установлено, что обработка древесины приводит к повышению её сопротивляемости от внешнего воздействия, однако не снижает гидрофобности древесины, что является нежелательным свойством подобных составов.

В качестве характерного примера второго подхода может служить работа [68]. В ней исследовались консервирующие свойства смесей до 20 мас. % пиролизной жидкости с этанолом. Были получены положительные результаты в части сопротивления грибкам и насекомым (термитам), гидрофобность возросла, а старение древесины замедлилось. При этом в [67] установлено, что удовлетворительные консервирующие свойства пиролизной жидкости получены как при использовании её в смеси с 75 мас. % этилового спирта, так и при использовании в чистом виде.

В [69] были исследованы антиокислительные свойства трех фракций пиролизной жидкости: исходной, дистиллятов в температурных диапазонах 180–220 °С и 220–270 °С. Установлено, что полученные при высоких температурах фракции имеют более высокую антиокислительную активность. Все указанные работы находятся на стадии лабораторных исследований и разработок.

В отечественной литературе данные работы ограничиваются принципиальным описанием технологического процесса [16]. Единственным близким решением технического характера является патент [70], описывающий получение древесной пропитки, состоящей из дистиллятов фракции термokatалитического происхождения, кипящей при 220–480 °С, со смесью отработанных фракций нефтепродуктов, которые схожи по свойствам с пиролизным маслом.

Омыленная древесная смола, используемая для производства бетона, является классическим продуктом переработки пиролизной жидкости [16]. Для её применения необходимо выделение нерастворимой в воде фракции, которая затем омыливается щелочью и направляется на предприятия производства бетона.

Перспективным направлением является получение фенолформальдегидных смол для использования в деревообрабатывающей промышленности в качестве связующего [71]. Данное направление представляет большой интерес ввиду относительно высокой стоимости полученного продукта и возможности снижения его токсичности. Использование токсичного фенола пиролизной жидкости для указанных целей выглядит целенаправленным и эффективным решением. Как в отечественной [72–74], так и в зарубежной литературе [75–81] приведено большое число работ в данной области.

Принцип синтеза подобных систем достаточно прост: так как фенол является водорастворимым веществом, пиролизная жидкость разбавляется водой. Далее полученная обогащенная фенолом вода отделяется от пиролизной жидкости и с помощью дистилляции путем выпаривания очищается от фенола (температура кипения фенола при атмосферном давлении составляет порядка 180 °С). Следует отметить, что фенолы различного состава могут иметь различные температуры кипения, т. е. полученная в ходе выпаривания вода будет также загрязненной. При этом отделенная нерастворимая в воде фракция, содержащая т. н. тяжелые углеводороды, должна будет утилизироваться отдельно.

Подход к применению пиролизной жидкости в производстве фенолформальдегидных смол схож с её применением для производства консервантов: используется либо полное, либо частичное замещение фенольной фракции производными пиролизной жидкости. При этом для её получения требуется использование формальдегида, являющегося токсичным и опасным в обращении веществом.

Так, в [81] исследовались возможности замещения чистого фенола неочищенной пиролизной жидкостью (с содержанием влаги ~12 мас. %). Установлено, что замещение более 20 мас. % чистого фенола приводит к формированию избыточных промежуточных связей в смоле, ухудшая её адгезионные свойства. При этом отмечается, что наличие частичек биококса положительно сказывается на свойствах смолы, т. к. они служат концентраторами накопления фенольных групп. Аналогичные результаты были получены в [75, 79] применительно к использованию данных смол для производства древесных плит – установлено, что замещение более 25 мас. % фенола пиролизной жидкостью приводит к значительному снижению прочностных свойств получаемого продукта. В работах [82, 83] указывается, что целесообразно замещение до 50 % фенола. В [84] использование клея на основе фенола пиролизной жидкости (до 60 % от содержания фенола в составе) позволило достичь высоких показателей прочности клеевого шва, сопоставимых с классическими составами. При этом, несмотря на то, что

ряд приведенных работ использует пиролизную жидкость, полученную на промышленных предприятиях [81], данные о промышленном внедрении указанных технологических решений отсутствуют.

Технологии высокой чистоты получаемого продукта

Технологические решения по глубокой переработке пиролизной жидкости для производства продуктов с высокой добавочной стоимостью, требующих высокой степени очистки, достаточно немногочисленны. Это связано как с необходимостью реализации сложной и затратной процедуры очистки и постобработки, включающей большое число стадий (пример подобной схемы приведен на рис. 8 [85]), так и с необходимостью более строгого контроля состава используемой жидкости.

Обычно подобные решения находят достаточно ограниченное применение в виде относительно уникальных технологических решений, таких как Biolime [86–88], производство углеволокна [89] или технологий получения пищевой добавки «жидкий дым» [23, 90]. Также возможными продуктами переработки пиролизной жидкости являются очищенные до промышленного качества компоненты пиролизной жидкости [91, 92] – спирты, фенолы и др. Все приведенные данные свидетельствуют о чрезвычайной сложности такого рода технологических решений, что приводит к их более высокой стоимости относительно непосредственно установки пиролиза.

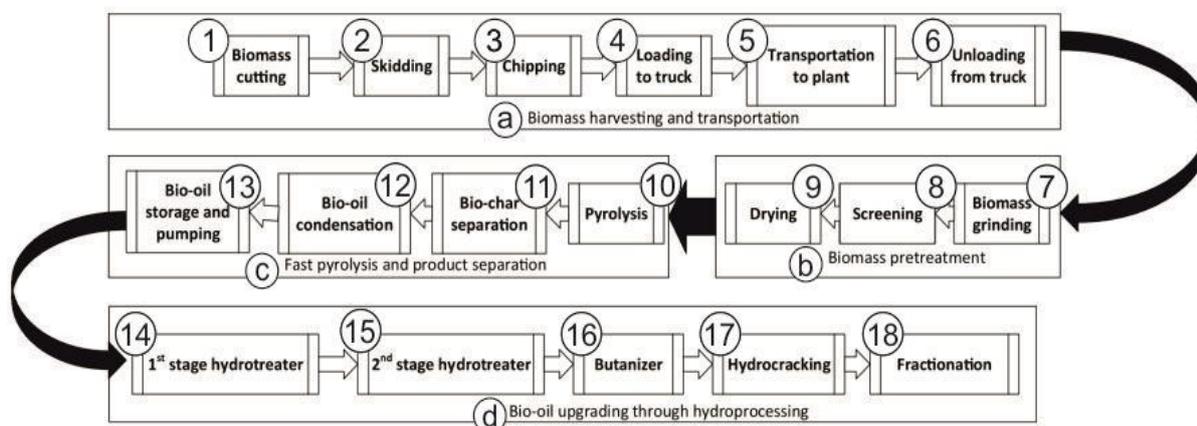


Рис. 8. Принципиальная схема производства коммерческого моторного топлива с применением пиролизной жидкости [85]: 1 – сбор биомассы, 2 – трелевка, 3 – измельчение, 4 – погрузка в грузовик, 5 – транспортировка на завод, 6 – выгрузка из грузовика, 7 – измельчение биомассы, 8 – просеивание, 9 – сушка, 10 – пиролиз, 11 – разделение биоуглерода, 12 – конденсация пиролизной жидкости, 13 – хранение и перекачка пиролизной жидкости, 14 – установка гидроочистки 1-ой ступени, 15 – установка гидроочистки 2-ой ступени, 16 – бутанизатор, 17 – гидрокрекинг, 18 – фракционирование, а – сбор и транспортировка биомассы, б – предварительная обработка биомассы, с – быстрый пиролиз и разделение продуктов, д – повышение качества биомассы путем гидрообработки

Fig. 8. Principal scheme of commercial engine oil production using pyrolysis liquid [85]

Заключение

Основные результаты, краткое описание и уровень готовности технологии приведены в таблице. Уровень готовности технологии оценивался согласно критериям ГОСТ Р 56861-2016 [93].

Выводы

1. В результате анализа современных публикаций отобраны и классифицированы основные технологические решения утилизации пиролизной жидкости, полученной в ходе пиролиза древесины.

Рассмотрены технологии энергетического использования пиролизной жидкости и её переработки в

химические реагенты и конечные продукты с высокой добавочной стоимостью.

Таблица. Краткое описание и технический уровень технологических решений утилизации пиролизной жидкости
Table. Short description and technological level of solutions for pyrolysis liquid utilization

Название Name	Краткое описание Short description	Уровень готовности технологии Technology readiness level
Сжигание в котлоагрегатах Burning in boilers	Прямое сжигание пиролизной жидкости в котлоагрегатах Simple burning of pyrolysis liquid as fuel in boilers	УТГ 8-9 TRL 8-9
Сжигание в камерах сгорания ГТУ Burning in combustion chamber of gas turbine units	Сжигание в камерах сгорания ГТУ при высоких давлениях для подачи на газовую турбину Burning in combustion chamber of gas turbine units at high pressure before gas turbine	УТГ 6-7 TRL 6-7
Сжигание в поршневых двигателях Combustion in reciprocating engines	Сжигание в поршневых двигателях (дизель-генераторах) для выработки теплоты и электроэнергии Combustion in reciprocating engines (diesel-generators) for producing heat and power	
Газификация Gasification	Газификация для получения горючего газа Gasification for obtaining combustible gas	УТГ 3 TRL 3
Получение связующего для дорожного строительства Producing binders for road building	Выделение вяжущей фракции для замены битума и модификации асфальта при дорожном строительстве Extraction of binding fraction for substituting bitumen and modification of asphalt during road building	УТГ 4 TRL 4
Получение древесного консерванта Obtaining wood preservative	Получения лака-консерванта для предотвращения порчи древесины Obtaining preservative lacquer to prevent preliminary spoiling of wood	УТГ 3-4 TRL 3-4
Получения фенолформальдегидных смол Producing phenolic-formaldehyde resin	Получения фенолформальдегидных смол путем замены промышленного фенола на фенол из пиролизной жидкости Obtaining phenolic-formaldehyde resins by substituting industrial phenol by phenol from pyrolysis liquid	
Получение древесной омыленной смолы Obtaining saponified wood resin	Нерастворимая в воде фракция пиролизной жидкости омыливается щелочью Insoluble in water fraction of pyrolysis liquid is saponified by alkali	УТГ 3 TRL 3
Технологии комплексной переработки Complex processing technologies	Дистилляция пиролизной жидкости для выделения отдельных компонентов для химической промышленности и потребителя Pyrolysis liquid distillation to extract components for chemical industry and consumers	УТГ 2-3 (УТГ 7-8*) TRL 2-3 (TRL 7-8*)

*Для отдельных технологических решений, приведенных в [36, 90].

*For some technological solutions presented in [36, 90].

2. Технологии энергетического использования пиролизной жидкости имеют достаточно высокую степень проработки и подготовленности для технического внедрения, выраженную в наличии опытно-промышленных образцов и даже коммерческих решений. Основные отличия пиролизной жидкости от классического жидкого топлива заключаются в более высокой вязкости, кислотности, влажности, волатильности состава и низкой стабильности теплоты сгорания. Одним из наиболее существенных недостатков является высокая кислотность, требующая модификации топливного тракта с использованием коррозионностойких материалов. Ввиду незначительности отличий соответствующих технологий от классических решений в настоящее время имеются комплексные коммерческие решения для сжигания пиролизной жидкости в котельных агрегатах, камерах сгорания и поршневых двигателях.
3. К общим недостаткам технологий разделения пиролизной жидкости на индивидуальные вещества для химических производств или конечного по-

требления относят сложность соответствующих технологических схем и зачастую необходимость вовлечения дополнительных реагентов в процесс. Лучше всего проработаны наиболее простые технологические решения, основанные на переработке пиролизной жидкости с получением связующего для дорожного строительства, консерванта для древесины или фенолформальдегидных смол. Однако практическая реализация подобных технологий достаточно ограничена и в большинстве случаев пока не выходит за рамки лабораторных и экспериментальных исследований. Более сложные технологические решения нашли крайне ограниченное применение отдельными производителями конкретного продукта.

Работа была реализована при финансовой поддержке по дополнительному контракту № 075-03-2021-138/3 о субсидии из федерального бюджета на финансовую поддержку реализации государственного задания по оказанию государственных услуг (внутренний номер 075-GZ/X4141/687/3).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Improving environmental and energy efficiency in wood transportation for a carbon-neutral forest industry / T. Palander, H. Haavikko, E. Kortelainen, K. Kärhä, S.A. Borz // *Forests*. – 2020. – V. 11. – № 11. – P. 1–17.
2. Thermochemical processing of woody biomass: a review focused on energy-driven applications and catalytic upgrading / J.C. Solarte-Toro, J.A. González-Aguirre, J.A. Poveda Giraldo, C.A. Cardona Alzate // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2021. – V. 136. – P. 110376.1–16.
3. Barmore T. Biomass pyrolysis: past, present, and future // *Environment, Development and Sustainability*. – 2020. – V. 22. – № 1. – P. 17–32.
4. Pre-treatment of furniture waste for smokeless charcoal production / P. Kazimierski, P. Hercel, K. Januszewicz, D. Kardaś // *Materials*. – 2020. – V. 13. – № 14. – P. 1–11.
5. Investigation of the influence of ultrasonic treatment on the sorption properties of the pyrolysis product of wood waste / I.A. Nasrov, G.V. Mavrin, D.D. Fazullin, I.G. Shaikhiev // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2019. – V. 1347. – № 1. – P. 012080.1–5.
6. Cost-effective sulfurized sorbents derived from one-step pyrolysis of wood and scrap tire for elemental mercury removal from flue gas / Y. Xu, G. Luo, Q. Zhang, Z. Li, S. Zhang, W. Cui // *Fuel*. – 2021. – V. 285. – P. 119221.1–8.
7. Evaluation of biochar post-process treatments to produce soil enhancers and phosphorus fertilizers at a single plant / M. Laghari, D.S. Müller-Stöver, M. Puig-Arnavat, T.P. Thomsen, U.B. Henriksen // *Waste and Biomass Valorization*. – 2021. – V. 12. – № 10. – P. 5517–5532.
8. Fuel sensitivity of biomass cookstove performance / L. Deng, D. Torres-Rojas, M. Burford, T.H. Whitlow, J. Lehmann, E.M. Fisher // *Applied Energy*. – 2018. – V. 215. – P. 13–20.
9. Life cycle assessment of charcoal production and electricity generation from eucalyptus in an industrial batch kiln / M.M. Vicente Leme, O.J. Venturini, E.E. Silva Lora, W. de Almeida, M.H. Rocha, T. Andrade da Cunha Dias, O.A. del Olmo // *Renewable Energy*. – 2021. – V. 180. – P. 232–244.
10. Richard T.L. Challenges in scaling up biofuels infrastructure // *Science*. – 2010. – V. 329. – № 5993. – P. 793–796.
11. Norms, standards, and legislation for fast pyrolysis bio-oils from lignocellulosic biomass / A. Oasmaa, B. van de Beld, P. Saari, D.C. Elliott, Y. Solantausta // *Energy & Fuels*. – 2015. – V. 29. – № 4. – P. 2471–2484.
12. Efika C.E., Onwudili J.A., Williams P.T. Influence of heating rates on the products of high-temperature pyrolysis of waste wood pellets and biomass model compounds // *Waste Management*. – 2018. – V. 76. – P. 497–506.
13. Evaluation of the physiochemical development of biochars obtained from pyrolysis of wheat straw, timothy grass and pinewood: Effects of heating rate / P. Mohanty, S. Nanda, K.K. Pant, S. Naik, J.A. Kozinski, A.K. Dalai // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. – 2013. – V. 104. – P. 485–493.
14. Characteristic studies on the pyrolysis products from hydrolyzed Canadian lignocellulosic feedstocks / S. Nanda, R. Azargohar, J.A. Kozinski, A.K. Dalai // *Bioenergy Research*. – 2014. – V. 7. – № 1. – P. 174–191.
15. Understanding the pyrolysis behavior of agriculture, forest and aquatic biomass: Products distribution and characterization / G. Wang, B. Fan, H. Chen, Y. Li // *Journal of the Energy Institute*. – 2020. – V. 93. – № 5. – P. 1892–1900.
16. Башкиров В.Н., Бикбулатова Г.М., Гатауллина А.А. Перспективы промышленного использования жидких продуктов быстрого пиролиза растительной биомассы // *Евразийское Научное Объединение*. – 2018. – Т. 46. – № 12-3. – С. 207–210.
17. Файзрахманова Г.М. и др. Использование древесной пиролизной жидкости для получения химических продуктов // *Вестник Казанского технологического университета*. – 2013. – Т. 16. – № 8. – С. 312–314.
18. Standard liquid fuel for industrial boilers from used wood / C. Lindfors, A. Oasmaa, A. Välimäki, T. Ohra-aho, H. Punkkinen, C. Bajamundi, K. Onarheim // *Biomass and Bioenergy*. – 2019. – V. 127. – P. 105265.1–8.
19. Albert-Green S., Thomson M.J. The effects of nozzle design on the combustion of wood-derived fast pyrolysis oil // *Biomass and Bioenergy*. – 2018. – V. 117. – P. 102–114.
20. Krumdieck S.P., Daily J.W. Evaluating the feasibility of biomass pyrolysis oil for spray combustion applications // *Combustion Science and Technology*. – 1998. – V. 134. – № 1–6. – P. 351–365.
21. Co-firing of fast pyrolysis bio-oil and heavy fuel oil in a 300-kWth furnace / S.S. Hou, W.C. Huang, F.M. Rizal, T.H. Lin // *Applied Sciences (Switzerland)*. – 2016. – V. 6. – № 11. – P. 326.1–11.
22. Энергетическое использование пиролизной жидкости / С.А. Забелкин, А.Н. Грачев, В.Н. Башкиров, Ф.И. Мулламухаметов // *Вестник Казанского технологического университета*. – 2010. – № 10. – С. 369–374.
23. Loganathan K., Manoharan C. Evaluation of performance and emission features of jatropa biodiesel-turpentine blend as green fuel // *Thermal Science*. – 2017. – V. 21. – № 1. – P. 615–625.
24. Nyashina G.S., Verzhinina K.Y., Strizhak P.A. Impact of micro-explosive atomization of fuel droplets on relative performance indicators of their combustion // *Fuel Processing Technology*. – 2020. – V. 201. – № October 2019. – P. 106334.1–14.
25. Технологическая схема газификации жидкого продукта контактного пиролиза / Д.В. Тунцев, Р.Г. Сафин, А.М. Касимов, Р.Г. Хисматов, З.Г. Саттарова // *Вестник Казанского технологического университета*. – 2013. – Т. 16. – № 19. – С. 139–141.
26. Fortum 2021. URL: <https://www.fortum.ru/> (дата обращения 11.11.2021).
27. Emissions from a fast-pyrolysis bio-oil fired boiler: comparison of health-related characteristics of emissions from bio-oil, fossil oil and wood / O. Sippula, K. Huttunen, J. Hokkinen, S. Kärki, H. Suhonen, T. Kajolinna, M. Kortelainen, T. Karhunen, P. Jalava, O. Uski, P. Yli-Pirilä, M.R. Hirvonen, J. Jokiniemi // *Environmental Pollution*. – 2019. – V. 248. – P. 888–897.
28. Ensyn Inc. 2021. URL: <http://www.ensyn.org/en/home/> (дата обращения 11.11.2021).
29. Valmet 2021. URL: <https://www.valmet.com/ru/> (дата обращения 11.11.2021).
30. Stork Inc. 2021. URL: <https://www.stork.com/en> (дата обращения 11.11.2021).
31. Verzhinina K.Y., Shlegel N.E., Strizhak P.A. Impact of environmentally attractive additives on the ignition delay times of slurry fuels: experimental study // *Fuel*. – 2019. – V. 238. – P. 275–288.
32. Энергетическое использование жидких продуктов быстрого пиролиза древесины / С.А. Забелкин, Д.В. Тунцев, А.Н. Грачев, В.Н. Башкиров // *Биоэнергетика и биотехнологии*. – 2010. – Т. 4. – С. 79–84.
33. Lupandin V., Thamburaj R., Nikolayev A. Test results of the OGT2500 gas turbine engine running on alternative fuels: BioOil, Ethanol, Biodiesel and Crude Oil // *ASME Turbo Expo 2005: Power for Land, Sea, and Air*. – Nevada: International Gas Turbine Institute, 2005. – P. 421–426.
34. Opra Turbines Inc. 2021. URL: <https://www.opraturbines.com/ru/> (дата обращения 11.11.2021).
35. Improved CFD predictions of pyrolysis oil combustion using advanced spray measurements and numerical models / E. van Beurden, A. Pozarlik, B. Putra, G. Brem, T. Bouten, J. Withag, L.U. Axelsson // *ASME Turbo Expo 2021: Turbomachinery Technical Conference and Exposition, GT 2021*. – Virtual: American Society of Mechanical Engineers, 2021. – V. 6. – P. 1–12.
36. Experimental and numerical investigation of the application of fast pyrolysis oil in a gas turbine combustor / T. Bouten, J. Withag, L. Axelsson, B. Putra, A. Pozarlik, G. Brem, C. Benesch, T. Brunner, I. Obernberger // *28th European Biomass Conference and Exhibition, e-EUBCE 2020*. – Virtual: ETA-Florence Renewable Energies, 2020. – P. 957–965.
37. Seljak T., Širok B., Katrašnik T. Advanced fuels for gas turbines: fuel system corrosion, hot path deposit formation and emissions // *Energy Conversion and Management*. – 2016. – V. 125. – P. 40–50.
38. Chiaramonti D., Oasmaa A., Solantausta Y. Power generation using fast pyrolysis liquids from biomass // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2007. – V. 11. – № 6. – P. 1056–1086.
39. VTT Technical Research Centre of Finland Ltd. 2021. URL: <https://www.vttresearch.com/en> (дата обращения 11.11.2021).
40. Wärtsilä Corp. 2021. URL: <https://www.wartsila.com/> (дата обращения 11.11.2021).

41. Solantausta Y., Nylund N.O., Gust S. Use of pyrolysis oil in a test diesel engine to study the feasibility of a diesel power plant concept // *Biomass and Bioenergy*. – 1994. – V. 7. – № 1–6. – P. 297–306.
42. Yang S.I., Wu M.S. The droplet combustion and thermal characteristics of pinewood bio-oil from slow pyrolysis // *Energy*. – 2017. – V. 141. – P. 2377–2386.
43. Kim T.Y., Lee S., Kang K. Performance and emission characteristics of a high-compression-ratio diesel engine fueled with wood pyrolysis oil-butanol blended fuels // *Energy*. – 2015. – V. 93. – P. 2241–2250.
44. Performance and emission characteristics of an IDI diesel generator fueled with wood pyrolysis oil-butanol blended fuels / S. Lee, T.Y. Kim, K. Kang, I. Park, M. Kim, J. Lim // *Transactions of The Korean Society of Automotive Engineers* – 2017 – V. 25. – № 3. – P. 380–388.
45. Lee S., Kim Y., Kang K. The role of exergy in energy and the environment. – Cham: Springer Verlag, 2018. – 906 p.
46. Lee S., Kim T.Y. Feasibility study of using wood pyrolysis oil-ethanol blended fuel with diesel pilot injection in a diesel engine // *Fuel*. – 2015. – V. 162. – P. 65–73.
47. Лиханов В.А., Козлов А.Н., Арасланов М.И. Влияние применения этанола и рапсового масла на показатели процесса сгорания и сажеосодержания в цилиндре тракторного дизеля 2Ч 10,5/12,0 в зависимости от изменения нагрузки // *Вестник чувашской государственной сельскохозяйственной академии*. – 2018. – Т. 4. – № 1. – С. 59–64.
48. BTG Biomass Technology Group 2021. URL: <https://www.btgworld.com/> (дата обращения 11.11.2021).
49. К вопросу расширения использования газа в качестве моторного топлива / С.В. Дунаев, А.В. Исаев, А.В. Лесин, В.П. Попов, К.И. Федин // *Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний*. – 2017. – № 1. – С. 10–14.
50. Чирков В.Г. Мини-ТЭС на пиролизном топливе // *Теплоэнергетика*. – 2007. – № 8. – С. 35–39.
51. Результаты экспериментального исследования процесса газификации жидкого продукта быстрого пиролиза древесных отходов лесной промышленности / Д.В. Тунцев, Р.Г. Хисматов, А.М. Касимов, И.С. Романчева, А.С. Савельев // *Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика*. – Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2016. – С. 352–356.
52. Pyrolysis-catalytic upgrading of bio-oil and pyrolysis-catalytic steam reforming of biogas: a review / M. Abou Rjeily, C. Gennequin, H. Pron, E. Abi-Aad, J.H. Randrianalisoa // *Environmental Chemistry Letters*. – 2021. – V. 19. – № 4. – P. 2825–2872.
53. Towards practical application of gasification: a critical review from syngas and biochar perspectives / S. You, Y.S. Ok, D.C.W. Tsang, E.E. Kwon, C.H. Wang // *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. – 2018. – V. 48. – № 22–24. – P. 1165–1213.
54. Baba Y., Pandiyaswargo A.H., Onoda H. An analysis of the current status of woody biomass gasification power generation in Japan // *Energies*. – 2020. – V. 13. – № 18. – P. 4903.1–13.
55. Syngas production, clean-up and wastewater management in a demo-scale fixed-bed updraft biomass gasification unit / G. Cali, P. Deiana, C. Bassano, S. Meloni, E. Maggio, M. Mascia, A. Pettinau // *Energies*. – 2020. – V. 13. – № 10. – P. 2594.1–15.
56. Siemens 2004–2021. URL: <https://new.siemens.com/ru/ru.html> (дата обращения 11.11.2021).
57. Biomass gasification cogeneration – a review of state of the art technology and near future perspectives / J. Ahrenfeldt, T.P. Thomsen, U. Henriksen, L.R. Clausen // *Applied Thermal Engineering*. – 2013. – V. 50. – № 2. – P. 1407–1417.
58. Касимов А.М. Совершенствование технологии и оборудования термохимической переработки древесных отходов в высокотемпературный генераторный газ: автореф. дис. ... канд. тех. наук. – Казань, 2017. – 16 с.
59. Файзрахманова Г.М. Модификация битумных вяжущих жидкими продуктами быстрого абляционного пиролиза древесины: автореф. дис. ... канд. тех. наук. – Казань, 2015. – 16 с.
60. Разработка технологии получения органического вяжущего для дорожного строительства с использованием продуктов термической переработки биомассы дерева / Г.М. Файзрахманова, С.А. Забелкин, А.Н. Грачев, В.Н. Башкиров // *Вестник Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема*. – 2015. – Т. 19. – № 2. – С. 79–85.
61. Киселев В.П. Комплексное использование отходов химической переработки биомассы дерева и других вторичных ресурсов в производстве композиционных вяжущих и материалов, полученных на их основе: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Красноярск, 2006. – 43 с.
62. Modification of bitumen binder by the liquid products of wood fast pyrolysis / S. Zabelkin, G. Bikbulatova, A. Grachev, V. Bashkirov, S. Burenkov, A. Makarov // *Road Materials and Pavement Design*. – 2019. – V. 20. – № 5. – P. 1182–1200.
63. Preparation process of bio-oil and bio-asphalt, their performance, and the application of bio-asphalt: A comprehensive review / H. Wang, Z. Ma, X. Chen, M.R. Mohd Hasan // *Journal of Traffic and Transportation Engineering*. – 2020. – V. 7. – № 2. – P. 137–151.
64. Bio-based wood preservatives: their efficiency, leaching and ecotoxicity compared to a commercial wood preservative / A. Barbero-López, J. Akkanen, R. Lappalainen, S. Peräniemi, A. Naapala // *Science of the Total Environment*. – 2021. – V. 753. – P. 142013.1–7.
65. Mazela B. Fungicidal value of wood tar from pyrolysis of treated wood // *Waste Management*. – 2007. – V. 27. – № 4. – P. 461–465.
66. Preliminary study on fungicide and sorption effects of fast pyrolysis liquids used as wood preservative / D. Meier, B. Andersons, I. Irbe, J. Chirkova, O. Faix // *Progress in Thermochemical Biomass Conversion*. – Hoboken: Wiley Blackwell, 2008. – P. 1550–1563.
67. Evaluation of the antifungal effects of bio-oil prepared with lignocellulosic biomass using fast pyrolysis technology / K.H. Kim, H.S. Jeong, J.Y. Kim, G.S. Han, I.G. Choi, J.W. Choi // *Chemosphere*. – 2012. – V. 89. – № 6. – P. 688–693.
68. Chemical composition and efficiency of bio-oil obtained from giant cane as a wood preservative / A. Temiz, S. Akbas, D. Panov, N. Terziev, M.H. Alma, S. Parlak, G. Kose // *BioResources*. – 2013. – V. 8. – № 2. – P. 2084–2098.
69. Hassan E.B., El-Giar E.M., Steele P. Evaluation of the antioxidant activities of different bio-oils and their phenolic distilled fractions for wood preservation // *International Biodeterioration and Biodegradation*. – 2016. – V. 110. – P. 121–128.
70. Нефтяная антисептическая жидкость для пропитки древесины: пат. Рос. Федерация, № 2455154С1, заявл. 29.10.2010; опубл. 07.10.2012. Бюл. № 19. – 6 с.
71. Ma Y., Gong X., Wang C. Research progress in wood adhesives // *Chemistry and Industry of Forest Products*. – 2020. – V. 40. – № 2. – P. 1–15.
72. Определение влияния степени замещения фенола жидкими продуктами пиролиза древесины на прочность фенолоформальдегидной смолы / А.Р. Валева, А.Н. Грачев, С.А. Забелкин, В.Н. Башкиров, А.И. Сабирзянова // *Деревообрабатывающая промышленность*. – 2020. – № 1. – С. 88–95.
73. Модификация фенолоформальдегидных смол жидкими продуктами пиролиза древесины и изучение их клеящей способности / С.А. Забелкин, А.Н. Грачев, В.Н. Башкиров, Е.Н. Черезова // *Вестник Казанского технологического университета*. – 2010. – Т. 8. – С. 440–444.
74. Модификация фенолоформальдегидных смол жидкими продуктами пиролиза древесины / С.А. Забелкин, А.Н. Грачев, В.Н. Башкиров, Е.Н. Черезова // *Вестник Казанского технологического университета*. – 2014. – Т. 17. – № 10. – С. 97–100.
75. Mao A., Shi S.Q., Steele P. Flakeboard bonded with polymeric diphenylmethane diisocyanate/ bio-oil adhesive systems // *Forest Products Journal*. – 2011. – V. 61. – № 3. – P. 240–245.
76. Life cycle assessment of plywood manufacturing process in China / L. Jia, J. Chu, L. Ma, X. Qi, A. Kumar // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. – 2019. – V. 16. – № 11. – P. 2037.1–10.
77. The preparation and characterization of pyrolysis bio-oil-resorcinol-aldehyde resin cold-set adhesives for wood construction / X. Ren, H. Cai, H. Du, J. Chang // *Polymers*. – 2017. – V. 9. – № 6. – P. 232.1–11.
78. Ayrilmis N., Özbay G. Propriedades tecnológicas de compensado de madeira colada com resina de resol fenol-formaldeído sintetizada com bio-óleo // *Cerne*. – 2017. – V. 23. – № 4. – P. 493–500.

79. Evaluation of phenol-formaldehyde resins modified and blended with pyrolysis bio-oil for plywood / A. Mao, W. Xu, E. Xi, Q. Li, H. Wan // *Forest Products Journal*. – 2018. – V. 68. – № 2. – P. 113–119.
80. The use of environmentally friendly bio-oil in the production of phenol formaldehyde (PF) resin / N.N. Omar, I.S. Mustafa, N. Abdullah, R. Hashim // *Pertanika Journal of Science and Technology*. – 2018. – V. 26. – № 1. – P. 177–192.
81. Production of novolac resin after partial substitution of phenol from bio-oil / S. Adhikari, M. Auad, B. Via, A. Shah, V. Patil // *Transactions of the ASABE*. – 2020. – V. 63. – № 4. – P. 901–912.
82. Dong F., Wang M., Wang Z. Bio-oil as substitute of phenol for synthesis of resol-type phenolic resin as wood adhesive // *International Journal of Chemical Reactor Engineering*. – 2018. – V. 16. – № 3. – P. 20170107.1–8.
83. Preparation and characterization of epoxy resin cross-linked with high wood pyrolysis bio-oil substitution by acetone pretreatment / Y. Liu, B.K. Via, Y. Pan, Q. Cheng, H. Guo, M.L. Auad, S. Taylor // *Polymers*. – 2017. – V. 9. – № 3. – P. 106.1–14.
84. Резольная феноло-формальдегидная смола с добавлением нейтрализованных жидких продуктов быстрого пиролиза древесины березы / С.А. Забелкин, А.Н. Грачев, Г.М. Бикбулатова, А.Е. Яковлева, А.А. Макаров, В.Н. Башкиров // *Клеи. Герметики. Технологии*. – 2017. – № 10. – С. 19–23.
85. A techno-economic assessment of renewable diesel and gasoline production from aspen hardwood / M. Patel, A.O. Oyedun, A. Kumar, R. Gupta // *Waste and Biomass Valorization*. – 2019. – V. 10. – № 10. – P. 2745–2760.
86. Pisupati S. V., Bhalla S. Influence of calcium content of biomass-based materials on simultaneous NO_x and SO₂ reduction // *Environmental Science and Technology*. – 2008. – V. 42. – № 7. – P. 2509–2514.
87. Pisupati S. V., Bhalla S. Numerical modeling of NO_x reduction using pyrolysis products from biomass-based materials // *Biomass and Bioenergy*. – 2008. – V. 32. – № 2. – P. 146–154.
88. Simultaneous SO₂/NO/N₂O control in coal fired systems using BioLime™ / G.A. Simons, W.J. Place, K.H. Oehr, J. Zhou, S.V. Pisupati, M.A. Wojtowicz, R. Bassilakis // *Proceedings of the International Technical Conference on Coal Utilization & Fuel Systems*. – Florida: Coal & Slurry Technology Assoc., 1997. – P. 739–749.
89. Vélez D.C.P., Magalhães W.L.E., Capobianco G. Carbon fiber from fast pyrolysis bio-oil // *Science and Technology of Materials*. – 2018. – V. 30. – P. 16–22.
90. Transforming biomass pyrolysis technologies to produce liquid smoke flavouring / X. Xin, K. Dell, I.A. Udugama, B.R. Young, S. Baroutian // *Journal of Cleaner Production*. – 2021. – V. 294. – P. 125368.1–37.
91. Онофрейчук А.О. Фракционная перегонка пиролизного дистиллята // *Булатовские чтения*. – 2018. – № 5. – С. 238–240.
92. Jacobson K., Maheria K.C., Kumar Dalai A. Bio-oil valorization: a review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2013. – V. 23. – P. 91–106.
93. ГОСТ Р 56861-2016. Система управления жизненным циклом. Разработка концепции изделия и технологий. Общие положения. – М.: Стандартинформ, 2019. – 10 с.

Поступила 01.12.2021 г.

Информация об авторах

Слюсарский К.В., кандидат физико-математических наук, доцент НОЦ И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Ларионов К.Б., кандидат технических наук, заведующий лабораторией Кузбасского государственного технического университета им. Т.Ф. Горбачева.

Ивашкина Е.Н., доктор технических наук, профессор отделения химической инженерии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

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

Губин В.Е., кандидат технических наук, доцент НОЦ И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 620.952

TECHNOLOGICAL SOLUTIONS FOR UTILIZATION OF LIQUID PRODUCTS OF SLOW WOOD BIOMASS PYROLYSIS

Konstantin V. Slyusarsky¹,
slyuskonst@gmail.com

Kirill B. Larionov²,
laryk070@gmail.com

Elena N. Ivashkina¹,
ivashkinaen@tpu.ru

Alexander S. Zavorin¹,
zavorin@tpu.ru

Vladimir E. Gubin¹,
gubin@tpu.ru

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

² T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University,
28, Vesennaya street, Kemerovo, 650000, Russia.

The relevance of the article is caused by the growing interest in biomass pyrolysis technologies to reduce the carbon footprint of its processing. To increase the economic and energy efficiency of these technological solutions, it is necessary to maximize the full use of all material and energy flows, one of which is the formation of liquid pyrolysis products (the so-called pyrolysis liquid or bio-oil).

The main aim of the research is determination of technological solutions for the disposal of liquid pyrolysis products of woody biomass with the determination of the level of technical readiness.

Methods: analytical literature review of literature data using materials from the RSCI, Scopus and Web of Science databases; the level of technical readiness was assessed according to the TRL scale.

Results. The main methods of utilization of the pyrolysis liquid obtained as a result of slow pyrolysis of woody biomass were identified, classified and described. A review of technological solutions and research works in the field of disposal of liquid products of slow pyrolysis was made. The most common technologies for converting a pyrolysis liquid to obtain thermal and/or electrical energy were direct combustion in burners of boilers and heat generators, in the combustion chamber of gas turbine engines, gasification to produce synthesis gas, and the use in piston engines as fuel. Technologies for obtaining chemical products and substances were divided into simple (obtaining components for road construction, wood preservative, phenol-formaldehyde and saponified resins, etc.) and complex, requiring complex multistage processing. It was established that the energy application of this product has the highest level of technical readiness, while the chemical application technologies have the highest economic efficiency, despite the relatively low level of readiness. Commercial solutions for the disposal of pyrolysis fluid are available in the field of combustion in burners and diesel generators.

Key words:

Pyrolysis, biomass, incineration, combustion, bio-oil, pyrolysis fluid, bio-char.

The study was realized with financial support according to additional contract no. 075-03-2021-138/3 on subsidy from federal budget for financial support of governmental task realization for governmental services (internal number 075-GZ/X4141/687/3).

REFERENCES

- Palander T., Haavikko H., Kortelainen E., Kärhä K., Borz S.A. Improving environmental and energy efficiency in wood transportation for a carbon-neutral forest industry. *Forests*, 2020, vol. 11, no. 11, 1194. pp. 1-17.
- Solarte-Toro J.C., González-Aguirre J.A., Poveda Giraldo J.A., Cardona Alzate C.A. Thermochemical processing of woody biomass: a review focused on energy-driven applications and catalytic upgrading. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, vol. 136, pp. 110376.1–16.
- Barmore T. Biomass pyrolysis: past, present, and future. *Environment, Development and Sustainability*, 2020, vol. 22, no. 1, pp. 17–32.
- Kazimierski P., Hercel P., Januszewicz K., Kardaś D. Pre-treatment of furniture waste for smokeless charcoal production. *Materials*, 2020, vol. 13, no. 14, 3188. pp. 1–11.
- Nasyrov I.A., Mavrin G. V., Fazullin D.D., Shaikhiev I.G. Investigation of the influence of ultrasonic treatment on the sorption properties of the pyrolysis product of wood waste. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1347, no. 1, pp. 012080.1–5.
- Xu Y., Luo G., Zhang Q., Li Z., Zhang S., Cui W. Cost-effective sulfurized sorbents derived from one-step pyrolysis of wood and scrap tire for elemental mercury removal from flue gas. *Fuel*, 2021, vol. 285, pp. 119221.1–8.
- Laghari M., Müller-Stöver D.S., Puig-Arnabat M., Thomsen T.P., Henriksen U.B. Evaluation of biochar post-process treatments to produce soil enhancers and phosphorus fertilizers at a single plant. *Waste and Biomass Valorization*, 2021, vol. 12, no. 10, pp. 5517–5532.
- Deng L., Torres-Rojas D., Burford M., Whitlow T.H., Lehmann J., Fisher E.M. Fuel sensitivity of biomass cookstove performance. *Applied Energy*, 2018, vol. 215, pp. 13–20.
- Vicente Leme M.M., Venturini O.J., Silva Lora E.E., de Almeida W., Rocha M.H., Andrade da Cunha Dias T., del Olmo O.A. Life cycle assessment of charcoal production and electricity generation from eucalyptus in an industrial batch kiln. *Renewable Energy*, 2021, vol. 180, pp. 232–244.

10. Richard T.L. Challenges in scaling up biofuels infrastructure. *Science*, 2010, vol. 329, no. 5993, pp. 793–796.
11. Oasmaa A., van de Beld B., Saari P., Elliott D.C., Solantausta Y. Norms, standards, and legislation for fast pyrolysis bio-oils from lignocellulosic biomass. *Energy & Fuels*, 2015, vol. 29, no. 4, pp. 2471–2484.
12. Efika C.E., Onwudili J.A., Williams P.T. Influence of heating rates on the products of high-temperature pyrolysis of waste wood pellets and biomass model compounds. *Waste Management*, 2018, vol. 76, pp. 497–506.
13. Mohanty P., Nanda S., Pant K.K., Naik S., Kozinski J.A., Dalai A.K. Evaluation of the physiochemical development of biochars obtained from pyrolysis of wheat straw, timothy grass and pinewood: Effects of heating rate. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2013, vol. 104, pp. 485–493.
14. Nanda S., Azargohar R., Kozinski J.A., Dalai A.K. Characteristic studies on the pyrolysis products from hydrolyzed canadian lignocellulosic feedstocks. *Bioenergy Research*, 2014, vol. 7, no. 1, pp. 174–191.
15. Wang G., Fan B., Chen H., Li Y. Understanding the pyrolysis behavior of agriculture, forest and aquatic biomass: Products distribution and characterization. *Journal of the Energy Institute*, 2020, vol. 93, no. 5, pp. 1892–1900.
16. Bashkirov V.N., Bikbulatova G.M., Gataullina A.A. Perspektivy promyshlennogo ispolzovaniya zhidkikh productov bystrogo piroliza rastitelnoy biomassy [Prospects for industrial use of liquid products of rapid pyrolysis of plant biomass]. *Evraziyskoe nauchnoe obiedinenie*, 2018, vol. 46, no. 12–3, pp. 207–210.
17. Fayzrakhmanova G.M., Zabelkin S.A., Grachev A.N., Bashkirov V.N., Makarov A.A. Use of wood pyrolysis liquid for obtaining a binder component for road construction. *Bulletin of the Technological University*, 2013, vol. 16, no. 8, pp. 312–314. In Rus.
18. Lindfors C., Oasmaa A., Välimäki A., Ohra-aho T., Punkkinen H., Bajamundi C., Onarheim K. Standard liquid fuel for industrial boilers from used wood. *Biomass and Bioenergy*, 2019, vol. 127, pp. 105265.1–8.
19. Albert-Green S., Thomson M.J. The effects of nozzle design on the combustion of wood-derived fast pyrolysis oil. *Biomass and Bioenergy*, 2018, vol. 117, pp. 102–114.
20. Krumdieck S.P., Daily J.W. Evaluating the feasibility of biomass pyrolysis oil for spray combustion applications. *Combustion Science and Technology*, 1998, vol. 134, no. 1–6, pp. 351–365.
21. Hou S.S., Huang W.C., Rizal F.M., Lin T.H. Co-firing of fast pyrolysis bio-oil and heavy fuel oil in a 300-kWth furnace, Switzerland. *Applied Sciences*, 2016, vol. 6, no. 11, pp. 326.1–11.
22. Zabelkin S.A., Grachev A.N., Bashkirov V.N., Mullahukhametov F.I. Energy application of pyrolysis liquid. *Bulletin of the Technological University*, 2010, no. 10, pp. 369–374. In Rus.
23. Loganathan K., Manoharan C. Evaluation of performance and emission features of jatropa biodiesel-turpentine blend as green fuel. *Thermal Science*, 2017, vol. 21, no. 1, pp. 615–625.
24. Nyashina G.S., Vershinina K.Y., Strizhak P.A. Impact of micro-explosive atomization of fuel droplets on relative performance indicators of their combustion. *Fuel Processing Technology*, 2020, vol. 201, no. October, pp. 106334.1–14.
25. Tuntsev D.V., Safin R.G., Kasimov A.M., Khismatov R.G., Sattarova Z.G. Technological scheme of gasification of a liquid product of contact pyrolysis. *Bulletin of the Technological University*, 2013, vol. 16, no. 19, pp. 139–141. In Rus.
26. *Fortum*. 2021. Available at: <https://www.fortum.ru> (assessed 11 November 2021).
27. Sippula O., Huttunen K., Hokkinen J., Kärki S., Suhonen H., Kajoilina T., Kortelainen M., Karhunen T., Jalava P., Uski O., Yli-Pirilä P., Hirvonen M.R., Jokiniemi J. Emissions from a fast-pyrolysis bio-oil fired boiler: comparison of health-related characteristics of emissions from bio-oil, fossil oil and wood. *Environmental Pollution*, 2019, vol. 248, pp. 888–897.
28. *Ensyn Inc*. 2021. Available at: <http://www.ensyn.org/en/home> (accessed 11 November 2021).
29. *Valmet*. 2021. Available at: <https://www.valmet.com/ru/> (accessed 11 November 2021).
30. *Stork Inc*. 2021. Available at: <https://www.stork.com/en> (accessed 11 November 2021).
31. Vershinina K.Y., Shlegel N.E., Strizhak P.A. Impact of environmentally attractive additives on the ignition delay times of slurry fuels: experimental study. *Fuel*, 2019, vol. 238, pp. 275–288.
32. Zabelkin S.A., Tuntsev D.V., Grachev A.N., Bashkirov V.N. Energeticheskoe ispolzovanie zhidkikh produktov bystrogo piroliza drevesiny [Energy application of liquid products of fast pyrolysis of wood]. *Bioenergetika i biotekhnologii*, 2010, vol. 4, pp. 79–84.
33. Lupandin V., Thamburaj R., Nikolayev A. Test results of the OGT2500 gas turbine engine running on alternative fuels: BioOil, Ethanol, Biodiesel and Crude Oil. *ASME Turbo Expo 2005: Power for Land, Sea, and Air*. Reno, Nevada, International Gas Turbine Institute Publ., 2005. Vol. 1, pp. 421–426.
34. *Opra Turbines Inc*. 2021. Available at: <https://www.opraturbines.com/ru/> (accessed 11 November 2021).
35. Van Beurden E., Pozarlik A., Putra B., Brem G., Bouten T., Withag J., Axelsson L.U. Improved CFD predictions of pyrolysis oil combustion using advanced spray measurements and numerical models. *ASME Turbo Expo 2021: Turbomachinery Technical Conference and Exposition*. Phoenix, International Gas Turbine Institute Publ., 2021. Vol. 6, pp. 1–12.
36. Bouten T., Withag J., Axelsson L., Putra B., Pozarlik A., Brem G., Benesch C., Brunner T., Obernberger I. Experimental and numerical investigation of the application of fast pyrolysis oil in a gas turbine combustor. *European Biomass Conference and Exhibition Proceedings*. Twente, ETA-Florence Renewable Energies, 2020. pp. 957–965.
37. Seljak T., Širok B., Katrašnik T. Advanced fuels for gas turbines: fuel system corrosion, hot path deposit formation and emissions. *Energy Conversion and Management*, 2016, vol. 125, pp. 40–50.
38. Chiaromonte D., Oasmaa A., Solantausta Y. Power generation using fast pyrolysis liquids from biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2007, vol. 11, no. 6, pp. 1056–1086.
39. *VTT Technical Research Center of Finland Ltd*. 2021. Available at: <https://www.vttresearch.com/en/html> (accessed 11 November 2021).
40. *Wärtsilä Corp*. 2021. Available at: <https://www.wartsila.com/html> (accessed 11 November 2021).
41. Solantausta Y., Nylund N.O., Gust S. Use of pyrolysis oil in a test diesel engine to study the feasibility of a diesel power plant concept. *Biomass and Bioenergy*, 1994, vol. 7, no. 1–6, pp. 297–306.
42. Yang S.L., Wu M.S. The droplet combustion and thermal characteristics of pinewood bio-oil from slow pyrolysis. *Energy*, 2017, vol. 141, pp. 2377–2386.
43. Kim T.Y., Lee S., Kang K. Performance and emission characteristics of a high-compression-ratio diesel engine fueled with wood pyrolysis oil-butanol blended fuels. *Energy*, 2015, vol. 93, pp. 2241–2250.
44. Lee S., Kim T.Y., Kang K., Park I., Kim M., Lim J. Performance and emission characteristics of an IDI diesel generator fueled with wood pyrolysis oil-butanol blended fuels. *Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers*, 2017, vol. 25, no. 3, pp. 380–388.
45. Lee S., Kim Y., Kang K. Combustion and emission characteristics of wood pyrolysis oil and N-Butanol-Blended fuel in a diesel engine. *The Role of Exergy in Energy and the Environment*. London, Springer International Publ., 2018. pp. 171–187.
46. Lee S., Kim T.Y. Feasibility study of using wood pyrolysis oil-ethanol blended fuel with diesel pilot injection in a diesel engine. *Fuel*, 2015, vol. 162, pp. 65–73.
47. Likhonov V.A., Kozlov A.N., Arslanov M.I. Effect of ethanol and rape oil application on the indicators of the combustion process and sages containment in the tractor diesel cylinder 2Ch 10.5/12.0 depending on load change. *Vestnik chuvashskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii*, 2018, vol. 4, no. 1, pp. 59–64. In Rus.
48. *BTG Biomass Technology Group*. 2021. Available at: <https://www.btgworld.com/html> (accessed 11 November 2021).
49. Dunaev S.V., Isaev A.V., Lesin A.V., Popov V.P., Fedin K.I. Problems of the increasing use of natural gas as a motor fuel. *World of oil products. Bulletin of oil companies*, 2017, no. 1, pp. 10–14. In Rus.
50. Chirkov V.G. Mini thermal power stations operating on pyrolyzed fuel. *Thermal Engineering*, 2007, no. 8, pp. 35–39. In Rus.
51. Tuntsev D., Khismatov R., Kasimov A., Romancheva I., Savelev A. Rezultaty eksperimentalnogo issledovaniya protsessa gazifikatsii

- zhidkogo produkta bystrogo piroliza drevesnykh otkhodov lesnoy promyshlennosti [Results of experimental studies of the gasification process liquid products fast pyrolysis of waste wood for the wood industry]. *Aktualnye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika* [Actual directions of scientific researches of the XXI century: theory and practice]. Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 2016. Vol. 2, no. 5, pp. 352–356.
52. Abou Rjeily M., Gennequin C., Pron H., Abi-Aad E., Randrianalisoa J.H. Pyrolysis-catalytic upgrading of bio-oil and pyrolysis-catalytic steam reforming of biogas: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 2021, vol. 19, no. 4, pp. 2825–2872.
 53. You S., Ok Y.S., Tsang D.C.W., Kwon E.E., Wang C.H. Towards practical application of gasification: a critical review from syngas and biochar perspectives. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2018, vol. 48, no. 22–24, pp. 1165–1213.
 54. Baba Y., Pandiyawargo A.H., Onoda H. An analysis of the current status of woody biomass gasification power generation in Japan. *Energies*, 2020, vol. 13, no. 18, pp. 4903.1–13.
 55. Cali G., Deiana P., Bassano C., Meloni S., Maggio E., Mascia M., Pettinau A. Syngas production, clean-up and wastewater management in a demo-scale fixed-bed updraft biomass gasification unit. *Energies*, 2020, vol. 13, no. 10, pp. 2594.1–15.
 56. Siemens AG. 2004–2021. Available at: <https://new.siemens.com/ru/ru.html> (accessed 11 November 2021).
 57. Ahrenfeldt J., Thomsen T.P., Henriksen U., Clausen L.R. Biomass gasification cogeneration – A review of state of the art technology and near future perspectives. *Applied Thermal Engineering*, 2013, vol. 50, no. 2, pp. 1407–1417.
 58. Kasimov A.M. *Sovershenstvovanie tekhnologii i oborudovaniya termokhimicheskoy pererabotki drevesnykh otkhodov v vysokokalorinyy generatorynyy gaz*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Improvement of technology and equipment for thermochemical processing of wood waste into high-calorie generator gas. Cand. Diss. Abstract]. Kazan, 2017. 16 p.
 59. Fayzrakhmanova G.M. *Modifikatsiya bitumnykh vyazhushchikh zhidkimi produktami bystrogo ablyatsionnogo piroliza drevesiny*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Modification of bituminous binders with liquid products of rapid ablative pyrolysis of wood. Cand. Diss. Abstract]. Kazan, 2015. 16 p.
 60. Fayzrakhmanova G.M., Zabelkin S.A., Grachev A.N., Bashkirov V.N. Development of technology of production of organic binder for road construction using products of thermal processing of wood biomass. *Bulletin of the Amur State University*, 2015, vol. 19, no. 2, pp. 79–85. In Rus.
 61. Kiselev V.P. *Kompleksnoe ispolzovanie otkhodov khimicheskoy pererabotki biomassy drevya i drugikh vtorichnykh resursov v proizvodstve kompozitsionnykh vyazhushchikh i materialov, poluchennykh na ikh osnove*. Avtoreferat Dis. Dokt. nauk [Complex use of wastes from chemical processing of wood biomass and other secondary resources in the production of composite binders and materials obtained on their basis. Dr. Diss. Abstract]. Krasnoyarsk, 2006. 43 p.
 62. Zabelkin S., Bikbulatova G., Grachev A., Bashkirov V., Burenkov S., Makarov A. Modification of bitumen binder by the liquid products of wood fast pyrolysis. *Road Mater. Pavement Des.*, 2019, vol. 20, no. 5, pp. 1182–1200.
 63. Wang H., Ma Z., Chen X., Mohd Hasan M.R. Preparation process of bio-oil and bio-asphalt, their performance, and the application of bio-asphalt: a comprehensive review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. Periodical Offices of Changan University, 2020, vol. 7, no. 2, pp. 137–151.
 64. Barbero-López A., Akkanen J., Lappalainen R., Peräniemi S., Haapala A. Bio-based wood preservatives: Their efficiency, leaching and ecotoxicity compared to a commercial wood preservative. *Sci. Total Environ.*, 2021, vol. 753, pp. 142013.1–7.
 65. Mazela B. Fungicidal value of wood tar from pyrolysis of treated wood. *Waste Manag.*, 2007, vol. 27, no. 4, pp. 461–465.
 66. Meier D., Andersons B., Irbe I., Chirkova J., Faix O. Preliminary study on fungicide and sorption effects of fast pyrolysis liquids used as wood preservative. *Prog. Thermochem. Biomass Convers.*, 2001, pp. 1550–1563.
 67. Kim K.H., Jeong H.S., Kim J.-Y., Han G.S., Choi I.-G., Choi J.W. Evaluation of the antifungal effects of bio-oil prepared with lignocellulosic biomass using fast pyrolysis technology. *Chemosphere*, 2012, vol. 89, no. 6, pp. 688–693.
 68. Temiz A., Akbas S., Panov D., Terziev N., Alma M.H., Parlak S., Kose G. Chemical composition and efficiency of bio-oil obtained from giant cane (*Arundo donax L.*) as a wood preservative. *BioResources*, 2013, vol. 8, no. 2, pp. 2084–2098.
 69. Hassan E.B., El-Giar E.M., Steele P. Evaluation of the antioxidant activities of different bio-oils and their phenolic distilled fractions for wood preservation. *Int. Biodeterior. Biodegrad.*, vol. 110, pp. 121–128.
 70. Ehrbe S.V. *Neftyanyaya antisepticheskaya zhidkost dlya propitki drevesiny* [Petroleum antiseptic liquid for impregnation of timber]. Patent RF, no. 2455154C1, 2012.
 71. Ma Y., Gong X., Wang C. Research Progress in Wood Adhesives. *Chemistry and Industry of Forest Products*, 2020, vol. 40, no. 2, pp. 1–15.
 72. Valeeva A.R., Grachev A.N., Zabelkin S.A., Bashkirov V.N., Sabirzyanova A.I. The strength of the modified phenol formaldehyde resin, depending on the degree of additional of wood pyrolysis liquid. *Derevoobrobitivaushaya promishlennost*, 2020, no. 1, pp. 88–95. In Rus.
 73. Zabelkin S.A., Grachev A.N., Bashkirov V.N., Cherezova E.N. Modification of phenol-formaldehyde resins with liquid products of wood pyrolysis and study of their gluing ability. *Bulletin of the Technological University*, 2010, vol. 8, pp. 440–444. In Rus.
 74. Zabelkin S.A., Grachev A.N., Bashkirov V.N., Cherezova E.N. Modification of phenol-formaldehyde resins with liquid products of wood pyrolysis. *Bulletin of the Technological University*, 2014, vol. 17, no. 10, pp. 97–100. In Rus.
 75. Mao A., Shi S.Q., Steele P. Flakeboard bonded with polymeric diphenylmethane diisocyanate/bio-oil adhesive systems. *Forest Products Journal*, 2011, vol. 61, no. 3, pp. 240–245.
 76. Jia L., Chu J., Ma L., Qi X., Kumar A. Life cycle assessment of plywood manufacturing process in China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, vol. 16, no. 11, pp. 2037.1–10.
 77. Ren X., Cai H., Du H., Chang J. The preparation and characterization of pyrolysis bio-oil-resorcinol-aldehyde resin cold-set adhesives for wood construction. *Polymers*, 2017, vol. 9, no. 6, pp. 232.1–11.
 78. Ayrimlis N., Özbay G. Technological properties of plywood bonded with phenol-formaldehyde resol resin synthesized with bio-oil. *Cerne*, 2017, vol. 23, no. 4, pp. 493–500.
 79. Mao A., Xu W., Xi E., Li Q., Wan H. Evaluation of phenol-formaldehyde resins modified and blended with pyrolysis bio-oil for plywood. *Forest Products Journal*, 2018, vol. 68, no. 2, pp. 113–119.
 80. Omar N.N., Mustafa I.S., Abdullah N., Hashim R. The use of environmentally friendly bio-oil in the production of phenol formaldehyde (PF) resin. *Pertanika Journal of Science and Technology*, 2018, vol. 26, no. 1, pp. 177–192.
 81. Adhikari S., Auad M., Via B., Shah A., Patil V. Production of novolac resin after partial substitution of phenol from bio-oil. *Transactions of the ASABE*, 2020, vol. 63, no. 4, pp. 901–912.
 82. Dong F., Wang M., Wang Z. Bio-oil as substitute of phenol for synthesis of resol-type phenolic resin as wood adhesive. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 2018, vol. 16, no. 3, pp. 20170107.1–8.
 83. Liu Y., Via B.K., Pan Y., Cheng Q., Guo H., Auad M.L., Taylor S. Preparation and characterization of epoxy resin cross-linked with high wood pyrolysis bio-oil substitution by acetone pretreatment. *Polymers*, 2017, vol. 9, no. 3, pp. 106.1–14.
 84. Zabelkin S.A., Grachev A.N., Bikbulatova G.M., Yakovleva A.E., Makarov A.A., Bashkirov V.N. Resole phenol-formaldehyde resin with addition of neutralized liquid products of birch fast pyrolysis. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2017, no. 10, pp. 19–23. In Rus.
 85. Patel M., Oyedun A.O., Kumar A., Gupta R. A techno-economic assessment of renewable diesel and gasoline production from aspen hardwood. *Waste and Biomass Valorization*, 2019, vol. 10, no. 10, pp. 2745–2760.
 86. Pisupati S.V., Bhalla S. Influence of calcium content of biomass-based materials on simultaneous NO_x and SO₂ reduction. *Environmental Science and Technology*, 2008, vol. 42, no. 7, pp. 2509–2514.

87. Pisupati S.V., Bhalla S. Numerical modeling of NOx reduction using pyrolysis products from biomass-based materials. *Biomass and Bioenergy*, 2008, vol. 32, no. 2, pp. 146–154.
88. Simons G.A., Place W.J., Oehr K.H., Zhou J., Pisupati S.V., Wojtowicz M.A., Bassilakis R. Simultaneous SO₂/NO/N₂O control in coal fired systems using BioLime™. Proceedings of the International Technical Conference on Coal Utilization & Fuel Systems. *Coal & Slurry Technology Assoc.*, 1997, no. 3, pp. 739–749.
89. Vélez D.C.P., Magalhães W.L.E., Capobianco G. Carbon fiber from fast pyrolysis bio-oil. *Science and Technology of Materials*, 2018, vol. 30, pp. 16–22.
90. Xin X., Dell K., Udugama I.A., Young B.R., Baroutian S. Transforming biomass pyrolysis technologies to produce liquid smoke food flavouring. *Journal of Cleaner Production*, 2021, vol. 294, pp. 125368.1–37.
91. Onofreychuk A.O. Fractional distillation of pyrolysis distillate. *Bulatovskie chteniya*, 2018, no. 5, pp. 238–240. In Rus.
92. Jacobson K., Maheria K.C., Kumar Dalai A. Bio-oil valorization: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, vol. 23, pp. 91–106.
93. GOST R 56861-2016. *Sistema upravleniya zhiznennym tsiklom. Razrabotka kontseptsii izdeliya i tekhnologiy. Obshchie polozheniya* [State Standard 56861-2016. Life cycle management system. Product conception and technologies development. General provisions]. Moscow, StandardInform Publ., 2019. 10 p.

Received: 1 December 2021.

Information about the authors

Konstantin V. Slyusarsky, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Kirill B. Larionov, Cand. Sc., head of the laboratory, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University.

Elena N. Ivashkina, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Alexander S. Zavorin, Dr. Sc., head of the department, National Research Tomsk Polytechnic University.

Vladimir E. Gubin, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 551.510.721:502 (574.41)

СЕЗОННАЯ ДИНАМИКА СОДЕРЖАНИЯ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦАХ АЭРОЗОЛЕЙ ВОЗДУХА МАЛЫХ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ, РАСПОЛОЖЕННЫХ В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ «ВОСТОЧНОГО» СЛЕДА РАДИОАКТИВНЫХ ВЫПАДЕНИЙ СЕМИПАЛАТИНСКОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ПОЛИГОНА

Темиржанова Арай Еркековна¹,
temirzhanova.aray@mail.ru

Язиков Егор Григорьевич²,
yazikoveg@tpu.ru

Дюсембаева Мадина Талгатовна¹,
koigeldinova@nnc.kz

Шакенов Ербол Зейнелгазинович¹,
shakenov@nnc.kz

Мухамедияров Нурлан Жумагазыевич¹,
mukhamediyarov@nnc.kz

Ташекова Ажар Жумановна¹,
Esenzholova@nnc.kz

Есильканов Гани Мухтарович¹,
yessilkanov@nnc.kz

Колбин Владимир Валерьевич¹,
kolbin@nnc.kz

Умаров Мурат Алпыспаевич¹,
Umarov@nnc.kz

¹ Национальный ядерный центр Республики Казахстан,
Казахстан, 071100, г. Курчатов, ул. Бейбит Атом, 2.

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность данной работы обусловлена тем, что возникает вопрос о проведении исследований для выявления содержания химических элементов по одному из основных следов «Восточный» Семипалатинского испытательного полигона и прилегающих к нему территории, включая некоторые малые населенные пункты, посредством изучения твердых частиц аэрозолей воздуха. На примере сел Долонь, Бескарагай и Канонерка изучение элементного состава твердых частиц аэрозолей воздуха даст наиболее полную картину о качестве воздуха малых населенных пунктов со схожими климатическими условиями. Данные населенные пункты расположены в следе «Восточный», недалеко от условно обозначенных границ Семипалатинского испытательного полигона. Среди них особо актуальным вопросом является изучение качественного состава атмосферного воздуха непосредственно самого полигона и прилегающих к нему зон. Особый интерес среди них вызывает химический состав твердых частиц аэрозолей воздуха (PM-2,5 – Particulate matter – твердые частицы аэрозолей воздуха с диаметром менее 2,5 мкм, PM-10 – Particulate matter – твердые частицы аэрозолей воздуха с диаметром менее 10 мкм, TSP-Total suspended particles – Общие взвешенные частицы), содержащих радиоактивные элементы и тяжелые металлы. Взвешенные вещества размером менее 10 мкм распространяются на большие расстояния и являются потенциальными загрязнителями основных компонентов природы.

Цель: определить источники поступления химических элементов в атмосферу населенных пунктов, в зоне воздействия «Восточного» следа радиоактивных выпадений, прилегающей к территории Семипалатинского испытательного полигона, на примере сел Долонь, Бескарагай и Канонерка, а также оценить качество атмосферного воздуха.

Объекты: твердые частицы аэрозолей воздуха, почва.

Методы. Пробы проанализированы методами масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (МС-ИСП), атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (АЭС-ИСП) и сканирующей электронной микроскопии; проведены процедуры внутреннего контроля качества (сравнение результатов, полученных различными способами анализа); статистическая обработка результатов анализа основных исследуемых компонентов природной среды; сезонная динамика распределения содержания элементов в твердых частицах аэрозолей воздуха исследуемых малых населенных пунктов.

Результаты. Изучен химический состав (элементный) твердых частиц аэрозолей воздуха размером 2,5 мкм, а также почвы малых населенных пунктов. Выявлена сезонная динамика распределения концентраций исследуемых групп химических элементов. Анализ сезонного изменения химического состава аэрозолей воздуха позволил выявить их источники поступления. Превышения ПДК среднесуточного содержания нормируемых химических элементов в составе твердых частиц аэрозолей воздуха не обнаружено.

Ключевые слова:

Твердые частицы аэрозолей воздуха, почва, масс-спектрометр с индуктивно связанной плазмой, естественные радионуклиды, тяжелые металлы.

Введение

Оценка состояния воздуха населенных мест ограничивается, как правило, определением количества газообразных компонентов и разных фракций пылевых частиц. Содержание химических элементов, в

том числе тяжелых металлов, большинство которых поступают в атмосферный воздух в результате интенсивной антропогенной деятельности, начали изучать полноценно последние 10–20 лет [1–4]. На сегодняшний день существенный вклад в загрязнение атмо-

сферы населенных мест привносят твердые частицы аэрозолей воздуха размером менее 10 мкм, такие как пыль, сажа, зола, которые содержат различные химические элементы [5–9]. Под атмосферным аэрозолем понимают твердые или жидкие дисперсные частицы размером приблизительно от долей до сотен мкм, находящиеся в атмосфере во взвешенном состоянии. Аэрозоль легко проникает в органы человека в процессе дыхания и при наличии в них вредных веществ (тяжелые металлы и радионуклиды) может привести к тяжелым заболеваниям [10, 11]. Наряду с исследованием радиоэкологической обстановки малых населенных пунктов, прилегающих к северо-восточной части Семипалатинского испытательного полигона (СИП), проведены работы по определению элементного состава твердых частиц аэрозолей воздуха, включая содержание естественных радионуклидов.

На сегодняшний день химический состав компонентов природы «Восточного» следа мало изучен. Имеются данные только по содержанию радионуклидов в атмосферном воздухе прилегающих населенных пунктов. Так, по ранее проведенным исследованиям Института радиационной безопасности и экологии было выявлено, что в воздушной среде по профилю «Восточного» следа объемная активность искусственных радионуклидов показала значения на 2–3 порядка ниже установленных нормативов, в том числе и на территориях населенных пунктов Долонь, Бескарагай и Канонерка [12]. В связи с чем возникает вопрос о проведении исследований для выявления пространственного распределения содержания радионуклидов и химических элементов «Восточного» следа СИП и прилегающих к нему территорий, включая некоторые малые населенные пункты посредством изучения твердых частиц аэрозолей воздуха.

Малые населенные пункты (Долонь, Бескарагай, Канонерка) находятся в районе прохождения «Восточного» следа радиоактивных выпадений и расположены в непосредственной близости (30–70 км) от границ СИП. Данные села расположены в южной и юго-западных частях Бескарагайского района Восточно-Казахстанской области Республики Казахстан вдоль ленточного бора Иртышского бассейна. В настоящее время количество проживающих людей в трех исследуемых населенных пунктах в сумме составляет более 6000 человек. Около 80 % местного населения в зимний период для отопления домов сжигают древесину (сосна, осина), остальные 20 % – уголь с месторождения «Каражыра». Помимо индивидуальных печей на территории исследуемых малых населенных пунктов функционируют котельные.

Регулярные исследования позволят изучить динамику изменения концентрации химических элементов в воздухе с течением времени, а специальные уточняющие исследования будут использоваться для оценки масштабов распространения химических элементов воздушным путем за пределы испытательных площадок СИП.

Целью данной работы является изучение источников поступления химических элементов, включая естественные радионуклиды, в атмосферный воздух

малых населенных пунктов, прилегающих к СИП, а также оценить качество воздуха.

Объекты и методы исследования

Твердые частицы аэрозолей воздуха (PM-2.5). Среднесуточные пробы твердых частиц аэрозолей воздуха отбирали переносным пробоотборником воздуха MVS6, который оснащен впускным трактом, позволяющим отсекаать крупные частицы с размерами более 2,5 мкм, с фиксированной скоростью на стационарном посту мониторинга. Стационарный пост был расположен на ровном участке ландшафта вдали от строений, леса и других препятствий на высоте 1,5 м от поверхности земли с твердым непылящим покрытием.

Отбор проб проводили с 2014 по 2016 гг. Согласно рекомендациям [13] было отобрано более 80 проб. Среднесуточный отбор проб твердых частиц аэрозолей воздуха производили с 8.00 утра до 8.00 утра следующего дня.

Почва. Со всей площади с. Долонь было отобрано 30 проб почвы. Масса каждой пробы почвы составила около 0,5 кг. Также была отобрана «фоновая» проба на расстоянии 1,2 км в северо-западном направлении от села.

Прободготовку твердых частиц аэрозолей воздуха и почвы проводили способом автоклавного разложения, с использованием концентрированных фтористоводородной (HF) и азотной (HNO₃) кислот в соотношении 1:2. Автоклавы выдерживали в течение 4 ч. в сушильном шкафу, нагретом до температуры 160±5 °С. После охлаждения объем раствора доводили до 15 мл 7 М HNO₃.

В каждой партии фильтров для отбора твердых частиц аэрозолей воздуха анализировали содержание химических элементов в чистых неэкспонированных образцах.

Определение содержания химических элементов в составе твердых частиц аэрозолей воздуха и почвы проводили методами масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС) с использованием квадрупольного масс-спектрометра Agilent 7700x «Agilent Technologies», а также атомно-эмиссионного спектрометра с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-АЭС) ICAP 6000 Duo «Thermo Scientific» на базе лаборатории элементного анализа Института радиационной безопасности и экологии Национального ядерного центра Республики Казахстан. Спектрометры были откалиброваны с помощью сертифицированных мультиэлементных стандартных образцов производства компании «Perkin Elmer», США. Относительное стандартное отклонение (RSD) измерений было меньше 10 %. Контроль качества измерений осуществлялся путём измерения контрольного раствора через каждые 10 проб. При неудовлетворительном результате калибровки (отклонение калибровочного графика на 8–10 %) проводили перекалибровку прибора, при которой учитывали новые параметры фона.

Также с применением растровой сканирующей электронной микроскопии на микроскопе Hitachi S-3400N с ЭДС приставкой Bruker XFlash 4010 были изучены более 10 проб воздушных аэрозолей и 5 проб почвы на базе МИНОЦ «Урановая геология» НИ ТПУ.

Таблица 1. Содержание элементов в стандартном образце (CRM-027-050), мг/кг (n=9)

Table 1. Content of elements in a standard sample (CRM-027-050), mg/kg (n=9)

Элементы Elements	Содержание элементов Content of elements	Аттестованное значение (доверительный интервал/ прогнозный интервал) Certified value (confidence/ prediction limit)	Отклонение значения суммы от атт. значения, % Deviation of a value from the sum of certified val., %
Be	2,95±0,40	2,73±0,102 (2,59–2,86/2,09–3,37)	8,1
Cr	22±3	(26,9±1,68) (24,8–29,1/16,4–37,5)	–18,2
Mn	275±38	259±7,38 (250–268/212–305)	6,2
Fe	10100±1400	11200±497 (10500–11900/8000–14300)	–9,8
Co	4,5±0,6	4,7±0,271 (4,34–5,06/2,99–6,41)	–4,3
Ni	11,6±1,6	10,5±0,704 (9,6–11,5/6,11–15)	10,5
Cu	10,6±1,3	9,87±0,5 (9,16–10,6/6,75–13)	7,4
Zn	46,8±6,4	51,3±2,63 (47,7–55/34,8–67,9)	–8,8
As	10,0±1,4	12,4±0,948 (11–13,7/6,37–18,3)	19,4
Mo	0,8±0,1	–	–
Cd	11,8±1,6	12±0,589 (11,2–12,8/8,31–15,7)	–1,7
La	20,0 ±2,8	–	–
Ce	42 ±6	–	–
Pr	4,8±0,7	–	–
Nd	20,0±2,8	–	–
Sm	3,4±0,6	–	–
Pb	50,1±6,9	51,9±2,46 (48,7–55,1/36,4–67,4)	–3,5
Th	3,10±0,40	–	–

Анализ проб проводили на определение естественных радионуклидов – ²³²Th, ²³⁸U, а также следующих элементов: Be, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Mo, Cd, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Pb, по методике ISO 17294-2:2003 (E) с номером государственной регистрации 022/10505 от 27.12.2005 г. [14]. Данные по контролю качества и обеспечению качества элементного анализа приведены в табл. 1.

Расчет основных экологических параметров:

Определение запыленности (массовой концентрации пыли) воздуха производили путем расчета (1):

$$C_3 = M/V \times 1000, \quad (1)$$

где C_3 – коэффициент запыленности, мг/м³; M – масса пыли, г; V – объем прокаченного воздуха, м³.

Обсуждение результатов

Твердые частицы аэрозолей воздуха (PM-2,5). Ранее проведенные единичные исследования по определению содержания некоторых тяжелых металлов и попутных элементов в пылеаэрозольных выпадениях

прилегающих территорий выявили значимые их содержания. Так, к примеру, были определены высокие концентрации тяжелых металлов (мышьяк, кадмий, медь) относительно среднего содержания в земной коре в пылеаэрозольных выпадениях, а именно в нерастворимой фазе снегового покрова [15]. Мониторинговые исследования, проводимые с 2014 по 2016 гг. в рамках научно-технической программы Республики Казахстан «Комплексное радиоэкологическое исследование населенных пунктов Большая Владимировка и Канонерка и прилегающих территорий (40 км²)» по разделу «Оценка загрязнения тяжелыми металлами атмосферного воздуха» выявили следующие данные по содержанию некоторых групп химических элементов, представленные в табл. 2.

В данной таблице представлены результаты сезонных колебаний содержания исследуемых групп элементов в трех населенных пунктах, расположенных в зоне выпадения радиоактивных осадков. Динамика содержания элементов в PM-2,5 в исследуемых населенных пунктах имеет разный характер распределения по сезонам. Рассмотрим каждый населенный пункт по отдельности.

Для населенного пункта Бескарагай выделены группы элементов, характерных для каждого сезона. Так, в отопительный сезон в уловленных образцах пыли наблюдаются повышенные значения концентрации таких элементов, как Be, Cu, As, Mo, La, Ce, Pr, Nd, Th, относительно их содержания в неотопительный период. В зимний период основным источником поступления этих элементов в атмосферный воздух малого населенного пункта Бескарагай является процесс сжигания твердого топлива (уголь месторождения Каражыра), поскольку в ранее проведенных исследованиях [15] в зольных остатках угля были выявлены их высокие содержания. В атмосферном воздухе данного населенного пункта в течение всего года наблюдается стабильность в динамике распределения содержания остальной группы элементов (Fe, Cr, Mn, Co, Ni, Zn, Sm, Cd, Pb) как основных элементов-примесей, постоянно присутствующих в воздушной массе. Возможно, что источниками данной группы элементов выступает почвенно-эрозионный процесс летом, а в отопительный сезон – процесс сжигания угля.

Как видно из представленных данных, в населенном пункте Канонерка в неотопительный период содержание Mn имеет низкое значение по отношению к его концентрации в PM-2,5, отобранных в двух других селах. Возможно, что такого рода поведение данного элемента связано с локальными метеорологическими условиями и рельефом местности (наличие безветренной погоды за время экспозиции образцов). Наблюдается стабильная динамика распределения концентрации молибдена в твердых частицах аэрозолей воздуха, отмечены одинаковые максимальные содержания и за неотопительный, и за отопительный периоды, 35 и 27 нг/м³ соответственно. Также можно отметить концентрацию меди, непрерывно поступающей в атмосферный воздух независимо от сезонов, однако максимальные пики её накопления характер-

ны для зимнего периода. Так, к примеру, летний максимум его составляет 70 нг/м^3 , зимний – 310 нг/м^3 . Данного рода сезонное колебание содержания меди связано с процессом сжигания топлива.

Таблица 2. Сезонная динамика содержания элементов в образцах PM-2,5 в исследуемых населенных пунктах, $n=33$
Table 2. Seasonal dynamics of the content of elements in PM-2,5 samples in settlements of interest, $n=33$

Элементы Elements	Неотопительный сезон, нг/м^3 Non-heating season, ng/m^3			Отопительный сезон, нг/м^3 Heating season, ng/m^3		
	Бескарагай Beskaragay	Канонерка Kanonerka	Долонь Dolon	Бескарагай Beskaragay	Канонерка Kanonerka	Долонь Dolon
Be	<0,01	<0,01	<0,01	0,20 0,09–0,30	0,20 0,10–0,40	<0,01
Cr	17 17–17	<0,5	23,0 3,2–30,0	17,0 0,5–28,0	30 0,5–40	<0,5
Mn	13 6–34	5,5 0,5–30,0	63 12–170	46 20–88	17,0 5,0–41	<0,5
Fe	1400 790–2100	1300 620–1500	1700 25–2800	750 290–1500	140 25–620	<25
Co	2,0 2,0–2,0	<0,03	<0,03	1,00 0,03–2,10	2,00 0,03–4,00	0,15 0,03–0,90
Ni	9,5 8,0–11,0	<0,1	3,6 0,1–7,5	5,0 0,1–20,0	12,0 1,5–71,0	4,2 0,1–12,5
Cu	9,5 7,0–12,0	38 12–70	140,0 80–260	46 32–550	97 47–310	210 160–290
Zn	7000 7000–7000	<25	5000 25–7400	6900 3800–11000	11000 2500–15000	10600 5200–20800
As	<0,5	17,0 0,5–27,0	34,0 2,3–80,0	3,0 0,5–4,3	4,0 0,5–23,0	44 3–230
Mo	<0,5	6,3 0,9–35,0	17 3–34	9,0 0,5–91,0	12,0 8,5–27,0	13 3–50
Cd	2,5 2,0–3,0	<0,1	<0,1	1,0 0,2–2,0	2,0 0,6–3,0	1,3 0,2–3,8
La	<0,02	0,20 0,05–1,70	11 7–16	8,70 0,05–18,00	20,0 0,4–27,0	<0,02
Ce	<0,3	<0,3	15,0 1,7–24,0	6,4 1,0–24,0	26,0 0,5–33,0	2,2 0,1–15,0
Pr	<0,05	<0,05	2,4 1,4–3,7	2,00 0,05–4,00	5,00 0,05–5,00	<0,05
Nd	<0,03	<0,03	9,5 5,3–13,0	5,3 0,3–12,0	15,0 0,4–18,0	<0,03
Sm	4,5 3,0–6,0	<0,04	1,3 0,7–2,3	9,2 3,0–16,0	22 7–26	<0,04
Pb	10,5 9,0–12,0	<0,5	14,0 0,5–15,0	12 11–40	21 15–30	31 2–40
Th	<0,05	<0,05	1,5 1,0–5,0	1,30 0,05–4,0	4,00 0,05–6,00	<0,05
U	<0,05	0,10 0,05–0,10	1,0 0,05–3,0	0,7 0,4–2,0	1,0 0,4–1,0	1,0 0,05–1,0

Из группы редкоземельных элементов (РЗЭ) в неотопительный период незначительные содержания были отмечены у лантана, с максимальным значением $1,7 \text{ нг/м}^3$. Содержание остальной группы РЗЭ в отобранных образцах мелкодисперсной пыли данного населенного пункта составило меньше предела обнаружения прибора.

Одной из основных задач данной работы было исследование, направленное на непрерывное наблюдение в течение 2 лет за динамикой содержания изучаемых групп химических элементов в пылевых частицах аэрозолей воздуха населенного пункта, наиболее близко расположенного к границам СИП. Данным населенным пунктом является Долонь, где за исследуемый период была отобрана 51 проба твердых частиц аэрозолей воздуха.

Анализ полученных данных показал, что в пробах воздушных аэрозолей села Долонь превышения предельно допустимой концентрации среднесуточного содержания исследуемых групп химических элемен-

тов не обнаружено [16]. Следует отметить, что содержание такого нормируемого компонента, как Be, в твердых частицах аэрозолей воздуха показало значение меньше предела обнаружения прибора.

В твердых частицах аэрозолей воздуха данного населенного пункта по значениям концентрации можно выделить группы элементов, характерных для определенных сезонов. Так, в летний период в составе твердых частиц аэрозолей воздуха PM-2,5 были обнаружены относительно высокие концентрации Cr, Mn, Fe, Th и некоторых РЗЭ – La, Pr, Nd, Sm, относительно их содержания в составе аэрозолей в отопительный сезон. В зимний период отмечена относительно высокая концентрация Co и Cd в составе PM-2,5 в сравнении с их содержанием в летний период. Также выявлена группа элементов с относительно стабильным распределением содержания в составе твердых частиц аэрозолей воздуха за весь исследуемый период. Так, к данной группе относятся такие элементы, как Ni, Cu, As, Mo, U.

Содержание Pb в твердых частицах аэрозолей воздуха также зависит от почвенно-эрозионных процессов, о чем свидетельствует его высокая концентрация в неотапливаемый сезон. Концентрация свинца была стабильно высокой в неотапливаемый период за исключением июня месяца. Среднемесячное содержание свинца в аэрозолях воздуха в летний сезон варьировало от 11 до 15 нг/м³.

Одним из элементов, поступление которого в твердые частицы аэрозолей воздуха обусловлено выветриванием из почвенного покрова, является Fe [17]. В летний период, когда подстилающая поверхность почвы открыта, наблюдается высокое содержание данного элемента в уловленных частицах пыли. По динамике его содержания можно предположить, что в сентябре поступление в малых количествах обусловлено местными климатическими условиями (выпадение осадков).

Ниже представлены графики сезонной динамики распределения концентрации Mn, Cr, Nd, Pr, Sm, La, Ce в 51 пробе воздушных аэрозолей, отобранных с основного поста в с. Долонь (рис. 1, а–в).

Как видно из графика, наблюдается четкая сезонная динамика распределения концентрации вышеуказанных химических элементов. В неотапливаемый сезон в твердых частицах аэрозолей, содержащихся в приземном слое атмосферы с. Долонь, определено содержание Cr, Mn а также редкоземельных элементов в относительно больших концентрациях, чем в отопительный сезон. Максимальный пик динамики распределения среднего содержания хрома и марганца приходится на июнь месяц. В данный период времени среднее содержание хрома составило 30 нг/м³, а Mn – 150 нг/м³. Идентичным характером распределения за неотапливаемый период обладают концентрации празеодима, неодима и самария. Средние значения (за среднее взяты медианные показатели) за июнь месяц содержания элементов составили: Pr – 3,7 нг/м³, Nd – 13 нг/м³ и Sm – 0,7 нг/м³. Данная стабильная динамика распределения концентраций хрома, марганца, празеодима, неодима и самария свидетельствует об их природном источнике поступления, а именно о почвенно-эрозионном процессе.

Следует отметить специфическое поведение содержания Ce в исследуемых образцах твердых частиц аэрозолей воздуха. Концентрация данного элемента весьма нестабильна в течение года. Отмечены пики возрастания содержания церия в июне, августе и октябре, когда его концентрация составила от 10 до 25 нг/м³, тогда как в остальные месяцы – менее 10 нг/м³. Такого рода сложное поведение содержания церия в аэрозолях воздуха за исследуемый период (1 год), возможно, связано с несколькими основными источниками поступления. Содержание легких лантаноидов в природе больше, чем тяжелых, в то же время церия в природе больше, чем лантана [18]. Во всех месяцах, за исключением апреля, наблюдается природное соотношение содержания лантана к церию. В данный отрезок времени (апрель) содержание лантана преобладает над концентрацией церия в 8 раз. Для выяснения причин такого аномального поведения

содержания лантана необходимы дополнительные исследования. Согласно литературным данным [18] в углях в качестве примеси содержатся редкоземельные элементы, которые могут поступать в атмосферный воздух при сжигании угля, т. е. возможным источником поступления церия в зимний период на исследуемой территории может быть процесс сжигания твердого топлива. В исследуемых нами образцах угля содержание церия составило около 20 мг/кг, в золе – 58 мг/кг.

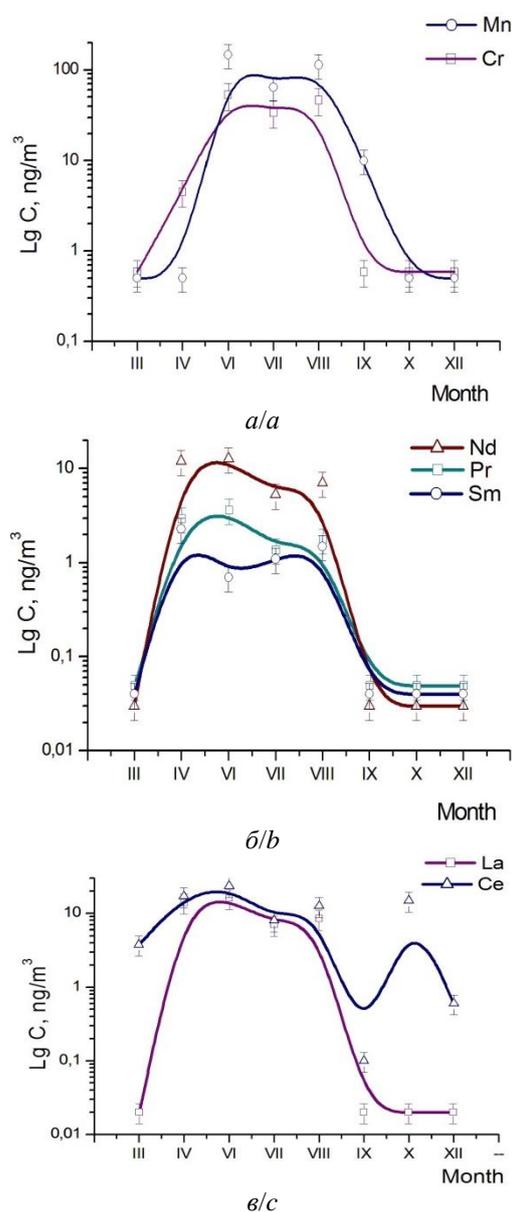


Рис. 1. Сезонная динамика концентрации PM-2,5 Mn, Cr (А), Nd, Pr, Sm (Б), La, Ce (В)

Fig. 1. Seasonal dynamics of concentration of PM-2,5 of Mn, Cr (A), Nd, Pr, Sm (B), La, Ce (B)

Динамика распределения концентраций Co и Cd имеет нестабильный характер в течение года. Содержание Co и Cd в твердых частицах аэрозолей воздуха в отопительный период была стабильно высокой. В зимние месяцы отопительного периода в составе

твердых частиц аэрозолей воздуха были обнаружены их относительно высокие содержания – 0,9 и 3,8 нг/м³ соответственно. Вероятно, это свидетельствует об их постоянном источнике поступления, т. е. процессе сжигания твердого топлива [19–21].

Также выявлена группа элементов с более стабильной динамикой распределения содержания за исследуемый период. Отмечен относительно более стабильный характер распределения концентрации Ni, Cu, As, Mo, U. На рис. 2 представлена сезонная динамика распределения содержания Ni и Cu. Резкое понижение концентрации никеля отмечается в июне и декабре. В остальной период времени содержание данного элемента в твердых частицах аэрозолей воздуха варьирует в пределах от 0,8 до 13 нг/м³.

Определена схожая картина распределения среднесуточных концентраций меди и никеля по некоторым месяцам отопительного и неотопительного сезонов. Разница между средними значениями концентрации за отопительный и неотопительный сезоны по никелю составляет 1,3 раза, по меди – 1,4 раза. Однако следует отметить, что пики понижения концентраций никеля в апреле, мае и декабре имеют более четкий характер, в сравнении с понижением содержания меди в этих месяцах. Стабильность динамики распределения содержания данных элементов независимо от периодов свидетельствует об их природном источнике поступления в атмосферный воздух исследуемой территории.

Ниже представлены результаты анализа, полученные с применением растрового сканирующего электронного микроскопа (рис. 3, а–в). В большинстве анализируемых образцов наблюдалось наличие частиц меди в РМ-2,5. Также следует отметить, что в образцах почвы (0–5 см) были выявлены частицы минералов с содержанием редкоземельных элементов.

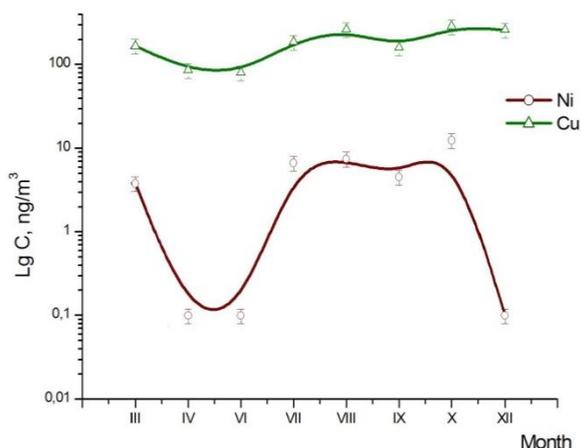


Рис. 2. Сезонная динамика концентрации РМ-2,5 Ni, Cu
 Fig. 2. Seasonal dynamics of concentrations of Ni, Cu PM-2,5

Динамика концентрации химических элементов в аэрозолях воздуха различается по сезонам в зависимости от источников их поступления. Сезонная изменчивость содержания химических элементов в атмосфере с. Долонь зависит от нескольких факторов: почвенная эрозия, лесные пожары, сжигание твердого топлива. Также анализ полученных данных показал, что в про-

бах воздушных аэрозолей превышения предельно допустимых концентраций среднесуточного содержания химических элементов не обнаружено [16].

Как уже было отмечено выше, исследуемая территория расположена в районе прохождения одного из основных радиоактивных следов Семипалатинского испытательного полигона. Были обследованы основные естественные радионуклиды в твердых частицах аэрозолей воздуха. Значимые данные были получены только по содержанию ²³²Th. Максимальный пик возрастания уровня содержания исследуемого радионуклида приходится на июнь месяц, где объемная активность равна 2,0·10⁻⁵ Бк/м³, что в принципе не превышает установленные допустимые уровни – 4,9·10⁻³ Бк/м³ для Республики Казахстан.

Таблица 3. Удельная активность Th и U в почве с. Долонь, n=30

Table 3. Th and U specific activity in soil of Dolon vil., n=30

Элементы Elements	Удельная активность, Бк/кг/Specific activity, Bq/kg		
	Долонь Dolon	Кларк в верх. части конт. коры [27] Clarke in top cont. crust	Минимальная значимая удельная активность Minimum significant specific activity
²³² Th	1,5·10 ⁻⁵ ±8,1·10 ⁻⁷	3,8·10 ⁻⁵	1·10 ⁴
²³⁸ U	7,5·10 ⁻⁶ ±7,5·10 ⁻⁷	3,1·10 ⁻⁵	1000

Таблица 4. Среднее содержание элементов в почве с. Долонь, n=30

Table 4. Average content of elements in soil of Dolon vil., n=30

Элементы Elements	Среднее содержание, мг/кг/Average content, mg/kg		
	Долонь Dolon	Кларк в верх. части конт. коры [27] Clarke in top cont. crust	В почвах малых населенных пунктов [28] In soils of small settlements
Be	0,30±0,02	2,1	8,4
Cr	68±3	150	52,83
Mn	320±20	670	674,9
Fe	4900±490	40600	–
Co	4,8±0,2	17	10,7
Ni	16±1	62	28,35
Cu	11±1	39	34,7
Zn	<0,01	78	97,7
As	3,8±0,1	6,5	5,2
Mo	<0,01	1,5	3,7
Cd	<0,01	0,3	0,2
La	14±1	32	–
Ce	31±1	63	–
Pr	3,7±0,1	8,7	–
Nd	16±1	29	–
Sm	3,2±0,1	5,7	–
Pb	18±4	17	22,74
Th	3,8±0,2	9,3	–
U	0,60±0,06	2,5	–

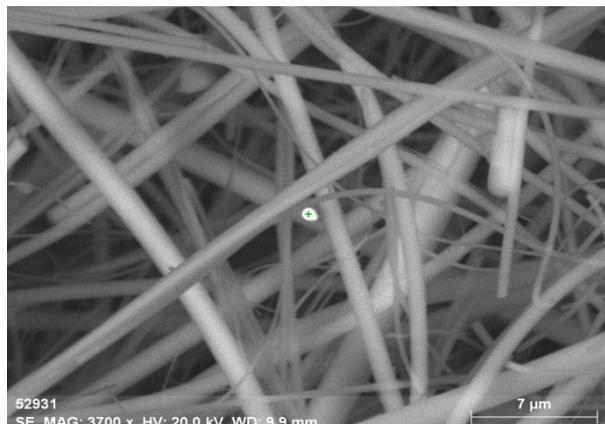
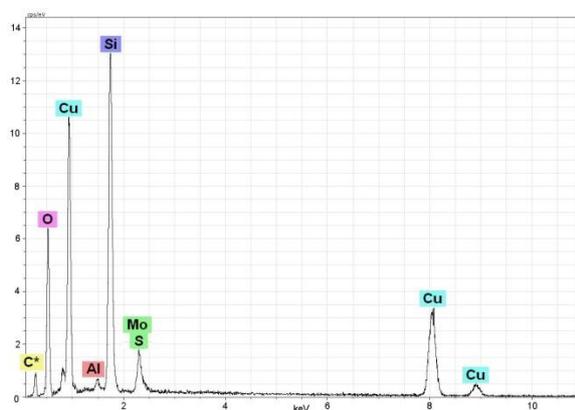
Примечание: «–» – нет данных

Note: «–» – not available

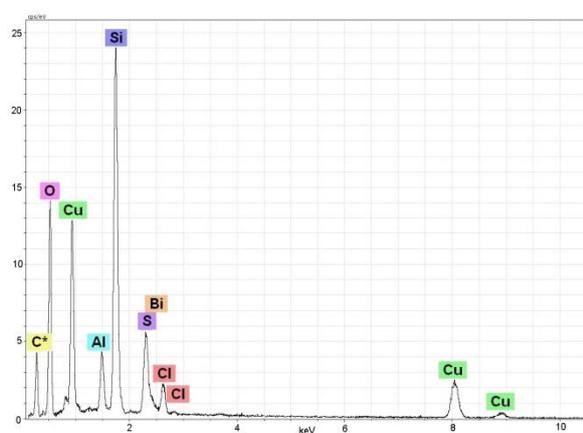
Химический состав твердых частиц аэрозолей воздуха непромышленных регионов формируется в большинстве случаев за счет природных факторов. По многочисленным литературным данным основным источником поступления химических элементов в атмосферный воздух не урбанизированных территорий в летний период является ветровая эрозия почвенного покрова [22–26]. По полученным данным, при средней скорости ветра

2–3 м/с в неотапительный период 2015 г. средняя запыленность воздуха села Долонь составила 0,07 мг/м³. Для выявления вклада почвенно-эрозийных процессов в

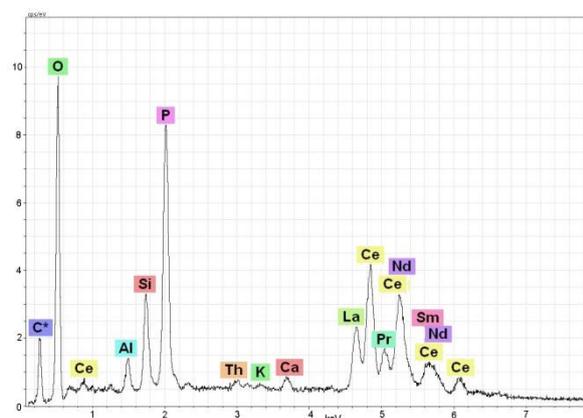
формирование химического состава аэрозолей была определена концентрация элементов в почвенных образцах исследуемой территории (табл. 3, 4).



a/a



b/b



b/c

Рис. 3. PM-2,5, неотапительный сезон (а); PM-2,5, отопительный сезон (б); результаты электронной микроскопии почвы с. Долонь (в)

Fig. 3. PM-2,5, non-heating season (a); PM-2,5, heating season (b); results of electron microscopy of soil from Dolon vil. (c)

На исследуемой территории в образцах почвы превышения допустимых санитарных норм содержания изучаемых естественных радионуклидов и элементов не обнаружено. В исследуемых образцах почвы наблюдается накопление Pb. Среднее содержание свинца – на уровне кларка для верхней части континентальной коры [27].

В сравнении со средним содержанием в почвах малых населенных пунктов [28], в исследуемых образцах почвы с. Долонь обнаружены относительно высокие концентрации Fe, Cr, Th и U, а также РЗЭ (La, Ce, Pr, Nd, Sm). Следует отметить, что более чем для половины редких металлов не установлены средние содержания в почвах Земли, сельских и сельскохозяйственных и техногенных ландшафтов.

По данным электронной микроскопии, в почвах с. Долонь обнаружено содержание редкоземельных элементов, которое значительно превышает их концентрацию в почвах малых населенных пунктов.

Заключение

Содержание химических элементов в твердых частицах аэрозолей воздуха исследуемых населенных пунктов, прилегающих к Семипалатинскому испытательному полигону, имеет разную динамику распределения в зависимости от сезонов. Основными элементами-маркерами летнего, а также неотапительного периода, включая вторую декаду весны и первую половину осени по данным результатов с. Долонь, являются марганец, хром, железо, свинец, торий и группа редкоземельных элементов, а именно La, Pr, Nd, Sm. Отличительной чертой поведения содержания данной группы элементов в исследуемом населенном пункте является резкое повышение их концентрации в летний период и заметный спад к началу отопительного сезона. Наиболее заметные пики возрастания концентраций приходятся на летние месяцы в засушливый и сухой период. Из группы редкоземельных элементов специфично поведение содержания церия в твердых частицах аэрозолей воздуха. В целом динамика распределения содержания церия в летний период абсолютно схожа с поведением остальных элементов группы РЗЭ. Однако уровень его содержания в отопительный период постоянно поддерживается выбросами дымовых труб индивидуальных отопительных печей и котельной.

Характерной особенностью для образцов РМ-2,5, отобранных с населенных пунктов Бескарагай и Канонерка, является низкое содержание РЗЭ в неотапительный сезон, где основным источником их поступления в атмосферный воздух выступает почвенно-эрозионный процесс. Данная особенность свидетельствует об отсутствии в подстилающем слое почвенного покрова группы изучаемых РЗЭ, в сравнении с почвой с. Долонь. Повышенное содержание группы РЗЭ в отопительный сезон относительно их концен-

трации за летний сезон в образцах РМ-2,5 с. Бескарагай и Канонерка связано с процессом сжигания угля.

Также следует отметить, что в с. Бескарагай содержание Cr и Mn в твердых частицах аэрозолей воздуха в течение исследуемого периода было стабильным, что свидетельствует о наличии нескольких источников их поступления, основными из которых является почвенно-эрозионный процесс. В с. Канонерка содержание этих элементов имеет более динамичный характер. Так, в неотапительный период в образцах пыли содержание хрома и марганца были значительно меньше в сравнении с отопительным периодом.

Выявлено, что основным источником поступления Co и Cd в атмосферный воздух с. Долонь является процесс сжигания твердого топлива (уголь). Низкие значения в динамике распределения содержания данных элементов в неотапительный период в изучаемых образцах, возможно, связаны с другими источниками, для выявления которых требуются дополнительные исследования.

Стабильность динамики распределения содержания Ni, Cu, As, Mo, U независимо от периодов свидетельствует об их природном источнике поступления в атмосферный воздух исследуемой территории.

Таким образом, основными источниками поступления химических элементов в атмосферный воздух исследуемых населенных пунктов являются: почвенно-эрозионный процесс и процесс сжигания твердого топлива.

Анализ полученных данных показал, что в твердых частицах воздушных аэрозолей превышения предельно-допустимой концентрации среднесуточного содержания химических элементов не обнаружено.

В целом проведенные исследования не выявили явной связи между радиоактивным загрязнением Семипалатинского испытательного полигона и содержанием микроэлементов в воздухе поселков. Более того, полученные данные свидетельствуют о том, что состав элементов и их динамика в течение года во многом зависят от состава сырья для обеспечения теплом населенных пунктов, так как основным источником загрязнения атмосферного воздуха в них является печное отопление.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Morphology, mineralogy, and chemistry of atmospheric aerosols nearby an active mining area: Aljustrel Mine (SW Portugal) / A. Barroso, S. Mogo, M. Manuela V. G. Silva, V. Cachorro, Á. de Frutos // *Atmosphere*. – 2021. – V. 12 (3). URL: <https://doi.org/10.3390/atmos12030333> (дата обращения 15.09.2021).
2. Mmari A.G., Hassan H.A., Bencs L. Daytime concentrations of minor and trace elements in atmospheric aerosols at four sampling sites of Dar es Salaam, Tanzania // *Air Quality, Atmosphere & Health*. – 2020. – V. 13. – P. 739–750. URL: <https://doi.org/10.1007/s11869-020-00832-8> (дата обращения 15.09.2021).
3. Levels of selected metals in ambient air PM10 in an urban site of Zaragoza (Spain) / J.M. López, M.S. Callén, R. Murillo, T. García, M.V. Navarro, M.T. de la Cruz, A.M. Mastral // *Environmental Research*. – 2005. – V. 99 (1). – P. 58–67. DOI: 10.1016/j.envres.2005.01.007
4. Pongpiachan S., Iijima A. Assessment of selected metals in the ambient air PM10 in urban sites of Bangkok (Thailand) // *Environmental Science and Pollution Research International*. – 2016. – V. 23 (3). – P. 2948–2961. DOI: 10.1007/s11356-015-5877-5
5. Byeon S.H., Willis R., Peters T.M. Chemical characterization of outdoor and subway fine (PM(2.5–1.0)) and coarse (PM(10–2.5)) particulate matter in Seoul (Korea) by computer-controlled scanning electron microscopy (CCSEM) // *Environmental Research and Public Health*. – 2015. – V. 12 (2). – P. 2090–2104. DOI: 10.3390/ijerph120202090
6. On the morphology and composition of particulate matter in an urban environment / B. Zeb, K. Alam, A. Sorooshian, T. Blaschke, I. Ahmad, I. Shahid // *Aerosol and Air Quality Research*. – 2018. – V. 18 (6). – P. 1431–1447. DOI: 10.4209/aaqr.2017.09.0340
7. PM10 composition during an intense Saharan dust transport event over Athens (Greece) / E. Remoundaki, A. Bourliva, P. Kokkalis, R.E. Mamouri, A. Papayannis, T. Grigoratos, C. Samara, M. Tsezos // *The Science of Total Environment*. – 2011. – V. 409 (20). – P. 4361–4372. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2011.06.026.
8. Fine and coarse PM composition and sources in rural and urban sites in Switzerland: local or regional pollution? / M.C. Mingüillón, X. Querol, U. Baltensperger, A.S. Prévôt // *The Science of the Total Environment*. – 2012. – V. 427–428. – P. 191–202. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2012.04.030.
9. Elemental characterization and source apportionment of PM10 and PM2.5 in the western coastal area of central Taiwan / C.Y. Hsu, H.C. Chiang, S.L. Lin, M.J. Chen, T.Y. Lin, Y.C. Chen // *The*

- Science of the Total Environment. – 2016. – V. 541. – P. 1139–1150. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.09.122.
10. Caggiano R., Sabia S., Speranza A. Trace elements and human health risks assessment of finer aerosol atmospheric particles (PM1) // Environmental Science and Pollution Research International. – 2019. – V. 26 (36). – P. 36423–36433. DOI: 10.1007/s11356-019-06756-w.
 11. Fractionation and health risks of atmospheric particle-bound As and heavy metals in summer and winter / Y. Sun, X. Hu, J. Wu, H. Lian, Y. Chen // The Science of the Total Environment. – 2014. – V. 493. – P. 487–494.
 12. Лукашенко С.Н. Актуальные вопросы радиозологии Казахстана. Вып. 5. – Павлодар: Дом печати, 2015. – 356 с.
 13. ЕМЕП. Совместная Программа мониторинга и оценки дальнего атмосферного переноса загрязняющих веществ в Европе. 2002. URL: <https://www.twirpx.com/file/660296/> (дата обращения 15.09.2021).
 14. Water quality. Application of inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) P. 2: Determination of 62 elements. ISO 17294-2:2003 (E). – Switzerland, 2003. – 30 p. URL: <https://www.iso.org/standard/36127.html> (дата обращения 15.09.2021).
 15. Элементный состав твердой фазы снегового покрова малых населенных пунктов (на примере села Долонь Восточно-Казахстанской области, Республика Казахстан) / А.Е. Темиржанова, М.Т. Дюсембаева, С.Н. Лукашенко, Е.Г. Язиков, Е.З. Шакинов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 12. – С. 41–50. DOI: 10.18799/24131830/2020/12/2937
 16. Гигиенические нормативы к атмосферному воздуху в городских и сельских населенных пунктах. Утверждены приказом Министра национальной экономики Республики Казахстан от 28 февраля 2015 года № 168. – Астана: Адилет, 2015. – 322 с. URL: <http://adilet.zan.kz/rus/docs/V1500011036/links> (дата обращения 15.09.2021).
 17. Aerosol falls on snow cover on the outskirts of Siberian towns / V.F. Raputa, T.V. Khodzher, A.G. Gorshkov, K.P. Koutzenogii // Journal of Aerosol Science. – 1998. – V. 29 (2). – P. 807–808.
 18. Арбузов С.И. Металлоносность углей Сибири // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Т. 311. – № 1. – С. 77–83. URL: http://www.lib.tpu.ru/fulltext/v/Bulletin_TPU/2007/v311/i1/13.pdf (дата обращения 15.09.2021).
 19. Characterization of outdoor air pollution from solid fuel combustion in Xuanwei and Fuyuan, a rural region of China / W. Hu, G. Downward, J.Y.Y. Wong, B. Reiss, N. Rothman, L. Portengen, J. Li, R.R. Jones, Y. Huang, K. Yang, Y. Chen, J. Xu, J. He, B. Bassig, W.J. Seow, H.D. Hosgood, L. Zhang, G. Wu, F. Wei, R. Vermeulen, Q. Lan // Scientific Reports. – 2020. – V. 10. – 11335. DOI: 10.1038/s41598-020-68229-2.
 20. Particulate matter chemical component concentrations and sources in settings of household solid fuel use / M.H. Secrest, J.J. Schauer, E.M. Carter, J. Baumgartner // Indoor Air. – 2017. – V. 27 (6). – P. 1052–1066. DOI: 10.1111/ina.12389.
 21. Impacts of stove/fuel use and outdoor air pollution on chemical composition of household particulate matter / A.M. Lai, S. Clark, E. Carter, M. Shan, K. Ni, X. Yang, J. Baumgartner, J.J. Schauer // Indoor Air. – 2020. – V. 30 (2). – P. 294–305. DOI: 10.1111/ina.12636.
 22. Offor I.F., Adie G.U., Ana G.R. Review of particulate matter and elemental composition of aerosols at selected locations in Nigeria from 1985–2015 // Journal of Health and Pollution. – 2016. – V. 6 (10). – P. 1–18. DOI: 10.5696/2156-9614-6-10.1.
 23. Atmospheric ambient trace element concentrations of PM10 at urban and sub-urban sites: source apportionment and health risk estimation / Z. Bozkurt, E.O. Gaga, F. Taşpınar, A. Arı, B. Pekey, H. Pekey, T. Döğeroğlu, Ö.Ö. Üzmez // Environmental Monitoring and Assessment. – 2018. – V. 190 (3). – 168. DOI: 10.1007/s10661-018-6517-6.
 24. Park K., Dam H.D. Characterization of metal aerosols in PM10 from urban, industrial, and Asian Dust sources // Environmental Monitoring and Assessment. – 2010. – V. 160 (1–4). – P. 289–300. DOI: 10.1007/s10661-008-0695-6.
 25. Comparative PM10-PM2.5 source contribution study at rural, urban and industrial sites during PM episodes in Eastern Spain / S. Rodríguez, X. Querol, A. Alastuey, M.M. Viana, M. Alarcón, E. Mantilla, C.R. Ruiz // The Science of the Total Environment. – 2004. – V. 328 (1–3). – P. 95–113. DOI: 10.1016/S0048-9697(03)00411-X.
 26. Individual particle SEM-EDS analysis of atmospheric aerosols in rural, urban, and industrial sites of Central Italy / A. Genga, T. Siciliano, M. Siciliano, D. Aiello, C. Tortorella // Environmental Monitoring and Assessment. – 2018. – V. 190 (8). – 456 p. DOI: 10.1007/s10661-018-6826-9
 27. Григорьев Н.А. Распределение химических элементов в верхней части континентальной коры. – Екатеринбург: Уральское отделение РАН, 2009. – 383 с.
 28. Алексеев В.А. Химические элементы в геохимических системах. Кларки почв селитренных ландшафтов. – Ростов н/Д.: ЮФУ, 2013. – 388 с.

Поступила: 16.09.2021 г.

Информация об авторах

Темиржанова А.Е., инженер лаборатории элементного анализа Института радиационной безопасности и экологии Национального ядерного центра Республики Казахстан.

Язиков Е.Г., доктор геолого-минералогических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Дюсембаева М.Т., начальник лаборатории элементного анализа Института радиационной безопасности и экологии Национального ядерного центра Республики Казахстан.

Шакинов Е.З., инженер лаборатории элементного анализа Института радиационной безопасности и экологии Национального ядерного центра Республики Казахстан.

Мухамедияров Н.Ж., инженер лаборатории элементного анализа Института радиационной безопасности и экологии Национального ядерного центра Республики Казахстан.

Ташекова А.Ж., инженер лаборатории элементного анализа Института радиационной безопасности и экологии Национального ядерного центра Республики Казахстан.

Есильканов Г.М., инженер лаборатории элементного анализа Института радиационной безопасности и экологии Национального ядерного центра Республики Казахстан.

Колбин В.В., инженер лаборатории элементного анализа Института радиационной безопасности и экологии Национального ядерного центра Республики Казахстан.

Умаров М.А., заместитель директора Института радиационной безопасности и экологии Национального ядерного центра Республики Казахстан.

UDC 551.510.721:502 (574.41)

SEASONAL DYNAMICS OF THE CONTENT OF CHEMICAL ELEMENTS IN PARTICULATE AEROSOLS IN THE AIR OF SMALL SETTLEMENTS LOCATED IN THE ZONE OF INFLUENCE OF THE «VOSTOCHNY» TRACE OF RADIOACTIVE FALLOUT FROM THE SEMIPALATINSK TEST SITE

Aray E. Temirzhanova¹,
temirzhanova.aray@mail.ru

Egor G. Yazikov²,
yazikoveg@tpu.ru

Madina T. Dyusembayeva¹,
koigeldinova@nnc.kz

Erbol Z. Shakenov¹,
shakenov@nnc.kz

Nurlan Zh. Mukhamediyarov¹,
mukhamediyarov@nnc.kz

Azhar Zh. Tashekova¹,
Esenzholova@nnc.kz

Gani M. Esilkanov¹,
yessilkanov@nnc.kz

Vladimir V. Kolbin¹,
kolbin@nnc.kz

Murat A. Umarov¹,
Umarov@nnc.kz

¹ National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan,
2, Beibit Atom street, Kurchatov, 071100, Kazakhstan.

² National Tomsk Research Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance of this work is caused by the fact that there is a question of research to identify the content of chemical elements on one of the main traces of the «Vostochny» at Semipalatinsk Test Site and the surrounding area, including some small settlements, through the study of particulate matter of air aerosols. On the example of the villages Dolon, Beskaragay and Kanonerka the study of the elemental composition of particulate aerosols will give the most complete picture of the air quality of small settlements with similar climatic conditions. These settlements are located in the «Vostochny» trace and are not far from the conventionally marked boundaries of the Semipalatinsk Test Site. Among them, a particularly urgent issue is the study of the qualitative composition of the atmospheric air of the landfill itself and its surrounding areas. Particular interest is caused by chemical composition of solid aerosol particles (PM-2.5 – Particulate matter – solid aerosol particles with diameter less than 2,5 μm , PM-10 – Particulate matter – solid aerosol particles with diameter less than 10 μm , TSP – Total suspended particles) containing radioactive elements and heavy metals. Suspended matter smaller than 10 μm spreads over long distances and is a potential contaminant of major components of nature.

Objective: to determine the sources of chemical elements in the atmosphere of the settlements in the zone of impact of the «Vostochny» trace of radioactive fallout adjacent to the Semipalatinsk Test Site territory on the example of the villages Dolon, Beskaragay and Kanonerka, as well as to assess the quality of atmospheric air.

Objects: air aerosol particulate matter, soil.

Techniques: samples were analyzed by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS), inductively coupled plasma atomic emission spectrometry (ICP-AES), and scanning electron microscopy; internal quality control procedures were performed (comparison of results obtained by different methods of analysis); statistical processing of the results of the analysis of the main components of the environment studied; seasonal dynamics of element content distribution in solid particles of aerosol air of small settlements studied.

Results. The chemical (elemental) composition of 2,5 μm air aerosol particulate matter as well as soils of small settlements were studied. Seasonal dynamics of distribution of concentrations of chemical element groups under study was revealed. The analysis of seasonal variation in the chemical composition of air aerosols allowed their sources of entry to be revealed. No excess of MPC of the average daily content of standardized chemical elements including the group of heavy metals in air aerosol particulate matter was detected.

Key words:

Air aerosol particulate matter, soil, inductively coupled plasma mass spectrometer, naturally occurring radionuclides, heavy metals.

REFERENCES

1. Barroso A., Mogo S., Silva M. Manuela V. G., Cachorro V., de Frutos Á. Morphology, mineralogy, and chemistry of atmospheric aerosols nearby an active mining area: Aljustrel Mine (SW Portugal). *Atmosphere*, 2021, vol. 12 (3). Available at: <https://doi.org/10.3390/atmos12030333> (accessed 15 September 2021).
2. Mmari A.G., Hassan H.A., Bencs L. Daytime concentrations of minor and trace elements in atmospheric aerosols at four sampling sites of Dar es Salaam, Tanzania. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 2020, vol. 13, pp. 739–750. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11869-020-00832-8> (accessed 15 September 2021).
3. López J.M., Callén M.S., Murillo R., García T., Navarro M.V., de la Cruz M.T., Mastral A.M. Levels of selected metals in ambient air PM10 in an urban site of Zaragoza (Spain). *Environmental Research*, 2005, vol. 99 (1), pp. 58–67. DOI: 10.1016/j.envres.2005.01.007
4. Pongpiachan S., Iijima A. Assessment of selected metals in the ambient air PM10 in urban sites of Bangkok (Thailand). *Environmental Science and Pollution Research International*, 2016, vol. 23 (3), pp. 2948–2961. DOI: 10.1007/s11356-015-5877-5
5. Byeon S.H., Willis R., Peters T.M. Chemical characterization of outdoor and subway fine (PM(2.5-1.0)) and coarse (PM(10-2.5)) particulate matter in Seoul (Korea) by computer-controlled scanning electron microscopy (CCSEM). *Environmental Research and*

- Public Health*, 2015, vol. 12 (2), pp. 2090–2104. DOI: 10.3390/ijerph120202090
6. Zeb B., Alam K., Sorooshian A., Blaschke T., Ahmad I., Shahid I. On the morphology and composition of particulate matter in an urban environment. *Aerosol and Air Quality Research*, 2018, vol. 18 (6), pp. 1431–1447. DOI: 10.4209/aaqr.2017.09.0340
 7. Remoundaki E., Bourliava A., Kokkalis P., Mamouri R.E., Papanannas A., Grigoratos T., Samara C., Tsezos M. PM10 composition during an intense Saharan dust transport event over Athens (Greece). *The Science of Total Environment*, 2011, vol. 409 (20), pp. 4361–4372. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2011.06.026
 8. Minguillón M.C., Querol X., Baltensperger U., Prévôt A.S. Fine and coarse PM composition and sources in rural and urban sites in Switzerland: local or regional pollution? *The Science of the Total Environment*, 2012, vol. 427–428, pp. 191–202. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2012.04.030
 9. Hsu C.Y., Chiang H.C., Lin S.L., Chen M.J., Lin T.Y., Chen Y.C. Elemental characterization and source apportionment of PM10 and PM2.5 in the western coastal area of central Taiwan. *The Science of the Total Environment*, 2016, vol. 541, pp. 1139–1150. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.09.122
 10. Caggiano R., Sabia S., Speranza A. Trace elements and human health risks assessment of finer aerosol atmospheric particles (PM1). *Environmental Science and Pollution Research International*, 2019, vol. 26 (36), pp. 36423–36433. DOI: 10.1007/s11356-019-06756-w
 11. Sun Y., Hu X., Wu J., Lian H., Chen Y. Fractionation and health risks of atmospheric particle-bound As and heavy metals in summer and winter. *The Science of the Total Environment*, 2014, vol. 493, pp. 487–494.
 12. Lukashenko S.N. *Aktualnye voprosy radioekologii Kazakhstana* [Topical issues in radioecology of Kazakhstan]. Pavlodar, Dom pechati Publ., 2015. Iss. 5, 356 p.
 13. *EMEP. Sovmestnaya Programma monitoringa i otenki dalnego atmosfernogo perenosa zagryaznyayushchikh veshchestv v Evrope* [EMEP. Co-operative Programme for Monitoring and Evaluation of the long-range transmissions of air pollutants in Europe]. 2002. Available at: <https://www.twirpx.com/file/660296/> (accessed 15 September 2021).
 14. *Water quality. Application of inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) P. 2: Determination of 62 elements. ISO 17294-2:2003 (E)*. Switzerland. 2003. Available at: <https://www.iso.org/standard/36127.html> (accessed 15 September 2021).
 15. Temirzhanova A.E., Dyusembayeva M.T., Lukashenko S.N., Yazikov E.G., Shakenov E.Z. Elemental composition of snow cover solid phase in small settlements (the case of Dolon village, Republic of Kazakhstan). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 12, pp. 41–50. In Rus. DOI: 10.18799/24131830/2020/12/2937
 16. *Gigienicheskie normativy k atmosfernomu vozdukh v gorodskikh i selskikh naseleennykh punktakh. Utverzhdeny prikazom Ministra natsionalnoy ekonomiki Respubliki Kazakhstan ot 28 fevralya 2015 goda № 168* [Health Standards for the ambient air in urban and rural settlements. Approved by order of the Minister of National Economy of the Republic of Kazakhstan dated February 28, 2015 № 168]. Astana, Adilet Publ., 2015. 322 p. Available at: <http://adilet.zan.kz/rus/docs/V1500011036/links> (accessed 15 September 2021).
 17. Raputa V.F., Khodzher T.V., Gorshkov A.G., Koutzenogii K.P. Aerosol falls on snow cover on the outskirts of Siberian towns. *Journal of Aerosol Science*, 1998, vol. 29, no. 2, pp. 807–808. In Rus.
 18. Arbuзов S.I. Metal-bearing capacity of coal in Siberia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2007, vol. 311, no. 1, pp. 77–83. In Rus. Available at: http://www.lib.tpu.ru/fulltext/v/Bulletin_TPU/2007/v311/1/13.pdf (accessed 15 September 2021).
 19. Hu W., Downward G., Wong J.Y.Y., Reiss B., Rothman N., Portengen L., Li J., Jones R.R., Huang Y., Yang K., Chen Y., Xu J., He J., Bassig B., Seow W.J., Hosgood H.D., Zhang L., Wu G., Wei F., Vermeulen R., Lan Q. Characterization of outdoor air pollution from solid fuel combustion in Xuanwei and Fuyuan, a rural region of China. *Scientific Reports*, 2020, vol. 10, 11335. DOI: 10.1038/s41598-020-68229-2.
 20. Secret M.H., Schauer J.J., Carter E.M., Baumgartner J. Particulate matter chemical component concentrations and sources in settings of household solid fuel use. *Indoor Air*, 2017, vol. 27 (6), pp. 1052–1066. DOI: 10.1111/ina.12389.
 21. Lai A.M., Clark S., Carter E., Shan M., Ni K., Yang X., Baumgartner J., Schauer J.J. Impacts of stove/fuel use and outdoor air pollution on chemical composition of household particulate matter. *Indoor Air*, 2020, vol. 30 (2), pp. 294–305. DOI: 10.1111/ina.12636.
 22. Offor I.F., Adie G.U., Ana G.R. Review of particulate matter and elemental composition of aerosols at selected locations in Nigeria from 1985–2015. *Journal of Health and Pollution*, 2016, vol. 6 (10), pp. 1–18. DOI: 10.5696/2156-9614-6-10.1.
 23. Bozkurt Z., Gaga E.O., Taşpınar F., Arı A., Pekey B., Pekey H., Döğeroğlu T., Üzmez Ö.Ö. Atmospheric ambient trace element concentrations of PM10 at urban and sub-urban sites: source apportionment and health risk estimation. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2018, vol. 190 (3), 168. DOI: 10.1007/s10661-018-6517-6.
 24. Park K., Dam H.D. Characterization of metal aerosols in PM10 from urban, industrial, and Asian dust sources. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2010, vol. 160 (1–4), pp. 289–300. DOI: 10.1007/s10661-008-0695-6.
 25. Rodríguez S., Querol X., Alastuey A., Viana M.M., Alarcón M., Mantilla E., Ruiz C.R. Comparative PM10-PM2.5 source contribution study at rural, urban and industrial sites during PM episodes in Eastern Spain. *The Science of the Total Environment*, 2004, vol. 328 (1–3), pp. 95–113. DOI: 10.1016/S0048-9697(03)00411-X.
 26. Genga A., Siciliano T., Siciliano M., Aiello D., Tortorella C. Individual particle SEM-EDS analysis of atmospheric aerosols in rural, urban, and industrial sites of Central Italy. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2018, vol. 190 (8), 456. DOI: 10.1007/s10661-018-6826-9
 27. Grigoryev N.A. *Raspreделение khimicheskikh elementov v verkhney chasti kontinentalnoy kory* [Distribution of chemical elements in top continental crust]. Yekaterinburg, Ural Branch RAN Publ., 2009. 383 p.
 28. Alekseyenko V. A. *Khimicheskije elementy v geokhimicheskikh sistemakh. Klarki pochv selitebnykh landshaftov* [Chemical elements in geochemical systems. Clarks of soils in landscapes intended for building]. Rostov-on-Don, SFedU Publ., 2013. 388 p.

Received: 16 September 2021.

Information about the authors

Aray E. Temirzhanova, engineer, National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan.

Egor G. Yazikov, Dr. Sc., professor, National Tomsk Research Polytechnic University.

Madina T. Dyusembayeva, head of the elemental analysis laboratory, National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan.

Erbol Z. Shakenov, engineer, National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan.

Nurlan Zh. Mukhamediyarov, engineer, National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan.

Azhar Zh. Tashekova, engineer, National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan.

Gani M. Esilkanov, engineer, National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan.

Vladimir V. Kolbin, engineer, National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan.

Murat A. Umarov, deputy director of the Institute of Radiation Safety and Ecology, National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan.

УДК 622.413.4

СПОСОБЫ НОРМАЛИЗАЦИИ МИКРОКЛИМАТА В ГЛУБОКИХ ПРОТЯЖЕННЫХ ТУПИКОВЫХ ВЫРАБОТКАХ

Ольховский Дмитрий Владимирович¹,
demexez@gmail.com

Зайцев Артем Вячеславович¹,
aerolog.artem@gmail.com

Шалимов Андрей Владимирович¹,
shalimovav@mail.ru

Давыдов Андрей Александрович²,
Davydovaa@normik.ru

¹ Горный институт уральского отделения российской академии наук,
Россия, 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78а.

² ПАО «ГМК "Норильский Никель"»,
Россия, 123100, г. Москва, 1-й Красногвардейский проезд, 15.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью рудников решать новые проблемы нормализации микроклимата, возникающие при проходке все более глубоких и нагретых породных массивов протяженными тупиковыми выработками.

Цель: определить эффективность различных способов нормализации микроклимата в забое разведочной выработки-2 ПАО «ГМК "Норильский никель"».

Объекты: геологоразведочная выработка-2 ПАО «ГМК "Норильский никель"».

Методы: численное моделирование тепломассопереноса в атмосфере горной выработки, проведение сравнительного анализа результатов моделирования.

Результаты. Рассмотрены способы нормализации микроклимата в глубоких протяженных тупиковых выработках, их особенности, преимущества и недостатки. Представлена математическая модель тепломассопереноса в атмосфере горной выработки с вентиляционным трубопроводом, учитывающая конвективный и лучистый теплообмен. Представлены результаты расчета различных способов снижения температуры воздуха, подаваемого в забой геологоразведочной выработки, строящейся на медно-никелевом руднике компании ПАО «ГМК "Норильский никель"». Проведен сравнительный анализ различных горнотехнических и теплотехнических мероприятий по снижению температуры воздуха в забое выработки до значений, допустимых согласно Правилам безопасности. Выявлено, что увеличение объема подачи воздуха не позволяет значительно снизить температуру в забое. Применение теплоизолированного вентиляционного трубопровода существенно снижает температуру подаваемого в забой воздуха, но её значение по-прежнему остается выше допустимых значений. Показано, что использование камеры орошения позволяет обеспечить допустимую температуру воздуха в зимний период, но не позволяет обеспечить её в летний период. Наиболее универсальным, эффективным, но дорогостоящим способом снижения температуры воздуха является применение подземных систем кондиционирования воздуха на базе пароконпрессорных машин.

Ключевые слова:

Тупиковая выработка, глубокий рудник, микроклимат, орошение, теплоизоляция, кондиционирование, вентиляционный трубопровод.

Введение

Увеличение глубины ведения горных работ ведет к росту температуры вскрываемого породного массива, который в свою очередь приводит к более интенсивному нагреву воздуха, двигающегося по выработкам [1–4]. Помимо этого, применение все более высокопроизводительной техники ведет к увеличению тепловыделений в атмосферу горных выработок [5–7]. В результате температура воздуха в горных выработках может существенно превышать предельно-допустимые значения – возникает вопрос о разработке мероприятий по её снижению.

Особую сложность представляют новые тупиковые выработки большой протяженности, которые прокладывают на больших глубинах. Помимо обеспечения требуемым количеством воздуха забоя, расположенного на расстоянии нескольких километров

от точки забора свежего воздуха, необходимо также обеспечить температуру подаваемого воздуха не выше предельно допустимой (+26 °С) [8], т. к. воздух, двигаясь по вентиляционному трубопроводу, проложенному по тупиковой выработке, сильно нагревается в результате теплообмена с исходящей струей воздуха, двигающейся по самой выработке, и горячим горным массивом. На данный момент ПАО «ГМК "Норильский никель"» ведет проходку геологоразведочной выработки-2 (РВ-2) на руднике «Скалистый», которая должна соединить вентиляционный ствол № 10 (далее ВС-10) и скипо-клетевой ствол № 1 (далее СКС-1) (рис. 1). Общая длина выработки будет составлять порядка 1830 м, средняя глубина, на которой ведутся работы, составляет 1943 м, а температура нетронутого породного массива в месте проходки выработки составляет 52 °С.

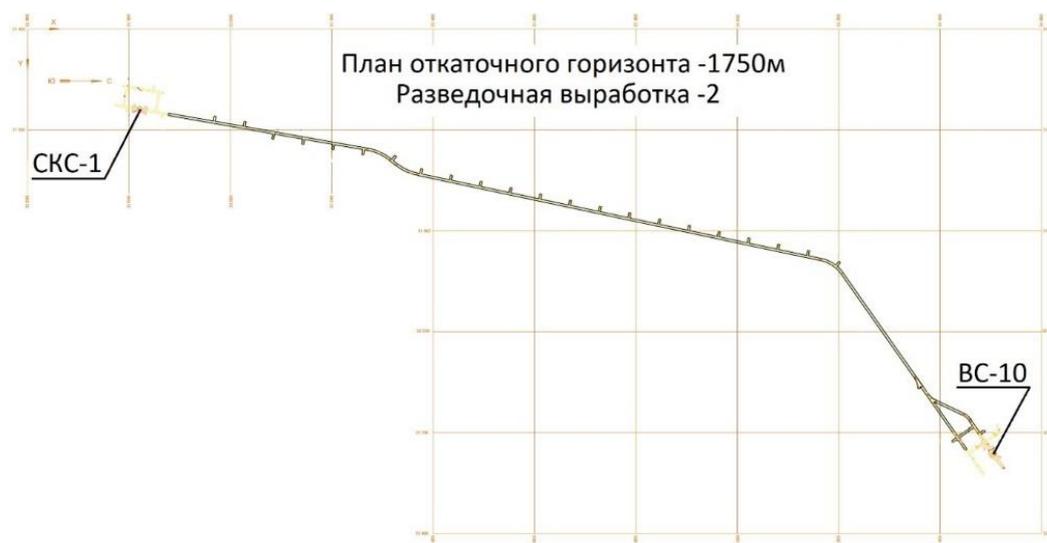


Рис. 1. План выработки РВ-2

Fig. 1. Layout exploration drift (ED-2)

Проветривание выработки осуществляется вентиляторами, расположенными на поверхности, они подают воздух по вентиляционным трубопроводам, проложенным в стволе ВС-10, в объеме $20 \text{ м}^3/\text{с}$. Особенностью на данном объекте является температура воздуха, подаваемого на горизонт выработки РВ-2, которая колеблется строго в диапазоне $20\text{--}21 \text{ }^\circ\text{C}$ вне зависимости от периода года и температуры воздуха, подаваемого в ствол [9, 10]. Это происходит из-за того, что через ствол ВС-10 удаляется воздух из шахты «Верхняя» с горизонта 980 м, который имеет температуру $22,5 \text{ }^\circ\text{C}$ и высокую относительную влажность 76 %, – поднимаясь по стволу, воздух охлаждается до температуры $15,8 \text{ }^\circ\text{C}$ и проходит точку росы, происходит обильная конденсация влаги, которая в виде капель и струй по стенкам опускается по стволу [11]. Температура конденсируемой влаги равна температуре точки росы, а объем достаточно большой, чтобы охлаждать воздух в вентиляционных трубопроводах по всей его длине, в результате чего температура воздуха из трубопровода на сопряжении с горизонтом 1750 м стабильно держится на уровне $20\text{--}21 \text{ }^\circ\text{C}$.

Далее этот воздух подается в забой по вентиляционным трубопроводам, проложенным вдоль РВ-2. По мере проходки выработки и увеличения длины вентиляционного трубопровода для подачи требуемого количества воздуха будут последовательно установлены два вентилятора местного проветривания, которые за счет своей работы увеличат температуру подаваемого воздуха. В результате работы вентиляторов местного проветривания и нагрева воздуха внутри вентиляционного трубопровода от теплообмена с исходящей воздушной струей и горным массивом в выработке температура воздуха, подаваемого в забой, будет превышать предельно допустимую температуру и ведение работ может быть остановлено.

Целью настоящей статьи является анализ способов нормализации микроклимата в рабочих зонах забоев протяженных тупиковых выработок на большой глубине с учетом их особенностей.

Способы нормализации микроклимата в забое глубоких и протяженных выработок

По мере движения воздуха по вентиляционному трубопроводу в выработке происходит его нагрев за счет конвективного теплообмена с движущейся по выработке исходящей струей через стенку вентиляционного трубопровода. Интенсивность нагрева воздуха внутри вентиляционного трубопровода зависит от двух основных факторов, на которые можно повлиять для снижения температуры воздуха, подаваемого в забой: это скорость движения воздуха внутри трубопровода и термическое сопротивление стенки трубопровода. При этом скорость движения воздуха в самой выработке здесь как отдельный фактор не берется в расчет, так как она определяется скоростью движения воздуха внутри воздуховода. При увеличении скорости движения воздуха (увеличения объема подачи) и увеличении термического сопротивления стенки (нанесения слоя теплоизоляции) интенсивность нагрева воздуха внутри трубопровода уменьшается, в результате температура воздуха, подаваемого в забой, может быть снижена. Эти способы представляются наименее трудозатратными.

Помимо этого, для снижения температуры воздуха, подаваемого в забой, возможно применение систем орошения воздуха. Поскольку воздух подается с поверхности, где его влагосодержание большую часть года остается незначительной [12], и по мере движения по вентиляционным трубопроводам нигде напрямую не контактирует с водой, имеется возможность охлаждения его непосредственно перед забоем за счет испарения в воздухе распыленной в камере орошения воды. Такие системы считаются относительно простыми и не требующими больших капитальных и эксплуатационных затрат, однако их эффективность сильно зависит от внешних факторов, таких как температура и влагосодержание воздуха на поверхности, герметичность вентиляционных трубопроводов, проходящих по стволу. Таких недостатков лишены систе-

мы кондиционирования, однако стоимость их установки и эксплуатации значительно выше, чем у предложенных ранее способов.

Модель тепломассопереноса в выработке и вентиляционном трубопроводе

Для оценки способов охлаждения воздуха, подаваемого в забой, необходимо определять его температуру при различных условиях. Для этого была построена математическая модель тепломассопереноса [13] в воздушном потоке внутри вентиляционного трубопровода, учитывающая конвективный и лучистый механизмы теплообмена в системе «воздух в трубопроводе – стенка трубопровода – воздух в выработке – породный массив», а также нагрев воздуха от работы вентиляторов местного проветривания. Для определения температуры воздуха по длине трубопровода можно выделить на расстоянии x от начала трубопровода элементарный участок длиной dx и составить для него уравнение теплового баланса:

$$\frac{dq_1}{dt} = w_1 + q_0 \delta(x - x_0)$$

или в более развернутом виде с учетом стационарности тепломассопереноса:

$$G_1 \cdot c_p \cdot \frac{dT_1}{dx} = k_{wi} \cdot (T_{wo} - T_1) \cdot \pi + q_0 \cdot \delta(x - x_0), \quad (1)$$

где q_1 – теплосодержание малого объема воздуха $S_1 dx$ в вентиляционном трубопроводе Дж; S_1 – поперечное сечение проточной области трубопровода, м²; w_1 – тепловой поток к малому объему воздуха от стенки трубопровода на отрезке длиной dx , Вт; q_0 – мощность точечного теплового источника (вентилятора), Дж; $\delta(x - x_0)$ – дельта функция Дирака; x – координата по длине горной выработки, м; x_1 – координата точечного теплового источника, м; G_1 – массовый расход воздуха внутри вентиляционного трубопровода, кг/с; c_p – удельная теплоемкость воздуха, Дж/(кг·°C); T – температура воздуха в вентиляционном трубопроводе, °C; T_{wo} – температура внешней поверхности стенки вентиляционного трубопровода, °C; T_1 – температура воздуха внутри вентиляционного трубопровода, °C; $\pi = 3,14$ – математическая постоянная, равная отношению длины окружности к её диаметру; k_{wi} – линейный коэффициент теплопередачи через стенку трубопровода и пограничный слой воздушного потока на внутренней границе трубопровода, Вт/(м·°C).

Коэффициент k_{wi} определяется по формуле:

$$k_{wi} = \frac{1}{\frac{1}{a_{in} d_{in}} + \frac{1}{2\lambda_w} \ln \frac{d_{out}}{d_{in}}},$$

где a_{in} – коэффициент теплоотдачи воздуха в пограничном слое на внутренней стенке вентиляционного трубопровода, Вт/(м²·°C); d_{in} – внутренний диаметр вентиляционного трубопровода, м; λ_w – коэффициент теплопроводности стенки вентиляционного трубопровода, Вт/(м·°C); d_{out} – внешний диаметр вентиляционного трубопровода, м.

Для определения температуры воздуха в выработке составляется еще одно уравнение теплового баланса:

$$\begin{aligned} \frac{dq_2}{dt} &= w_2 + w_3, \\ G_{out} \cdot c_p \cdot \frac{dT_2}{dx} &= (T_{wo} - T_2) \cdot a_{wo} \cdot P_{wo} + \\ &+ (T_{out} - T_r) \cdot a_r \cdot P_r, \end{aligned} \quad (2)$$

где q_2 – теплосодержание малого объема воздуха $S_2 dx$ в выработке, Дж; S_2 – поперечное сечение проточной области выработки, м²; w_2 – тепловой поток от малого объема воздуха к стенке трубопровода на отрезке длиной dx , Вт; w_3 – тепловой поток от окружающего породного массива к малому объему воздуха на отрезке длиной dx , Вт; G_2 – массовый расход воздуха, двигающегося по выработке, кг/с; T_2 – температура воздуха в выработке, °C; a_{wo} – коэффициент теплоотдачи воздуха снаружи вентиляционного трубопровода, Вт/(м²·°C); P_{wo} – периметр наружной стенки трубопровода, м; T_{wo} – температура внешней стенки трубопровода, °C; a_r – коэффициент теплоотдачи воздуха на поверхности выработки, Вт/(м²·°C); P_r – периметр горной выработки, м; T_r – температура окружающего породного массива, °C.

Коэффициент теплоотдачи между воздухом и горной породой определяется по формуле Щербаня [14]:

$$a_r = 3,4 \cdot \frac{V_2^{0,8}}{d_r^{0,2}}, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)},$$

где V_2 – скорость воздуха внутри выработки, м/с; d_r – эквивалентный диаметр выработки, м.

Коэффициент теплоотдачи воздуха в пограничном слое на внутренней стенке вентиляционного трубопровода определяется исходя из безразмерного комплекса (числа Нуссельта Nu) по формуле:

$$a_{in} = \frac{\lambda}{d_{wi}} \cdot Nu, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)}, \quad (3)$$

где λ – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·°C);

Число Нуссельта определяется по эмпирической формуле Михеева [15]:

$$Nu = 0,021 \cdot Pr^{0,8} \cdot Re_1^{0,43},$$

где Pr – число Прандтля, которое для воздуха в турбулентном режиме течения принимается равным 0,71; Re – число Рейнольдса, которое определяется по формуле:

$$Re_1 = \frac{V_1 \cdot d_{wi}}{\nu}, \quad (4)$$

где V_1 – скорость воздуха в вентиляционном трубопроводе, м/с; ν – кинематическая вязкость воздуха, определяется по справочным материалам [15], м²/с.

Коэффициент теплоотдачи снаружи вентиляционного трубопровода (a_{wo}) определяется также по формуле (3), но число Нуссельта находят по другой формуле, соответствующей случаю параллельного обтекания потоком круглой трубы:

$$Nu = 0,037 \cdot Pr^{0,43} \cdot Re_2^{0,8}. \quad (5)$$

В качестве числа Прандтля в (5) также принимается величина 0,71, а величина числа Рейнольдса определяется по формуле, аналогичной (4):

$$Re_2 = \frac{V_2 \cdot d_{wo}}{\nu},$$

где V_2 – скорость воздуха в выработке, м/с;

Для определения температуры внешней поверхности стенки трубопровода необходимо составить третье уравнение теплового баланса для малого объема воздуха, в котором будет учтен лучистый теплообмен между поверхностью трубопровода и стенками выработки:

$$\frac{(T_{wo} - T_1) \cdot \pi}{\frac{1}{a_{in} \cdot d_{in}} + \frac{1}{2\lambda_{ст}} \log \frac{d_{out}}{d_{in}}} = (T_2 - T_{wo}) \cdot a_{wo} \cdot P_{wo} + \varepsilon \cdot C_0 \cdot \left[\left(\frac{T_r + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{wo} + 273}{100} \right)^4 \right] \cdot P_{wo}, \quad (6)$$

где ε – степень черноты поверхности трубопровода, определяется по справочникам; $C_0=5,67$ – коэффициент излучения абсолютно черного тела.

Далее численно решается система уравнений (1), (2), (6) и строится график зависимости температуры от длины вентиляционного трубопровода при следующих граничных условиях:

$$T_1(0) = T_{ul},$$

$$T_2(L) = T_{de},$$

где T_{ul} – замеренная температура воздуха, подаваемого на горизонт, °С. В рассматриваемом случае $T_{гор}=21$ °С; L – протяженность рассматриваемого участка, м. В рассматриваемом случае $L=1830$ м; T_{de} – температура воздуха в забое, °С.

Для упрощения расчета в модели были приняты следующие допущения:

- поверхность вентиляционного трубопровода однородна;
- теплоемкость воздуха принята постоянной;
- плотность воздуха по всей длине трубопровода принимается постоянной;
- температура поверхности породного массива принимается постоянной и одинаковой по всей длине выработки.

Увеличение подачи воздуха

Наиболее простым способом снижения температуры воздуха, подаваемого в забой, является увеличение объема подачи свежего воздуха, однако ввиду невозможности замены поверхностных вентиляционных установок и вентиляционных труб, идущих по стволу, увеличение подачи возможно только за счет уменьшения утечек воздуха. Согласно техническим решениям, которые были заложены при проектировании РВ-2, при максимальном удалении (1830 м) забоя выработки от ствола ВС-10, применении стальных вентиляционных трубопроводов и подаче на горизонт $20 \text{ м}^3/\text{с}$ в забой будет подаваться только $12,3 \text{ м}^3/\text{с}$, остальная часть воздуха будет потеряна в виде утечек [16]. Увеличить объем подачи воздуха в забой за счет снижения утечек в трубопроводах выработки можно за счет применения высокопрочных и не изношенных гибких вентиляционных трубопроводов или гермети-

зации стальных. Так, для высокопрочных гибких вентиляционных трубопроводов Protan AS, согласно паспортным характеристикам, утечки при длине 1800 м составят 15 % и при подаче $20 \text{ м}^3/\text{с}$ на горизонт до забоя выработки дойдет $17,4 \text{ м}^3/\text{с}$.

Для оценки снижения температуры воздуха, подаваемого в забой, от увеличения объема подаваемого воздуха были построены графики температуры воздуха внутри вентиляционного трубопровода при данных расходах (рис. 2).

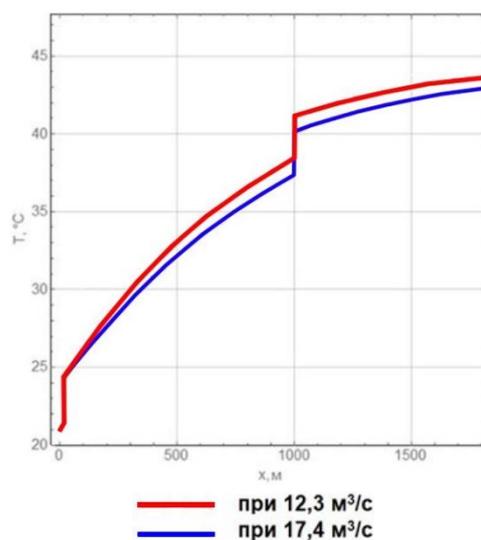


Рис. 2. График температуры воздуха внутри вентиляционного трубопровода в зависимости от объема подачи воздуха в забой

Fig. 2. Graph of dependence of the air temperature inside the air duct on the flow rate air supply to the face drifts

Скачки температуры в начале графика и на удалении в 1000 м от ствола ВС-10 показывают зависимость роста температуры от работы вентиляторов местного проветривания. В результате нагрева воздуха от работы вентиляторов и теплообмена с окружающей средой в выработке температура воздуха, подаваемого в забой при расходе $12,3 \text{ м}^3/\text{с}$, составит $43,7$ °С. Увеличение подачи воздуха с $12,3$ до $17,4 \text{ м}^3/\text{с}$ привело к снижению температуры воздуха в забое с $43,7$ до $43,0$ °С, что на $0,7$ °С ниже и по-прежнему значительно превышает предельно допустимую температуру воздуха 26 °С [8]. В результате можно сделать вывод, что увеличение подачи количества воздуха в забой несущественно влияет на его температуру. Такой незначительный эффект, несмотря на практически полуторакратное увеличение объема подачи воздуха, происходит из-за того, что при увеличении расхода воздуха коэффициент теплоотдачи также увеличивается по закону, который близок к линейному, – это следует из формул (6) и (8).

Применение теплоизолированного трубопровода

Другим способом снижения температуры воздуха, подаваемого в забой, является снижение теплового влияния исходящей струи воздуха в выработке и лу-

чистого теплообмена с горным массивом на температуру воздуха в вентиляционном трубопроводе. Это может быть достигнуто путем нанесения слоя теплоизоляции на поверхность трубопровода. Теплоизоляция позволит снизить нагрев от конвективного теплообмена воздуха в вентиляционном трубопроводе с воздухом в горной выработке через стенку трубопровода, а также нагрев от лучистого теплообмена между поверхностью трубопровода и поверхностью породного массива за счет увеличения температуры поверхности трубопровода.

В качестве теплоизоляции могут использоваться маты минераловатные, которые имеют следующие теплотехнические характеристики:

Таблица 1. Теплотехнические характеристики мат минераловатных

Table 1. Burning characteristics of mineral wool insulation

Теплоизоляция Insulation	Теплопроводность, Вт/(м·°С) Thermal conductivity, W/(m·°C)	Удельная теплемкость, Дж/(кг·°С) Specific thermal capacity, J/(kg·°C)	Плотность, кг/м ³ Density, kg/m ³
Маты минераловатные Mineral wool insulation	0,07	840	150

Критический диаметр теплоизоляции вентиляционного трубопровода рассчитывается по формуле:

$$d_{кр} = \frac{2 \cdot \lambda_{la}}{a_{wo}}, \text{ м,}$$

где λ_{la} – коэффициент теплопроводности теплоизоляции вентиляционного трубопровода, Вт/(м·°С).

Величина критического диаметра для мат минераловатных в рассматриваемом диапазоне коэффициента теплоотдачи наружной стенки вентиляционного трубопровода (a_{wo}) 1–15 Вт/(м²·°С) составит 0,14–0,0093 м, что существенно ниже диаметра рассматриваемых вентиляционных ставов (1,2 м), поэтому даже минимальное наращивание слоя теплоизоляции является обоснованным с точки зрения уменьшения теплотеперьтлений.

Расчет был произведен для четырех толщин слоя теплоизоляции – 20, 50, 100 и 150 мм. Результаты расчета представлены на рис. 3.

Как видно из рис. 3, 20 и 50 мм теплоизоляционного слоя снижают температуру воздуха, подаваемого в забой выработки, с 43,7 °С, на 6,6 и 10,8 °С соответственно, дальнейшее наращивание теплоизоляции дает меньшее приращение, так при 100 мм температура воздуха дополнительно снижается еще на 2,5 °С по сравнению с 50 мм, а при 150 мм – на 1 °С по сравнению со 100 мм теплоизоляции. При выборе толщины теплоизоляции стоит помнить о том, что наружный диаметр вентиляционного трубопровода возрастает, а следовательно для него необходимо больше места в выработке, что может привести к необходимости увеличения сечения выработки.

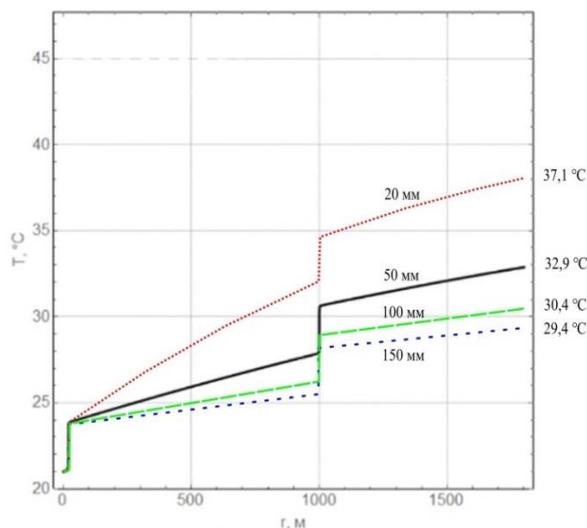


Рис. 3. График температуры воздуха внутри вентиляционного трубопровода при различной толщине теплоизоляции

Fig. 3. Graph of dependence of the air temperature inside the air duct on the thermal insulation depth

Стоит отметить, что при использовании теплоизолированных трубопроводов существенную роль в росте температуры воздуха начинают играть вентиляторы местного проветривания, которые, по данным натурных измерений, нагревают воздух на 5–6 °С, в то время как роль конвективного и лучистого теплообмена снижается.

Таким образом, применение теплоизолированных трубопроводов является значительно более эффективным способом снижения температуры воздуха, подаваемого в забой выработки, чем увеличение объема подаваемого воздуха, но по-прежнему недостаточным, так как превышает предельно допустимое значение 26 °С.

Применение оросителей воздуха

Одним из способов охлаждения воздуха без применения парокомпрессионных холодильных машин является адиабатическое увлажнение воздуха, т. е. применение камеры орошения на конце вентиляционного трубопровода. Камера состоит из корпуса, внутри которого расположены форсунки, распыляющие воду, каплеуловители и поддон, в который стекает неотработанная вода. При подаче воздуха через камеру распыленная вода начинает испаряться и за счет этого охлаждаться, одновременно охлаждая и увлажняя воздух.

Эффективность способа зависит от относительной влажности воздуха и барометрического давления. Чем выше барометрическое давление и выше относительная влажность воздуха, тем ниже эффективность, и наоборот, чем ниже барометрическое давление и ниже относительная влажность, тем выше их эффективность. Таким образом, если воздух подается с поверхности, эффективность камер орошения в летний период будет ниже, чем в зимний, т. к. летом воздух значительно более влажный, чем зимой. Современ-

ные камеры орошения позволяют таким способом увлажнить воздух до состояния, когда его относительная влажность будет составлять 85–95 %.

В данном случае воздух подается с поверхности по вентиляционным трубопроводам и нигде не контактирует с водой. Для расчета параметры воздуха приняты по СП 131.13330.2018 [12] для ближайшего населенного пункта города Дудинка и приведены в табл. 2.

Таблица 2. Параметры наружного воздуха

Table 2. Atmosphere parameters

Период года Season	Температура Temperature, °C	Относительная влажность, % Relative air humidity, %	Влагосодержание (определено по i-d диаграмме), г/кг Specific humidity, g/kg	Атмосферное давление, гПа Barometric pressure, hPa
Зимний Winter	–47	74	0,04	1011
Летний Summer	18,5	72	9,6	

Далее, по i-d диаграмме влажного воздуха для атмосферного давления было определено влагосодержание воздуха на поверхности, т. е. в отличие от относительной влажности при одинаковой температуре с ростом барометрического давления оно остается одинаковым.

Затем на i-d диаграмму, рассчитанную для барометрического давления, соответствующего глубине –1943 м [17–19], были нанесены процессы изменения состояния влажного воздуха (рис. 4). Процессы 1–3 соответствуют зимнему периоду года, а 4–6 – летнему. Процессы 1, 2 и 4, 5 показывают нагрев воздуха по мере его движения по трубопроводам и для зимнего периода в калориферной, без увлажнения. Процессы 2, 3 и 5, 6 показывают адиабатическое увлажнение воздуха в камере орошения до 90 % относительной влажности.

Результаты построений сведены в табл. 3.

Как видно из табл. 3, в зимний период воздух, подаваемый в забой, является очень сухим, практически с нулевым содержанием влаги, что позволяет его охлаждать с помощью камеры орошения до температуры 19,1 °С. В летний же период, из-за повышения влагосодержания в наружном воздухе, эффективность камеры орошения значительно падает, и температура, до которой она способна охлаждать воздух (27,3 °С), уже превышает предельно допустимое значение.

Таким образом, применение камеры орошения для охлаждения воздуха без применения системы кондиционирования в РВ-2 является наиболее эффективным способом и позволяет обеспечить допустимые температуры воздуха в забое в зимний период, однако в летний период этой меры будет недостаточно. Стоит учесть, что из-за возрастающего влагосодержания в воздухе после его орошения при дальнейшем его нагреве в выработке микроклиматические параметры существенно ухудшаются [20].

Таблица 3. Результаты построения процессов состояния влажного воздуха на i-d диаграмме для давления на глубине –1943 м для летнего и зимнего периода года

Table 3. Results of generation of air irrigation on the i-d diagram for pressure at a depth of –1943 for winter and summer seasons

Точка Point	Температура Temperature, °C	Относительная влажность, % Relative air humidity, %	Влагосодержание (определено по i-d диаграмме), г/кг Specific humidity, g/kg
Зимний период/Winter			
1	–47	74 / 97*	0,04
2	43,7	0	0,04
3	19,1	90	9,8
Летний период/Summer			
4	18,5	72 / 92*	9,6
5	43,7	22	9,6
6	27,3	90	16,2

*Первое значение дано для давления на поверхности, второе – для глубины –1943 м/The first amount is given for surface pressure, the second – for a depth of –1943 m

Применение систем кондиционирования воздуха

Применение системы кондиционирования воздуха (далее – СКВ), основанной на парокомпрессионных холодильных машинах, позволяет решить большинство вопросов по нормализации микроклимата в выработках, однако является наиболее дорогим решением как в плане капитальных затрат, так и в плане эксплуатационных, поэтому к его применению стараются прибегать только в случае, если другими способами нормализовать микроклимат не удастся [21]. Так, согласно произведенным расчетам, для обеспечения температуры подаваемого в забой воздуха, равной +25 °С, в летний период года необходим кондиционер с холодопроизводительностью 700 кВт.

Из особенностей расчета холодопроизводительности в данном случае стоит обратить внимание на то, что на данной глубине из-за роста барометрического давления температура точки росы значительно возросла. Так, если для воздуха с температурой 43,7 °С и влагосодержанием 9,6 г/кг температура точки росы составит 14,6 °С, то на глубине 1943 м уже 17,1 °С. Это значит, что при охлаждении воздуха температура точки росы на поверхности воздухоохладителя будет достигнута раньше, а количество конденсируемой влаги увеличится, как следствие возрастает требуемая холодопроизводительность.

Поскольку холодильная машина размещается в околоствольном дворе и из-за большой протяженности выработки, требуется прокладка достаточно протяженной трассы с хладоносителем. Согласно расчетам, даже при нанесении 10 мм теплоизоляционного слоя из минеральной ваты потери холода, которые были учтены в расчете, составят порядка 80 кВт. Таким образом, применение СКВ позволяет обеспечить допустимые микроклиматические параметры воздуха в забое круглогодично, однако является наиболее сложным в плане реализации и наиболее дорогим способом.

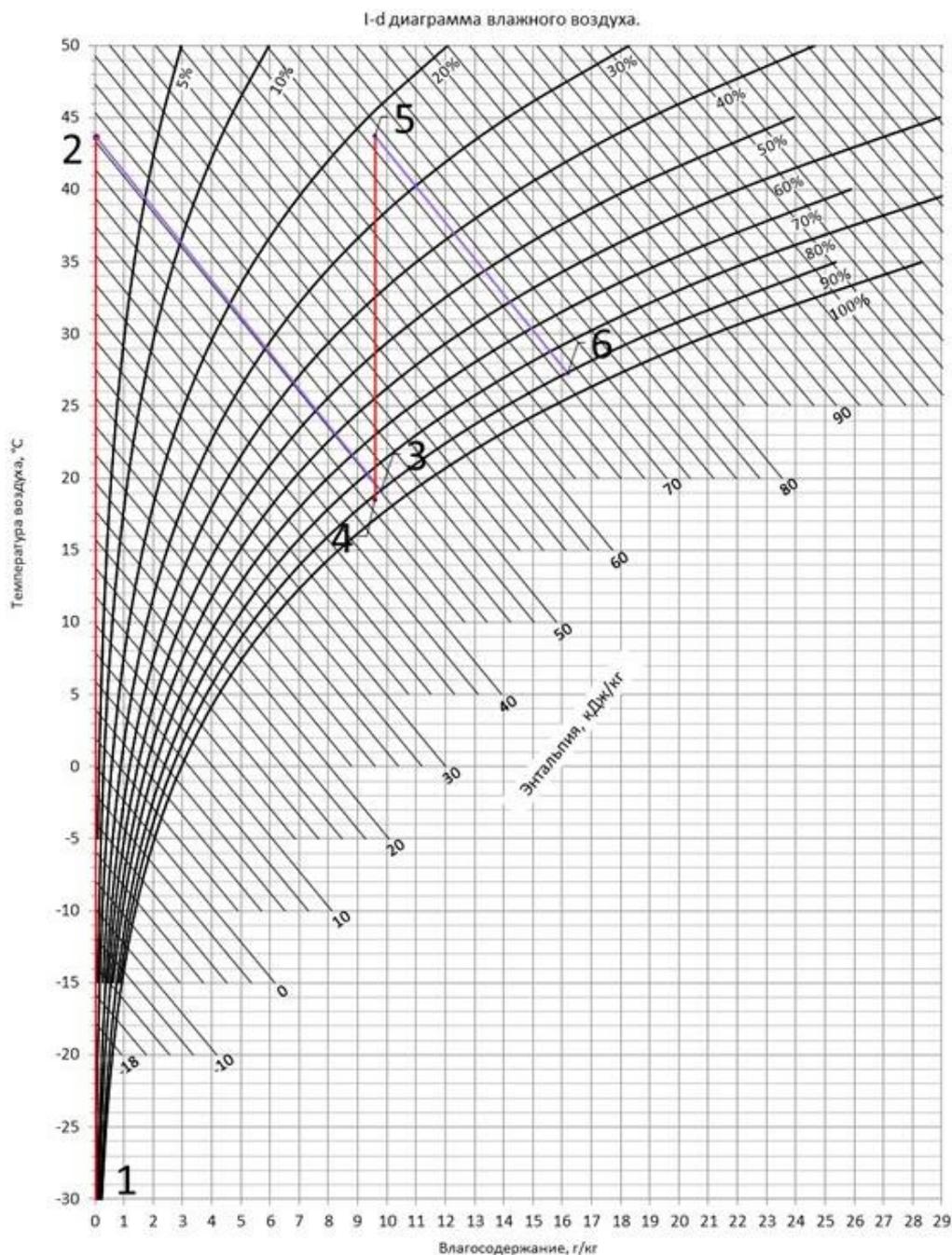


Рис. 4. Результаты построения процессов состояния влажного воздуха для камеры орошения на *i-d* диаграмме для давления на глубине –1943 м для летнего и зимнего периода года

Fig. 4. *i-d* diagram for pressure on the depth of –1943 m with processes of air irrigation for winter and summer seasons

Результаты расчетов способов нормализации микроклимата в РВ-2 сведены в табл. 4.

Эффективность применения камеры орошения может быть увеличена за счет использования теплоизолированных трубопроводов и увеличения расхода воздуха. Требуемая холодопроизводительность СКВ может быть снижена за счет применения теплоизолированных вентиляционных и циркуляционных трубопроводов. Следует отметить, что при применении СКВ нежелательно вводить мероприятия по увеличению расхода воздуха, поскольку в этом случае требуемая холодильная мощность СКВ существенно воз-

растет за счет необходимости охлаждать больший объем воздуха практически до такой же температуры.

Заключение

Для определения эффективности различных способов снижения температуры воздуха, подаваемого в забой, была разработана математическая модель теплообмена воздуха внутри вентиляционного трубопровода, которая учитывает конвективный и лучистый теплообмен в системе: «воздух в трубопроводе – стенка трубопровода – воздух в выработке – породный массив».

Таблица 4. Результаты расчетов способов нормализации микроклимата

Table 4. Results of numerical simulation for different methods of microclimate normalization

Способ снижения температуры Methods for decreasing air temperature	Температура воздуха в забое Air temperature near the face, °C		Примечание Note
	до охлаждения before cooling	после охлаждения after cooling	
Увеличение подачи воздуха Air flowrate increase	43,7	43,0	Не эффективно Not effective
Теплоизолированные трубопроводы (20 мм) Thermally insulated duct (20 mm)		37,1	Неэффективно, не требует эксплуатационных затрат Not effective, no operating costs
Теплоизолированные трубопроводы (50 мм) Thermally insulated duct (50 mm)		32,9	
Теплоизолированные трубопроводы (100 мм) Thermally insulated duct (100 mm)		30,4	
Теплоизолированные трубопроводы (150 мм) Thermally insulated duct (150 mm)		29,4	
Применение оросителей воздуха (летом) Air irrigation (summer)		27,3	Эффективно в зимний период, неэффективно в летний Effective in winter, not effective in summer
Применение оросителей воздуха (зимой) Air irrigation (winter)		19,1	
Применение СКВ Air conditioning			25

Были исследованы различные способы снижения температуры воздуха, подаваемого в забой, в глубокой тупиковой выработке большой протяженности, такие как: увеличение объема подачи воздуха в забой, покрытие теплоизоляцией вентиляционных труб, охлаждение воздуха с помощью камеры орошения и применение системы кондиционирования воздуха. В результате проведенных расчетов было определено, что увеличение расхода воздуха и применение теплоизолированных трубопроводов не обеспечивает допустимые микроклиматические параметры в забое РВ-2.

Охлаждение воздуха с помощью камеры орошения позволяет обеспечить допустимую температуру воздуха в зимний период, но не позволяет обеспечить её в летний период. Применение СКВ является единственным способом достижения допустимых микроклиматических параметров в забое выработки, однако является самым дорогим и технически сложным способом.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках проекта № 19-77-30008.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Normalization of thermal mode of extended blind workings operating at high temperatures based on mobile mine air conditioners, St. Petersburg, Russia / V.R. Alabyev, V.V. Novikov, L.A. Pashinyan, T.P. Bazhina // Journal of Mining Institute. – 2019. – V. 237. – P. 251–258.
2. Potential sources of heat in underground mines – a review / M. Tripti, K. Kailash, H. Vardhan, M. Aruna, M.G. Raj // Procedia Earth Planet Science. – 2015. – V. 11. – P. 463–468.
3. Implementing a DKW model on a deep mine cooling system / J.G. Pretorius, M.J. Mathews, P. Mare, M. Kleingeld, J. Rensburg // International Journal of Mining Science and Technology. – 2019. – V. 29. – № 2. – P. 319–326.
4. Design and evaluation of cooling workwear for miners in hot underground mines using PCMs with different temperatures, Warszawa, Polska / Q. Zheng, Ying Ke, H. Wang // International Journal of Occupational Safety and Ergonomics. – 2020. – V. 26. – P. 1–11.
5. Кормщиков Д.С., Попов М.Д., Нормализация теплового режима глубоких залежей рудника «Таймырский» до момента ввода системы кондиционирования // Горное Эхо. Пермь. – 2019. – № 2. – С. 92–96.
6. Особенности формирования микроклиматических условий в горных выработках глубоких рудников / В.Н. Карелин, А.В. Кравченко, Л.Ю. Левин, Б.П. Казаков, А.В. Зайцев // Горный журнал. – 2013. – № 6. – С. 65–68.
7. Казаков Б.П., Зайцев А.В. Исследование процессов формирования теплового режима глубоких рудников // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. – 2014. – № 10. – С. 91–97.
8. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых»: утв. приказом Ростехнадзора от 08.12.2020 № 505. – М.: Изд-во «Центрамаг», 2020. – 122 с.
9. Analysis of thermal regime of a deep mine airway in permafrost, London, GB / S. Bandopadhyay, H. Wu, M.G. Nelson, V. Izaxon // Mining in the Arctic. – 2001. – V. 1. – P. 107–117.
10. Roghanchi P., Kocsis K.C. Quantifying the thermal damping effect in underground vertical shafts using the nonlinear autoregressive with external input (NARX) algorithm // International Journal of Mining Science and Technology. – 2019. – V. 2. – P. 255–262.
11. Semin M., Zaitsev A. On a possible mechanism for the water build-up formation in mine ventilation shafts // Thermal Science and Engineering Progress. – 2020. – № 5. – P. 1–7.
12. СП 131.13330.2018 Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99*: утв. приказом Министерства регионального развития от 28.11.2018 № 275. – М.: Изд-во «Стандартинформ», 2019. – 114 с.
13. McPherson M.J. The analysis and simulation of heat flow into undergrounds airways // International Journal of Mining and Geological Engineering. – 1986. – V. 4. – P. 165–196.
14. Шалимов А.В. Теоретические основы прогнозирования, профилактики и борьбы с аварийными нарушениями проветривания рудников. – Пермь: Изд-во ГИ УрО РАН, 2012. – 329 с.
15. Бухмиров В.В. Расчет коэффициента конвективной теплоотдачи (справочник). – Иваново: ИГЭУ, 2007. – 39 с.
16. Казаков Б.П. Методика расчета требуемого количества воздуха для проветривания подземных горных выработок месторождения Октябрьское. – Пермь: Изд-во «ГИ УрО РАН», 2017. – 78 с.
17. Нестеренко А.В. Основы термодинамических расчетов вентиляции и кондиционирования воздуха. – М.: Высшая школа, 1971. – 460 с.
18. Богословский В.Н., Кокорин О.Я., Петров Л.В. Кондиционирование воздуха и холодоснабжение. – М.: Стройиздат, 1985. – 367 с.

19. Стефанов Е.В. Вентиляция и кондиционирование воздуха. – Л.: ВВИТКУ, 1970. – 399 с.
20. Effects of thermal water upwelling on microclimate change in the high geo-temperature roadway / W. Junhui, W. Zhijun, Z. Hongwei, W. Jingchao, W. Yi, Z. Yuan, L. Sifei, L. Ning // Shock and Vibration. – 2021. – V. 2021. – P. 1–14.
21. Mackay L., Bluhm S., Van Rensburg J. Refrigeration and cooling concepts for ultra-deep platinum mining // Boom or Bust: The 4th International Platinum Conference, Platinum in transition. – Sun City, Rustenburg, South Africa: The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2010. – P. 285–292.

Поступила 08.12.2021 г.

Информация об авторах

Ольховский Д.В., инженер Горного института уральского отделения российской академии наук.

Зайцев А.В., доктор технических наук, заведующий сектором горной теплофизики Горного института уральского отделения российской академии наук.

Шалимов А.В., доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Горного института уральского отделения российской академии наук.

Давыдов А.А., руководитель проектного офиса комплексного развития рудника Скалистый ПАО «ГМК "Норильский Никель"».

UDC 622.413.4

METHODS FOR MICROCLIMATE NORMALIZATION IN DEEP LONG BLIND DRIFTS

Dmitriy V. Olkhovskiy¹,
demexez@gmail.com

Artem V. Zaytsev¹,
aerolog.artem@gmail.com

Andrey V. Shalimov¹,
aerolog.artem@gmail.com

Andrey A. Davydov²,
Davydovaa@nornik.ru

¹ Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
78a, Sibirskaaya street, Perm, 614007, Russia.

² PJSC «MMC "Norilsk Nickel"»,
15, 1st Krasnogvardeysky secondary street, Moscow, 123100, Russia.

The relevance of the research is provided by the complexity of microclimate normalization in long blind drifts which are driven deeply through geothermally heated rocks.

The aim of the research is the evaluation of usability of different ways for microclimate normalization in the working section of the exploration drift-2 in the mine of PJSC «MMC "Norilsk Nickel"».

Objects: the exploration mine exploration drift-2 of PJSC «MMC "Norilsk Nickel"».

Methods: the numerical simulation of heat and mass transfer in the atmosphere of the long exploration drift, the comparative analysis of simulation results.

Results. The paper reviews ways, comparing their features, advantages, and disadvantages, for microclimate normalization in deep blind drifts. The presented mathematical model describes the heat and mass transfer in the working section of the blind drift with ventilation through the air duct. The model considers convective and radiant heat transfers. The results of the numerical simulation are given for different air-cooling methods which are applicable in the case of the deep copper-nickel mine of PJSC «MMC "Norilsk Nickel"». Drawing on this, different mining and thermal engineering operations for normalization of air temperatures in the working section regarding safety requirements are compared. It is defined that increasing the intake air flowrate could not decrease the air temperature near the face. The use of thermally insulated duct significantly decreases the air temperature in the working section but does not reduce it to the permitted value. It is shown, that the air irrigation could normalize temperatures in winter and not during the summer months. Underground air conditioning is the most universal and effective way for this purpose but highly expensive.

Key words:

Blind drifts, deep mine, microclimate, air irrigation, thermal insulation, air conditioning, air duct.

The research was financially supported by the Russian Science Foundation within the project no. 19-77-30008.

REFERENCES

- Alabyev V.R., Novikov V.V., Pashinyan L.A., Bazhina T.P. Normalization of thermal mode of extended blind workings operating at high temperatures based on mobile mine air conditioners, St. Petersburg, Russia. *Journal of Mining Institute*, 2019, vol. 237, pp. 251–258.
- Tripti M., Kailash K., Vardhan H., Aruna M., Raj M.G. Potential sources of heat in underground mines – a review. *Procedia Earth Planet Science*, 2015, vol. 11, pp. 463–468.
- Pretorius J.G., Mathews M.J., Mare P., Kleingeld M., Rensburg J. Implementing a DIKW model on a deep mine cooling system. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2019, vol. 29, no. 2, pp. 319–326.
- Ying Ke Q.Z., Wang H. Design and evaluation of cooling workwear for miners in hot underground mines using PCMs with different temperatures, Warszawa, Polska. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 2020, vol. 26, pp. 1–11.
- Kormshchikov D.S., Popov M.D., Normalizatsiya teplovogo rezhima glubokikh zalezhey rudnika «Taimyrskiy» do momenta vvoda sistemy konditsionirovaniya [Normalization of the thermal behavior of deep deposits of the Taimyrskiy, mine before the commissioning of the air conditioning system]. *Mountain echo*, 2019, no. 2, pp. 92–96.
- Karelin V.N., Kravchenko A.V., Levin L.Yu., Kazakov B.P., Zaytsev A.V. Osobennosti formirovaniya mikroklimaticheskikh usloviy v gornykh vyrabotkakh glubokikh rudnikov [Features of the formation of microclimatic conditions in the mine workings of deep mines]. *Mining journal*, 2013, no. 6, pp. 65–68.
- Kazakov B.P., Zaytsev A.V. Issledovanie protsessov formirovaniya teplovogo rezhima glubokikh rudnikov [Studies of the formation processes of the thermal regime of deep mines]. *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University*, 2014, no. 10, pp. 91–97.
- Federalnye normy i pravila v oblasti promyshlennoy bezopasnosti «Pravila bezopasnosti pri vedenii gornykh rabot i pererabotke tverdykh poleznykh iskopayemykh»* [Federal norms and rules in the field of industrial safety «Safety rules for mining and processing of solid minerals»]. Approved by order Rostekhnadzora dated 08.12.2020 no. 505. Moscow, Tsentramag Publ., 2020. 122 p.
- Bandopadhyay S., Wu H., Nelson M.G., Izaxon V. Analysis of thermal regime of a deep mine airway in permafrost, London, GB. *Mining in the Arctic*, 2001, vol. 1, pp. 107–117.
- Roghanchi P., Kocsis K. C. Quantifying the thermal damping effect in underground vertical shafts using the nonlinear autoregressive with external input (NARX) algorithm. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2019, vol. 2, pp. 255–262.

11. Semin M., Zaytsev A. On a possible mechanism for the water build-up formation in mine ventilation shafts. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2020, vol. 5, pp. 1–7.
12. SP 131.13330.2018 *Stroitel'naya klimatologiya* [Building climatology]. Approved by order of the Ministry of Regional Development dated 28.11.2018, no. 275. Moscow, Standartinform Publ., 2019. 114 p.
13. McPherson M.J. The analysis and simulation of heat flow into underground airways. *International Journal of Mining and Geological Engineering*, 1986, vol. 4, pp. 165–196.
14. Shalimov A.V. *Teoreticheskie osnovy prognozirovaniya, profilaktiki i borby s avariynymi narusheniyami provetrivaniya rudnikov* [Theoretical foundations of programming for prevention and combating emergency violations of mine ventilation]. Perm, MI UB RAS Publ., 2012. 329 p.
15. Bukhmirov V.V. *Raschet koeffitsiyenta konvektivnoy teplootdachi (spravochnik)* [Calculation of the convective heat transfer coefficient (reference book)]. Ivanovo, IGEU Publ., 2007. 39 p.
16. Kazakov B.P. *Metodika rascheta trebuyemogo kolichestva vozdukh dlya provetrivaniya podzemnykh gornykh vyrabotok mestorozhdeniya Oktyabrskoe* [Methodology for calculating the air demand for ventilating underground mine workings of the Oktyabrskoe deposit]. Perm, MI UB RAS Publ., 2017. 78 p.
17. Nesterenko A.V. *Osnovy termodinamicheskikh raschetov ventilyatsii i konditsionirovaniya vozdukh* [Fundamentals of thermodynamic calculations for ventilation and air conditioning]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1971. 460 p.
18. Bogoslovskiy V.N., Kokorin O.Ya., Petrov L.V. *Konditsionirovanie vozdukh i kholodosnabzhenie* [Air conditioning and refrigeration]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1985. 367 p.
19. Stefanov E.V. *Ventilyatsiya i konditsionirovanie vozdukh* [Ventilation and air conditioning]. Leningrad, HMETRBS Publ., 1970. 399 p.
20. Junhui W., Zhijun W., Hongwei Z., Jingchao W., Yi W., Yuan Z., Sifei L., Ning L. Effects of thermal water upwelling on microclimate change in the high geo-temperature roadway. *Shock and Vibration*, 2021, vol. 2021, pp. 1–14.
21. Mackay L., Bluhm S., Van Rensburg J. Refrigeration and cooling concepts for ultra-deep platinum mining. *The 4th International Platinum Conference, Platinum in transition. Boom or Bust*. Sun City, Rustenburg, South Africa, The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2010. pp. 285–292.

Received: 8 December 2021.

Information about the authors

Dmitriy V. Olkhovskiy, engineer, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

Artem V. Zaytsev, Dr. Sc., head of the Mining Thermal Physics Sector, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

Andrey V. Shalimov, Dr. Sc., leading research worker, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

Andrey A. Davydov, head of the project office for the integrated development of the Skalisty mine, «MMC "Norilsk Nickel"».

УДК 622.011.4

ВЛИЯНИЕ УГЛА ПАДЕНИЯ ТРЕЩИН НА ЛОКАЛЬНОЕ НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРИОТКОСНОЙ ЗОНЫ ВСКРЫШНОГО УСТУПА

Марков Сергей Олегович^{1,2},
markovso@kuzstu.ru

Хорешок Алексей Алексеевич¹,
haa.omit@kuzstu.ru

Тюленев Максим Анатольевич¹,
tma.geolog@kuzstu.ru

¹ Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева,
Россия, 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28.

² Филиал Кузбасского государственного технического университета имени Т.Ф. Горбачева в г. Междуреченске,
Россия, 652877, г. Междуреченск, пр. Строителей, 36.

Актуальность. Напряженно-деформированное состояние массива горных пород при открытой разработке месторождений полезных ископаемых, равно как и при строительстве в грунтах выемок значительных размеров, зависит как от механических свойств пород, так и от структурно-текстурных особенностей массива горных пород. В частности, наличие трещин в приоткосной зоне уступа может значительно ослабить его устойчивость, а направление и угол падения трещин относительно откоса уступа изменяют расположение напряженных зон внутри массива относительно поверхности обнажения. Актуальной научно-практической задачей представляется выявление зон повышенных механических напряжений с целью прогноза поведения массивов горных пород с различными структурно-текстурными свойствами.

Цель: выявление зон концентрации напряжений в приоткосной части уступа в массиве горных пород с различными структурно-текстурными свойствами при ведении открытых горных работ.

Методы: математическое моделирование массивов горных пород с учётом их физико-механических свойств и структурно-текстурных особенностей методом конечных элементов, обработка результатов экспериментальных исследований.

Результаты. Приведено описание математической модели упругого поведения естественного трещиноватого массива горных пород, имеющего поверхность обнажения в виде уступа, а также закономерности распределения концентрации напряжений в нём. Описано напряженно-деформированное состояние нагруженного и ненагруженного массивов в ненарушенном и нарушенном трещинами различной ориентации состоянии. Описано положение зон концентрации растягивающих напряжений, проведено сравнение их значений для уступов с различным строением. Выявлены повышенные значения растягивающих напряжений в массиве при направлении падения трещин от откоса уступа по сравнению с ненарушенным состоянием и при направлении падения трещин в сторону откоса уступа.

Ключевые слова:

Метод конечных элементов, напряженно-деформированное состояние, устойчивость пород, трещиноватость, концентрация напряжений, строение массива.

Введение

Структурно-текстурные особенности массива горных пород оказывают значительное влияние на поведение уступов под нагрузкой от горного оборудования. Распределение напряжений в приоткосной части уступа сильно зависит от параметров трещиноватости пород [1–5]. В статье приводятся результаты численного моделирования распределения в породном уступе зон с повышенным растягивающим напряжением. Появление таких зон может привести к росту трещин с дальнейшей потерей устойчивости пород уступа и его обрушением [6–17].

Поскольку поведение массива горных пород в окрестностях открытых горных выработок является ключевым при оценке безопасности ведения горных работ [18–22], актуальность решения геомеханических задач по прогнозу поведения таких массивов не подвергается сомнению.

В тектоническом плане угленосные отложения Кузбасса характеризуются слоистостью (преимущественно, обусловленной переслаиванием песчаников, алевролитов и аргиллитов с пластами угля) и разви-

тыми системами трещин. Данное обстоятельство связано с тем, что накопление осадков, в том числе и угленосных, происходило в условиях мелководных открытых морей и заболоченных участков суши, а сама угленосная Кузнецкая котловина и её обрамление входят в состав подвижного Урало-Охотского складчатого пояса [23, 24]. Наличие многочисленных систем трещин проявляется как на геологических обнажениях коренных горных пород, выходящих на дневную поверхность из-под неоген-четвертичных отложений, так и в открытых горных выработках, пройденных по коренным породам (рис. 1).

При ведении горных работ на напряженное состояние массива горных пород большое влияние оказывают параметры трещиноватости. Для условий Кузбасса данные параметры лежат в широких пределах: длины трещин от 0,1 до 10...15 м, расстояния между трещинами от 0,5 до 4...5 м; значения углов падения и азимутов простирания лежат во всем возможном диапазоне значений. Данные значения характерны для складчатых зон со сложным тектоническим строением, т. е. для Кузбасса [24].



a/a



b/b

Рис. 1. Трещиноватые коренные породы: а) на поверхности откоса уступа; б) обнажение из-под неоген-четвертичных отложений

Fig. 1. Cracked bedrock: a) on the surface of the ledge slope; b) outcrop from under Neogene-Quaternary sediments

Материалы и методы исследования

В качестве исходных данных для модели были взяты усредненные физико-механические характеристики аргиллита, имеющие следующие значения для условий Кузбасса: предел прочности на одноосное сжатие $R_c=15...25$ МПа, предел прочности на одноосное растяжение $R_p=1,7...2,3$ МПа, модуль Юнга $E=18$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu=0,25$, модуль сдвига $G=7,2$ МПа, плотность $\rho=2,4...2,6$ т/м³ [23, 25]. Массив, сложенный слоями горных пород с различными упругими характеристиками, в данной задаче не рассматривался, хотя применение метода конечных элементов (МКЭ) позволяет решать такие задачи совместно [17–19].

В целом вмещающие горные породы Кузбасса рассматриваются как упругие тела с соответствующим пределом прочности на сжатие и растяжение, а уступы – как трещиноватые массивы горных пород [26–28]. Постановка такой задачи позволит найти области перенапряжений в массиве, где с высокой долей вероятности будет наблюдаться рост трещин с последующим разрушением горной породы и породного уступа.

В качестве примера рассматривался породный уступ высотой $H=29$ м с углом откоса $\alpha=70^\circ$. Решением задачи упругости в постановке плоских деформаций методом конечных элементов были рассчитаны напряженно-деформированные состояния (НДС) массивов:

- 1) без трещин и без внешней нагрузки;
- 2) без трещин и с нагрузкой в виде веса экскаватора ЭШ 10.70, распределенной по верхней площадке уступа начиная с расстояния 3 м от верхней бровки

- [29, 30]. Обе модели рассчитывались с числом узлов сетки 19142 (рис. 2), время расчета – около 1 с;
- 3) без внешней нагрузки с 21 трещиной с раскрытием 0...2 мм, длиной 4 м, расстоянием между трещинами 3,5...4 м и падением трещин вглубь массива (от откоса) под углом 45°;
- 4) аналогично, с нагрузкой в виде веса экскаватора ЭШ 10.70, распределенной по верхней площадке уступа начиная с расстояния 3 м от верхней бровки. Модели 3) и 4) рассчитывались на 118523 узлах сетки, время расчета – около 310 с;
- 5) без внешней нагрузки с 27 трещинами с раскрытием 0...2 мм, длиной 4 м, расстоянием между трещинами 3,5...4 м и падением трещин из массива (к откосу) под углом 45°;
- 6) аналогично, с нагрузкой в виде веса экскаватора ЭШ 10.70, распределенной по верхней площадке уступа начиная с расстояния 3 м от верхней бровки. Модели 5) и 6) рассчитывались на 734888 узлах сетки, время расчета – около 2550 с.

Постановка задачи в плоских деформациях была выбрана потому, что такой подход применяется при исследовании НДС моделей, протяженных в направлении, перпендикулярном плоскости модели, что соответствует исследованию НДС протяженного уступа.

Моделирование НДС производилось методом конечных элементов с помощью программного обеспечения «ELCUT® Профессиональный» 6.3.2.2098 SP2 (© ООО «ТОР», Россия). Для расчета использовалось следующее аппаратное обеспечение: CPU Intel Core i7-9700K (с максимальной частотой до 4,6 ГГц), RAM 32 Гб. Исходя из действующей спецификации применяемого ПО, вычисления производились на 1 либо 2 ядрах CPU с задействованием до 100 % одного ядра либо до 50 % мощности двух ядер соответственно с выбором загрузки в автоматическом режиме. Из-за ограничений применяемого ПО мощности GPU NVIDIA TU117 не использовались, параллельные вычисления CUDA и PhysX не выполнялись.

На рис. 2 приведены граничные условия задачи.

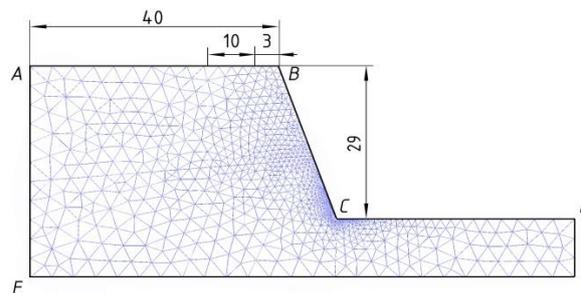


Рис. 2. Начальная модель уступа (без трещин) с сеткой конечных элементов: верхняя площадка шириной 40 м, база экскаватора диаметром 10 м, борта безопасности 3 м, высота уступа 29 м; рёбра AF и DE приняты неподвижными по оси Ox, ребро FE принято неподвижным по оси Oy

Fig. 2. Initial model of ledge (without cracks) with finite element grid: top platform 40 m wide, excavator base diameter 10 m, safety berm 3 m, ledge height 29 m; edges AF and DE are taken fixed along Ox axis, edge FE is taken fixed along Oy axis

Результаты и обсуждение

Исходя из положений теории прочности материалов, горная порода находится в устойчивом состоянии, если действующие в ней растягивающие напряжения не превосходят критерий Мора [16–18]:

$$\sigma_{Mo} > R_p. \quad (1)$$

На рис. 3 приведена графическая интерпретация НДС уступа, не осложненного системами трещин. В

данном случае сжимающие напряжения имеют значения меньше 0, растягивающие напряжения – больше 0. Области развития сжимающих напряжений (при критерии Мора $\sigma_{Mo} < 0$) занимают до 50 % объема массива уступа, не имеющего внешней нагрузки, и до 30 % объема при наличии нагрузки. При этом значения сжимающих и растягивающих напряжений не превышают соответствующих пределов прочности.

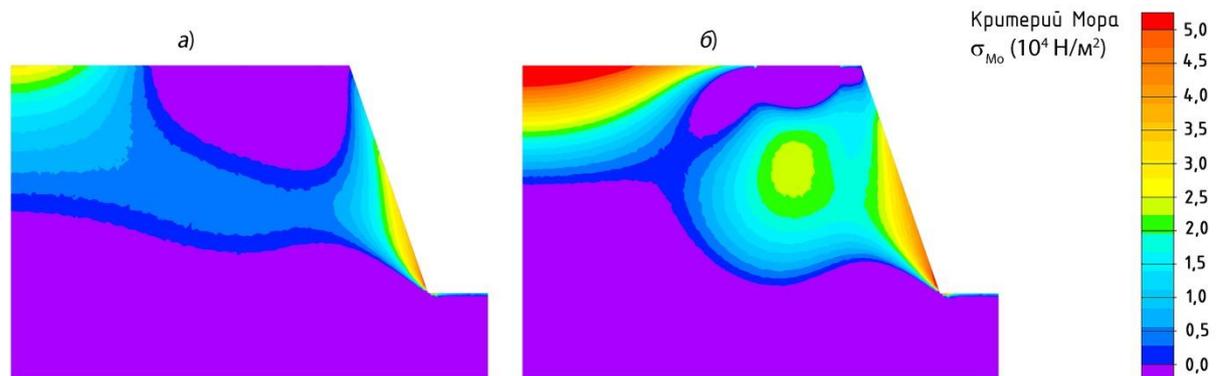


Рис. 3. Модель напряженно-деформированного состояния уступа: а) исходное состояние без нагрузки; б) уступ, нагруженный весом драглайна ЭШ 10.70

Fig. 3. Model of stress-strain state of the ledge: а) initial state without load; б) ledge loaded with the weight of dragline ESh 10.70

Анализ НДС ненарушенного трещинами уступа показывает, что при наличии распределенной нагрузки на верхней площадке уступа в виде веса экскаватора-драглайна, например, ЭШ 10.70 с диаметром базы 10 м, который при движении создает давление на грунт 240 кПа, зона сжимающих напряжений под его базой на глубине порядка 5 м сменяется зоной растягивающих напряжений, распространяющейся практически на всю высоту уступа. Указанные напряжения не превышают, впрочем, предела прочности породы на растяжение.

Выявлено, что область с наибольшими растягивающими напряжениями (порядка 50–60 кПа) находится приблизительно в 1 м над нижней бровкой уступа, распространяясь вглубь массива также приблизительно на 1 м (рис. 3, а). Расположение зоны повышенных растягивающих напряжений на откосе уступа не меняется при размещении на верхней площадке уступа горного оборудования (рис. 3, б); при этом её размеры увеличиваются приблизительно в 2–3 раза по сравнению с размерами аналогичной зоны без дополнительной нагрузки на верхней площадке уступа.

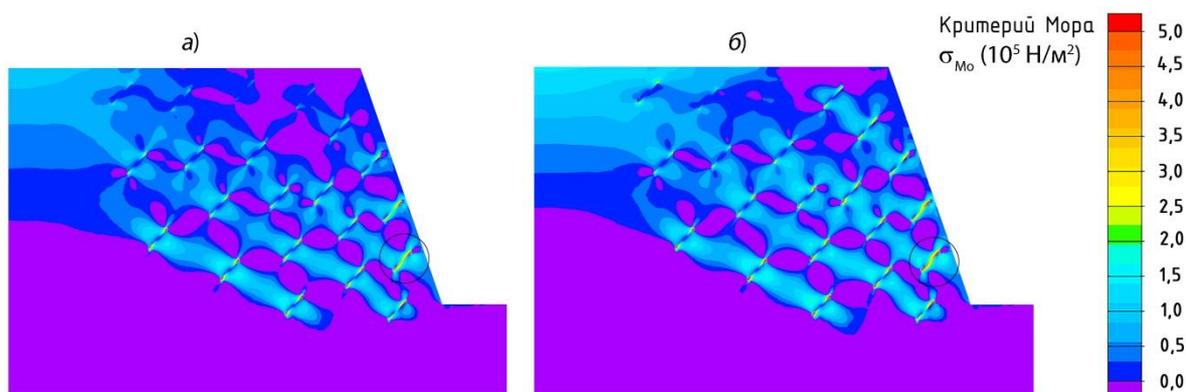


Рис. 4. Модель напряженно-деформированного состояния уступа, сложенного трещиноватыми горными породами с системой трещин, падающих в породный массив: а) состояние без нагрузки; б) уступ, нагруженный весом драглайна ЭШ 10.70

Fig. 4. Model of the stress-strain state of a ledge formed by fractured rocks with a system of cracks falling into the rock massif: а) no-loaded state; б) ledge loaded with the weight of dragline ESh 10.70

В данном исследовании рассматривались расположенные в массиве трещины и их влияние на изменение НДС в массиве горных пород уступа при веде-

нии открытых горных работ. Направление падения трещин в первом случае принималось от откоса (вглубь массива пород); во втором случае – к откосу

(соответственно, рис. 4, б). Рассматривались уступы ненагруженные (рис. 4, а; 6, а) и нагруженные весом драглайна (рис. 4, б; 6, б). Расстояние между трещинами принималось равным 3...4 м, длина трещин 4 м, начальное раскрытие трещин до 2 мм.

Анализ НДС уступа с трещинами, направленными от откоса вглубь массива, показал, что:

- за счет наличия трещин в массиве концентрация действующих напряжений привела к росту значений последних до 12–15 раз;
- по сравнению с ненарушенным массивом горных пород значения растягивающих напряжений на верхней площадке уступа на расстоянии 40 м от верхней бровки выросли приблизительно в 6–7 раз;
- наиболее высокая концентрация растягивающих напряжений наблюдается у верхних углов над верхним берегом и у нижних углов под нижним берегом трещин, при этом напряжения концентрируются не в самом углу, а у поверхности берега трещины;

- углы трещин лежат в области сжимающих напряжений, при этом главное напряжение σ_1 направлено поперёк направления трещины, что предотвращает её раскрытие и рост (рис. 5; данный фрагмент приоткосной части уступа в 5 м над нижней бровкой на рис. 4 обозначен кружком);
- растягивающие напряжения концентрируются в межтрещинных породных «мостиках», расположенных в направлениях, приближенных к нормали к поверхности берегов трещин;
- «мостики» возникают при величине нормальной проекции одной трещины на другую, превышающей половину длины трещины;
- длина породных «мостиков» может превышать в 1,5...2 раза расстояние до соседних трещин, не лежащих в направлении нормали к берегам;
- распространение зоны повышенных растягивающих напряжений ограничивается углами трещин, лежащих на максимальном расстоянии от откоса уступа.

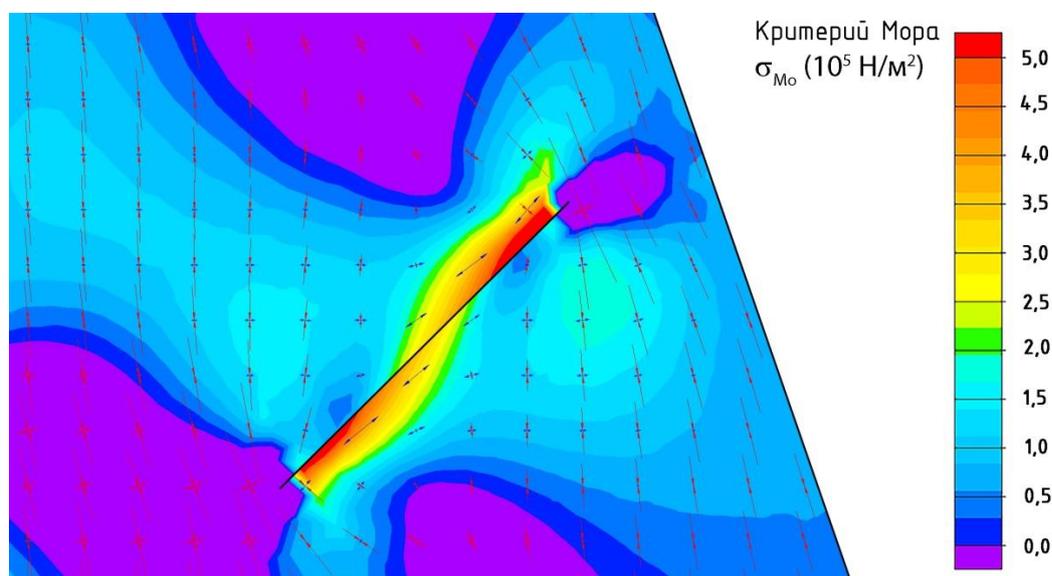


Рис. 5. Направления действия главных напряжений и величина критерия прочности в окрестностях трещин (стрелки, направленные друг к другу, показывают сжимающие напряжения, друг от друга – растягивающие)

Fig. 5. Directions of the main stresses and the value of the strength criterion in the vicinity of the cracks (arrows pointing to each other show compressive stresses, from each other – tensile ones)

При анализе НДС особое внимание уделялось напряжениям, превышающим предел прочности породы на растяжение R_c , поскольку такие напряжения приводят к росту существующих и образованию новых трещин в горных породах. Нарушение условия (1) в краевых частях трещин ведет к их росту, что в свою очередь приводит к возникновению поверхностей ослабления или отслаиванию пород в откосе уступа с уменьшением его несущей способности.

Исходя из полученных данных можно сделать вывод о том, что при наличии взаимно перпендикулярных систем трещин может возникнуть довольно опасная ситуация даже в том случае, если основная система трещин имеет направление падения от откоса (вглубь массива). В этом случае рост и раскрытие дополнительных трещин будет происходить в направ-

лении, перпендикулярном к действию растягивающих напряжений. Начинаться такие трещины будут на берегах уже имеющихся, с потенциальным выходом новых трещин на поверхность откоса. При этом будут возникать дополнительные поверхности ослабления в массиве горных пород.

Этот вывод следует из основ линейной механики разрушения, в которой трещину представляют в виде поверхности разрыва смещений, размеры которой изменяются под действием приложенных к телу внешних нагрузок [31]. Согласно гипотезе Гриффитса, разрушение произойдет, когда при бесконечно малом удлинении трещины будет выделяться больше упругой энергии, чем это требуется для удельной энергии образования новых поверхностей трещины.

Удельная поверхностная энергия тела, или энергозатраты, отнесенные к эффективной площади разрушения (удельная работа образования поверхности разрушения) γ (Дж/м²), связана с предельным напряжением σ (Н/м²), приводящим к разрыву структурных связей в горной породе, и предельной минимальной длиной трещины l_c соотношением:

$$\sigma = \sqrt{\frac{2\gamma E}{\pi l_c}}$$

для плоского напряженного состояния и соотношением:

$$\sigma = \sqrt{\frac{2\gamma E}{\pi l_c (1-\nu^2)}}$$

для плоского деформированного состояния. Здесь E – модуль упругости, Па/м²; ν – коэффициент Пуассона.

Рассмотрим уступ, в котором падение трещин направлено в сторону откоса.

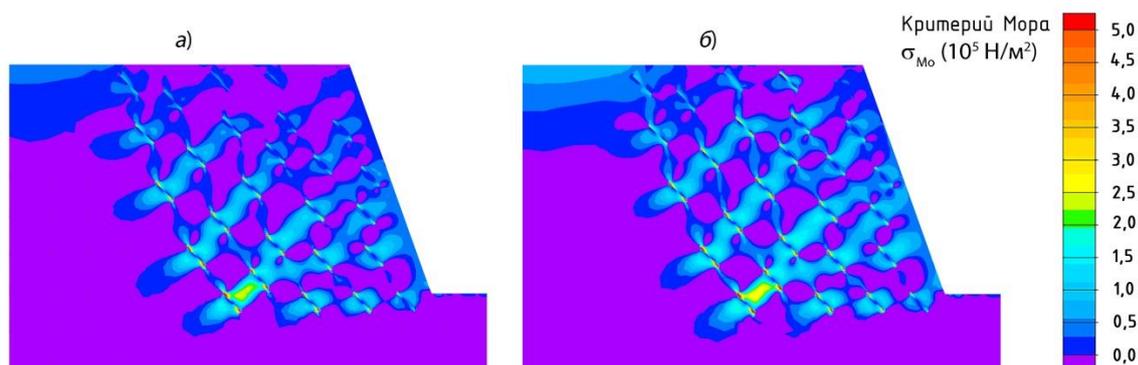


Рис. 6. Модель напряженно-деформированного состояния уступа, сложенного трещиноватыми горными породами с системой трещин, падающих в сторону откоса: а) состояние без нагрузки; б) уступ, нагруженный весом драглайна ЭШ 10.70

Fig. 6. Model of the stress-strain state of a ledge formed by fractured rocks with a system of cracks falling in the direction of the slope: a) condition without load; b) ledge loaded with the weight of draglines ESh 10.70

В приведенном примере растягивающие напряжения также распространяются по породным «мостикам» между трещинами. В отличие от ранее рассмотренного случая, распространение зон растягивающих напряжений не ограничивается трещинами, лежащими на максимальном удалении от откоса, а продолжается от их берегов вглубь породного массива. Одновременно с этим зоны растягивающих напряжений выходят на поверхность откоса, «перекрывая» собой зоны сжимающих напряжений и отодвигая их вглубь массива, что также существенно отличает данную картину НДС от предыдущего случая.

Если сравнивать значения критерия прочности Мора, действующие в области растяжения, в зависимости от расстояний от верхней площадки и от откоса уступа, то наблюдается картина для ненагруженных оборудованием уступов (таблица).

Полученные значения распределения критерия прочности показывают, что при падении трещин к откосу приоткосная часть уступа испытывает большие растягивающие нагрузки, чем при падении трещин вглубь массива (в среднем на 50 %). Однако при падении трещин к откосу весь массив в целом испытывает меньшие растягивающие напряжения, чем при падении трещин вглубь массива (приблизительно от 50 до 250 %). Такая неравномерность НДС массива обусловлена различными механизмами перераспределения напряжений при различных структурно-текстурных характеристиках массива. Одновременно с этим в обоих случаях значения растягивающих напряжений превышают их значения в десятки и сотни раз в аналогичных точках ненарушенного массива.

Таблица. Значения критерия прочности σ_{Mo} , кПа

Table. Mohr criteria σ_{Mo} , kPa

Глубина Depth	Расстояние от откоса Distance from the slope	Ненарушенный трещинами уступ Unbroken ledge	Падение трещин Falling cracks	
			от откоса from the slope	к откосу to the slope
	м/м			
5	0–5	10	14,1	46,4
	15–20	–	10,9	–
	30–35	9,5	106,5	9
10	0–5	21	63,7	51,4
	15–20	–	65,6	47,6
	30–35	7,2	86	63
15	0–5	28,3	25	46,4
	15–20	3,9	135,3	84,8
	30–35	4,5	29,4	–
20	0–5	30,5	30,8	47,6
	15–20	3,9	69,4	13,5
	30–35	2,4	235,5	7,9
25	0–5	40	61,2	36,8
	15–20	–	1,1	112,3
	30–35	–	–	2,4
29	0–5	–	39,9	58,9
	15–20	–	153,2	23,5
	30–35	–	–	7,3

С учётом того, что рассматривалась модель НДС отдельного уступа без учёта возможности смещения его нижней площадки (защемлённая среда, например, в условиях дна карьерной выемки или места размещения внутреннего отвала), картина распределения напряжений имеет значительные отличия от случая, когда рассматриваемый уступ является частью борта в верхней или средней части разреза. В таком случае

влияние выше- и нижележащих уступов будет существенным образом менять картину НДС как всего массива в целом, так и рассматриваемого уступа в частности.

Анализ приведенных значений показывает, что применение метода конечных элементов для расчёта НДС массива горных пород без учёта структурных особенностей строения массива (особенно вблизи горных выработок) даёт значительно заниженные значения действующего критерия прочности. Применение различного рода коэффициентов, учитывающих структурные особенности массива, также может не дать реальной картины распределения зон опасных напряжений, поскольку нет единой методики определения соответствующих коэффициентов в зависимости от параметров трещиноватости и их соотношения с геометрией и положением в пространстве горных выработок.

Выводы

1. Максимальные значения критерия прочности осложнённого системами трещин ненагруженного уступа не превосходят предела прочности на растяжение рассматриваемой породы, т. е. можно считать, что устойчивость данного породного уступа не нарушена. Аналогичная картина распределения значений критерия прочности наблюдается и для нагруженного оборудованием уступа, однако в этом случае увеличенные максимальные значения критерия прочности в совокупности с соотношением направлений растягивающих усилий и параметров трещиноватости говорят о том,

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. From discrete to continuum modelling of boundary value problems in geomechanics: an integrated FEM-DEM approach / J. Desrues, A. Argilaga, D. Caillierie, G. Combe, T.K. Nguyen, V. Richefeu, S. dal Pont // *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. – 2019. – V. 43. – Iss. 5. – P. 919–955. DOI: 10.1002/nag.2914.
2. Forward solver for deep earth exploration and induction logging using custom built Edge-Element FEM technique / Mingyang Lu, Wuliang Yin, Shijie Sun, Jiangtao Sun, Zhang Cao, Lijun Xu // *Acta Geologica Sinica – English Edition*. – 2019. – V. 93. – Iss. S1. – P. 302–304. DOI: <https://doi.org/10.1111/1755-6724.14107>
3. Xie Jiatong, Qin Qirong, Fan Cunhui. Quantitative prediction of fracture distribution of the Longmaxi formation in the Dingshan Area, China using FEM numerical simulation // *Acta Geologica Sinica – English Edition*. – 2019. – V. 93. – Iss. 6. – P. 1662–1672. DOI: 10.1111/1755-6724.13815
4. Sertabipoglu Zeynep, Ozer Umit, Tuncdemir Hakan. Assessment of slope instability with effects of critical displacement by using InSAR and FEM // *Arabian Journal of Geosciences*. – 2020. – V. 13. – Iss. 4. DOI: 10.1007/s12517-020-5164-8
5. Analysing stress field conditions of the Colima Volcanic Complex (Mexico) by integrating finite-element modelling (FEM) simulations and geological data / S. Massaro, R. Sulpizio, G. Norini, G. Groppelli, A. Costa, L. Capra, G. Lo Zupone, M. Porfido, A. Gabrieli // *Solid Earth*. – 2020. – V. 11. – Iss. 6. – P. 2515–2533. DOI: 10.5194/se-11-2515-2020
6. Numerical analysis of slope stability under reservoir water level fluctuations using a FEM-LEM-combined method / Meng Qingxiang, Qian Kun, Zhong Lin, Gu Jinjian, Li Yue, Fan Kaifeng, Yan Long // *Geofluids*. – 2020. – Article ID 6683311. DOI: 10.1155/2020/6683311. URL: [https://www.researchgate.net/publication/348022606_Numerical_Analysis_of_Slope_Stability_](https://www.researchgate.net/publication/348022606_Numerical_Analysis_of_Slope_Stability_under_Reservoir_Water_Level_Fluctuations_Using_a_FEM-LEM-Combined_Method)

что для оценки устойчивости откосных сооружений физико-механических свойств горных пород явно недостаточно. Совпадение направления действия растягивающих напряжений и направления нормалей к берегам трещин, даже не относящихся к главным системам, ведёт к значительному риску их развития в массиве вплоть до полной потери устойчивости последнего.

2. Решение методом конечных элементов плоской задачи напряжённо-деформированного состояния массива горных пород в окрестности открытой горной выработки выявило зоны опасной концентрации растягивающих напряжений и направления их действия на горные породы в зависимости от взаимного положения откоса уступа и трещин в нём.
3. Результаты проведенного исследования рассматриваются авторами как основа создания методики учёта влияния параметров трещиноватости на распределение напряжений внутри массива горных пород. Особенно актуально данное исследование для прогноза устойчивости откосных сооружений при ведении открытых горных работ, сооружении земляных выемок в трещиноватых скальных массивах. Применение геомеханического обоснования устойчивости откосных сооружений с учётом параметров трещиноватости может послужить отправной точкой для принятия технологических решений, направленных на изменение положения горных выработок в пространстве для повышения их устойчивости.

[under_Reservoir_Water_Level_Fluctuations_Using_a_FEM-LEM-Combined_Method](https://doi.org/10.1007/s10064-020-01935-3) (дата обращения: 07.08.2021).

7. Investigating the effect of jointed environment on the cracked concrete arch dam in 3D conditions using FEM / Armaghani Danial Jahed, Bayat Vahid, Koopialipoor Mohammadreza, Binh Thai Pham // *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. – 2020. – V. 80. – Iss. 1. – P. 55–70. DOI: 10.1007/s10064-020-01935-3
8. Kaya Ayberk, Uzun Salih. 2D- and 3D-FEM modeling of rock masses at the Silenkar viaduct site (NE Turkey) with regard to bearing capacity // *Arabian Journal of Geosciences*. – 2021. – V. 14. – Iss. 17. – Article ID 1726. DOI: 10.1007/s12517-021-08208-7
9. A discontinuous discrete fracture model for coupled flow and geomechanics based on FEM / Wei Shiming, Kao Jiawei, Jin Yan, Shi Can, Xia Yang, Liu Shun // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2021. – V. 204. – P. 108677. DOI: 10.1016/j.petrol.2021.108677
10. Numerical simulation of dynamic catastrophe of slope instability in three Gorges reservoir area based on FEM and SPH method / Su Zhengyang, Wang Guizhi, Wang Yakun, Luo Xiang, Zhang Hao // *Natural Hazards*. – 2021. DOI: 10.1007/s11069-021-05075-z
11. Dudek M., Tajdus K. FEM for prediction of surface deformations induced by flooding of steeply inclined mining seams // *Geomechanics for Energy and the Environment*. – 2021. – V. 28. – P. 100254. DOI: 10.1016/j.gete.2021.100254. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352380821000228?via%3Dihub> (дата обращения: 07.08.2021).
12. Kinematic-based failure angle analysis for discontinuity-controlled rock slope instabilities: a case study of Ren Yi Peak Cluster in Fusong County, China / Jianhua Yan, Jianping Chen, Yuchao Li, Zhihai Li, Yansong Zhang, Xin Zhou, Qaiser Mehmood, Jing Liu, Zhou Wang // *Nat Hazards*. – 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11069-021-05137-2>

13. A multidisciplinary approach to study slope instability in the Alboran Sea shoreline: study of the Tamegaret deep-seated slow-moving landslide in Northern Morocco / A. Bounab, Y. El Kharim, R. El Hamdouni, R. Hlila // *Journal of African Earth Sciences*. – 2021. – V. 184. – P. 104345. DOI: 10.1016/j.jafrearsci.2021.104345
14. Efficient slope reliability analysis using adaptive classification-based sampling method / Li Xueyou, Liu Yadong, Yang Zhiyong, Meng Zhenzhu, Zhang Limin // *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. – 2021. – V. 80. – Iss. 12. – P. 8977–8993. DOI: 10.1007/s10064-021-02476-z
15. Hoek E., Bray J.W. *Rock slope engineering*. – London: Institution of Mining and Metallurgy, 1977. – 402 p.
16. Tang Chun'An, Hudson J.A. *Rock failure mechanisms: illustrated and explained*. – London: CRC Press, 2010. – 364 p.
17. Zárate F., Oñate E. A simple FEM–DEM technique for fracture prediction in materials and structures // *Computational Particle Mechanics*. – 2015. – № 2 (3). – P. 301–314. DOI: 10.1007/s40571-015-0067-2
18. Insights on surface spalling of rock / A. Tarokh, C.S. Kao, A. Fakhimi, J.F. Labuz // *Computational Particle Mechanics*. – 2016. – № 3. – P. 391–405. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40571-016-0108-5>
19. Look Burt G. *Handbook of geotechnical investigation and design tables*. – London: Taylor & Francis Group, 2007. – 331 p. URL: https://www.academia.edu/5234867/Hand_Book_of_Geotechnical_Investigation_and_Design_Tables (дата обращения: 03.05.2021).
20. Majid Noorian Bidgolia, Zhihong Zhaob, Lanru Jing. Numerical evaluation of strength and deformability of fractured rocks // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. – 2013. – V. 5. – Iss. 6. – P. 419–430. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jrmge.2013.09.002>
21. Mahabadi O., Lisjak A. Application of FEMDEM to analyze fractured rock masses // *International Discrete Fracture Network Engineering Conference*. – Vancouver, BC, 2014. DOI: 10.13140/2.1.4463.9687. URL: https://www.researchgate.net/publication/267776841_Application_of_FEMDEM_to_analyze_fractured_rock_masses (дата обращения: 03.05.2021).
22. Ylber Muceku, Oltion Korini, Alban Kuriqi. Geotechnical analysis of hill's slopes areas in heritage town of Berati, Albania // *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. – 2016. – № 60 (1). – P. 61–73. DOI: 10.3311/PPci.7752
23. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200000 Издание второе. Серия Кузбасская. Лист N-45-IX (Крапивинский). Объяснительная записка / П.Ф. Лавренов, Б.А. Снежко, А.Ф. Щигрев и др. – М.: МФ ВСЕГЕИ, 2015. – 156 с.
24. Физико-технические свойства горных пород и углей Кузнецкого бассейна: справочник / Г.Г. Штумпф, Ю.А. Рыжков, В.А. Шаламанов, А.И. Петров. – М.: Недра, 1994. – 447 с.
25. Мартыанов В.Л. Оценка сложности отработки карьерных полей угольных месторождений Кузбасса // *Техника и технология горного дела*. – 2018. – № 1. – С. 35–41. DOI: 10.26730/2618-7434-2018-1-35-41
26. Gogolin V., Lesin Y., Djagileva A. The length of bearing pressure zone for the flat seams extraction in a linear deformation rock // *E3S Web of Conferences*. – 2017. DOI: 10.1051/e3sconf/20171501001. URL: https://www.researchgate.net/publication/315958632_The_Length_Of_Bearing_Pressure_Zone_For_The_Flat_Seams_Extraction_In_A_Linear_Deformation_Rock (дата обращения: 03.05.2021).
27. Ольховатенко В.Е. *Инженерная геология угольных месторождений Кузнецкого бассейна*. – Томск: Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2014. – 150 с.
28. Кацубин А.В., Федотов А.А. Систематизация горно-геологических условий угленасыщенных и безугольных зон разрезов Кузбасса // *Техника и технология горного дела*. – 2019. – № 3. – С. 60–75. DOI: 10.26730/2618-7434-2019-3-60-75
29. Бестранспортная технология разработки законсервированных запасов угля по пласту VI на разрезе «Томусинский» / М.А. Тюленев, С.О. Марков, А.Б. Паламарчук, Т.Н. Гвоздкова // *Техника и технология горного дела*. – 2020. – № 3 (10). – P. 18–57. DOI: 10.26730/2618-7434-2020-3-18-57
30. The features of three-and four-tier internal dumps capacity calculation with the additional capacity preparation in the dump tiers / T. Gvozdikova, E. Kuznetsov, A. Rudakova, S. Markov // *E3S Web of Conferences*. – 2017. – V. 15. – Article 01008. DOI: 10.1051/e3sconf/20171501008. URL: https://www.researchgate.net/publication/315993559_The_features_of_three-and_four-tier_internal_dumps_capacity_calculation_with_the_additional_capacity_preparation_in_the_dump_tiers (дата обращения: 03.05.2021).
31. Influence of the rigid connection between discs in the tetrahedral prisms on equivalent stresses when cutting work faces / A.A. Khoreshok, L.E. Mametyev, A.Y. Borisov, A.V. Vorobyev // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2016. – V. 127 (1). – Article 012039. DOI: 10.1088/1757-899X/127/1/012039. URL: https://www.researchgate.net/publication/302062016_Influence_of_the_Rigid_Connection_Between_Discs_in_the_Tetrahedral_Prism_on_Equivalent_Stresses_When_Cutting_Work_Faces (дата обращения: 03.05.2021).

Поступила: 02.10.2021 г.

Информация об авторах

Марков С.О., кандидат технических наук, доцент кафедры маркшейдерского дела и геологии Кузбасского государственного технического университета имени Т.Ф. Горбачева; доцент, Филиал Кузбасского государственного технического университета имени Т.Ф. Горбачева в г. Междуреченске.

Хорешок А.А., доктор технических наук, профессор, директор Горного института Кузбасского государственного технического университета имени Т.Ф. Горбачева.

Тюленев М.А., кандидат технических наук, профессор кафедры открытых горных работ Кузбасского государственного технического университета имени Т.Ф. Горбачева.

UDC 622.011.4

INFLUENCE OF FRACTURE INCIDENCE ANGLE ON THE LOCAL STRESS STATE OF THE NEAR-SLOPE ZONE OF THE OVERBURDEN LEDGE

Sergey O. Markov¹,
markovso@kuzstu.ru

Alexey A. Khoreshok¹,
haa.omit@kuzstu.ru

Maxim A. Tyulenev¹,
tma.geolog@kuzstu.ru

¹ T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University,
28, Vesenniyaya street, Kemerovo, 650000, Russia.

² Mezhdurechensk Branch of T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University,
36, Stroiteley avenue, Mezhdurechensk, 652877, Russia.

Relevance. The stress-strain state of the rock massif during open-pit mining of mineral deposits, as well as during construction in excavations of significant size, depends on both the mechanical properties of rocks and the structural and textural features of the rock massif. In particular, the presence of cracks in the near-slope zone of the ledge can significantly weaken its stability, and the direction and angle of crack incidence relative to the ledge slope change the location of stress zones within the massif relative to the surface of the outcrop. The identification of zones of increased mechanical stresses in order to predict the behavior of rock massifs with different structural-textural properties is an urgent scientific and practical task.

The main aim is identification of the stress concentration zones in the near-slope part of the ledge in the rock massif with different structural-textural properties during open-pit mining.

Methods: mathematical modeling of rock massifs with regard to their physical and mechanical properties and structural and textural features using the finite element method, processing the results of experimental studies.

Results. The paper introduces the description of the mathematical model of the elastic behavior of a natural fractured rock massif with an outcrop surface in the form of a ledge, as well as the laws of stress concentration distribution in it. The stress-strain state of loaded and unloaded massifs in the undisturbed and disturbed by cracks of different orientation states is described, and their values for ledges with different structure are compared. The authors have revealed the increased values of tensile stresses in the massif in the direction of crack incidence from the ledge slope compared to the undisturbed state and in the direction of crack incidence toward the ledge slope.

Key words:

Finite element method, stress-strain state, rock stability, fracturing, stress concentration, rock massif structure.

REFERENCES

- Desrues J., Argilaga A., Caillerie D., Combe G., Nguyen T.K., Richefeu V., Dal Pont S. From discrete to continuum modelling of boundary value problems in geomechanics: an integrated FEM-DEM approach. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2019, vol. 43, Iss. 5, pp. 919–955. DOI: 10.1002/nag.2914.
- Mingyang Lu, Wuliang Yin, Shijie Sun, Jiangtao Sun, Zhang Cao, Lijun Xu. Forward solver for deep earth exploration and induction logging using custom built Edge-Element FEM technique. *Acta Geologica Sinica – English Edition*, 2019, vol. 93, Iss. S1, pp. 302–304. DOI: <https://doi.org/10.1111/1755-6724.14107>
- Xie Jiatong, Qin Qirong, Fan Cunhui. Quantitative prediction of fracture distribution of the Longmaxi formation in the Dingshan area, China using FEM numerical simulation. *Acta Geologica Sinica – English Edition*, 2019, vol. 93, Iss. 6, pp. 1662–1672. DOI 10.1111/1755-6724.13815
- Sertabipoglu Zeynep, Ozer Umit, Tuncdemir Hakan. Assessment of slope instability with effects of critical displacement by using InSAR and FEM. *Arabian Journal of Geosciences*, 2020, vol. 13, Iss. 4. DOI: 10.1007/s12517-020-5164-8
- Massaro S., Sulpizio R., Norini G., Groppelli G., Costa A., Capra L., Lo Zupone G., Porfido M., Gabrieli A. Analysing stress field conditions of the Colima Volcanic Complex (Mexico) by integrating finite-element modelling (FEM) simulations and geological data. *Solid Earth*, 2020, vol. 11, Iss. 6, pp. 2515–2533. DOI: 10.5194/se-11-2515-2020
- Meng Qingxiang, Qian Kun, Zhong Lin, Gu Jinjian, Li Yue, Fan Kaifeng, Yan Long. Numerical analysis of slope stability under reservoir water level fluctuations using a FEM-LEM-combined method. *Geofluids*, 2020, Article ID 6683311. DOI: 10.1155/2020/6683311. Available at: https://www.researchgate.net/publication/348022606_Numerical_Analysis_of_Slope_Stability_under_Reservoir_Water_Level_Fluctuations_Using_a_FEM-LEM-Combined_Method (accessed 07 August 2021).
- Armaghani Danial Jahed, Bayat Vahid, Koopialipour Mohammadreza, Binh Thai Pham. Investigating the effect of jointed environment on the cracked concrete arch dam in 3D conditions using FEM. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2020, vol. 80, Iss.1, pp. 55–70. DOI: 10.1007/s10064-020-01935-3
- Kaya Ayberk, Uzun Salih. 2D- and 3D-FEM modeling of rock masses at the Silenkar viaduct site (NE Turkey) with regard to bearing capacity. *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, vol. 14, Iss. 17, Article ID 1726. DOI: 10.1007/s12517-021-08208-7
- Wei Shiming, Kao Jiawei, Jin Yan, Shi Can, Xia Yang, Liu Shun. A discontinuous discrete fracture model for coupled flow and geomechanics based on FEM. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, vol. 204, p. 108677. DOI: 10.1016/j.petrol.2021.108677
- Su Zhengyang, Wang Guizhi, Wang Yakun, Luo Xiang, Zhang Hao. Numerical simulation of dynamic catastrophe of slope instability in three Gorges reservoir area based on FEM and SPH method. *Natural Hazards*, 2021. DOI: 10.1007/s11069-021-05075-z
- Dudek M., Tajdus K. FEM for prediction of surface deformations induced by flooding of steeply inclined mining seams. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 2021, vol. 28, p. 100254. DOI: 10.1016/j.gete.2021.100254. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352380821000228?via%3Dihub> (accessed 07 August 2021).
- Jianhua Yan, Jianping Chen, Yuchao Li, Zhihai Li, Yansong Zhang, Xin Zhou, Qaiser Mehmood, Jing Liu, Zhou Wang. Kine-

- matic-based failure angle analysis for discontinuity-controlled rock slope instabilities: a case study of Ren Yi Peak Cluster in Fusong County, China. *Nat Hazards*, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11069-021-05137-2>.
13. Bounab A., El Kharim Y., El Hamdouni R., Hlila R. A multidisciplinary approach to study slope instability in the Alboran Sea shoreline: study of the Tamegaret deep-seated slow-moving landslide in Northern Morocco. *Journal of African Earth Sciences*, 2021, vol. 184, p. 104345. DOI: 10.1016/j.jafrearsci.2021.104345
 14. Li Xueyou, Liu Yadong, Yang Zhiyong, Meng Zhenzhu, Zhang Limin. Efficient slope reliability analysis using adaptive classification-based sampling method. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2021, vol. 80, Iss. 12, pp. 8977–8993. DOI: 10.1007/s10064-021-02476-z
 15. Hoek E., Bray J.W. *Rock slope engineering*. London, Institution of Mining and Metallurgy, 1977. 402 p.
 16. Tang Chun'An, Hudson J.A. *Rock failure mechanisms: illustrated and explained*. London, CRC Press, 2010. 364 p.
 17. Zárate F., Oñate E. A simple FEM–DEM technique for fracture prediction in materials and structures. *Computational Particle Mechanics*, 2015, no. 2 (3), pp. 301–314. DOI: 10.1007/s40571-015-0067-2.
 18. Tarokh A., Kao C.S., Fakhimi A., Labuz J.F. Insights on surface spalling of rock. *Computational Particle Mechanics*, 2016, no. 3, pp. 391–405. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40571-016-0108-5>
 19. Look Burt G. *Handbook of geotechnical investigation and design tables*. London, Taylor & Francis Group, 2007. 331 p. Available at: https://www.academia.edu/5234867/Hand_Book_of_Geotechnical_Investigation_and_Design_Tables (accessed 03 May 2021).
 20. Majid Noorian Bidgolia, Zhihong Zhaob, Lanru Jing. Numerical evaluation of strength and deformability of fractured rocks. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2013, vol. 5, Iss. 6, pp. 419–430. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jrmge.2013.09.002>
 21. Mahabadi O., Lisjak A. Application of FEMDEM to analyze fractured rock masses. *International Discrete Fracture Network Engineering Conference*. Vancouver, BC, 2014. DOI: 10.13140/2.1.4463.9687. Available at: https://www.researchgate.net/publication/267776841_Application_of_FEMDEM_to_analyze_fractured_rock_masses (accessed 03 May 2021).
 22. Ylber Muceku, Oltion Korini, Alban Kuriqi. Geotechnical analysis of hill's slopes areas in heritage town of Berati, Albania. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 2016, no. 60 (1), pp. 61–73. DOI: 10.3311/PPci.7752
 23. Lavrenov P.F., Snezhko B.A., Shchigrev A.F. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii. Mashtab 1:200000 Izdanie vtoroe. Seriya Kuzbasskaya. List N-45-IX (Krapivinskij). Obyasnitelnaya zapiska* [State geological map of the Russian Federation. Scale 1:200000. Second edition. Kuzbass series. Sheet N-45-IX (Krapivinsky). Explanatory letter]. Moscow, MF VSEGEI Publ., 2015. 156 p.
 24. Shtumpf G.G., Ryzhkov Yu.A., Shalamanov V.A., Petrov A.I. *Fiziko-tehnicheskie svoystva gornykh porod i ugley Kuznetskogo basseyna: spravochnik* [Physical and technical properties of rocks and coals of the Kuznetsk Basin: handbook]. Moscow, Nedra Publ., 1994. 447 p.
 25. Martyanov V.L. Evaluation of the working out difficulty on quarry fields of Kuzbass coal deposits. *Journal of Mining and Geotechnical Engineering*, 2018, no. 1, pp. 35–41. In Rus. DOI: 10.26730/2618-7434-2018-1-35-41.
 26. Gogolin V., Lesin Y., Djagileva A. The length of bearing pressure zone for the flat seams extraction in a linear deformation rock. *E3S Web of Conferences*. 2017. DOI: 10.1051/e3sconf/20171501001. Available at: https://www.researchgate.net/publication/315958632_The_Length_Of_Bearing_Pressure_Zone_For_The_Flat_Seams_Extraction_In_A_Linear_Deformation_Rock (accessed 03 May 2021).
 27. Olkhovatenko V.E. *Inzhenernaya geologiya ugolnykh mestorozhdeniy Kuznetskogo basseyna* [Engineering geology of coal deposits of the Kuznetsk Basin]. Tomsk, TSUAB Publ., 2014. 150 p.
 28. Katsubin A.V., Fedotov A.A. Systematization of the mining and geological conditions of the coal-bearing and coal-free zones of the Kuzbass open pits. *Journal of Mining and Geotechnical Engineering*, 2019, no. 3, pp. 60–75. In Rus. DOI: 10.26730/2618-7434-2019-3-60-75.
 29. Tyulenev M., Markov S., Palamarchuk A., Gvozdokva T. Direct dumping technology of stockpiled coal reserves mining along the seam VI at the Tomusinsky open pit mine. *Journal of Mining and Geotechnical Engineering*, 2020, no. 3 (10), pp. 18–57. In Rus. DOI: 10.26730/2618-7434-2020-3-18-57.
 30. Gvozdokva T., Kuznetsov E., Rudakova A., Markov S. The features of three- and four-tier internal dumps capacity calculation with the additional capacity preparation in the dump tiers. *E3S Web of Conferences*, 2017, vol. 15. Article 01008. DOI: 10.1051/e3sconf/20171501008. Available at: https://www.researchgate.net/publication/315993559_The_features_of_three_and_four_tier_internal_dumps_capacity_calculation_with_the_additional_capacity_preparation_in_the_dump_tiers (accessed 03 May 2021).
 31. Khoreshok A.A., Mametyev L.E., Borisov A.Y., Vorobyev A.V. Influence of the rigid connection between discs in the tetrahedral prisms on equivalent stresses when cutting work faces. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 127 (1). Article 012039. Available at: https://www.researchgate.net/publication/302062016_Influence_of_the_Rigid_Connection_Between_Discs_in_the_Tetrahedral_Prisms_on_Equivalent_Stresses_When_Cutting_Work_Faces (accessed 03 May 2021).

Received: 2 October 2021.

Information about the authors

Sergey O. Markov, Cand. Sc., associate professor, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University; associate professor, Mezhdurechensk Branch of T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University.

Alexey A. Khoreshok, Dr. Sc., professor, director, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University.

Maxim A. Tyulenev, Cand. Sc., professor, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University.

УДК 622.267.7

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ И ОРГАНИЧЕСКИХ СКРЕПЛЯЮЩИХ СОСТАВОВ ПРИ РЕМОНТЕ ПОДЗЕМНЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК

Цибаев Сергей Сергеевич¹,
cibaevss@kuzstu.ru

Зорков Данил Викторович¹,
zorkovdv@kuzstu.ru

Ренев Алексей Агафангелович¹,
raa@kuzstu.ru

Ванг Цин²,
qwang@sdust.edu.cn

¹ Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева,
Россия, 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28.

² Шаньдунский научно-технический университет,
КНР, 266590, г. Циндао, Шоссе Циеньваньган, 579.

Актуальность. Для предупреждения обрушений, вывалов угля и породы в подготовительных выработках при ремонтных работах широко применяются специальные скрепляющие материалы и технологии, обеспечивающие повышение устойчивости пород в кровле, угля в боках, заполнение видимых раскрытых трещин, пустот. Технология химического упрочнения успешно применяется на отечественных и зарубежных шахтах уже более 30 лет. Сущность этой технологии заключается в скреплении неустойчивого массива специальными составами. Область их применения является очень широкой. Известно, что наличие вывалов пород из кровли и боков приводят к образованию куполов, значительному увеличению высоты выработки, образованию глубоких отжимов угля в боках. Наличие куполов, вывалов, глубоких отжимов являются местами скопления метана в высоких выработках. В связи с этим скрепляющие составы составляют основу новых технологий при ремонте горных выработок, их перекрепке, ликвидации завалов и куполов.

Цель: разработка проектных решений и обоснование параметров упрочнения массива горных пород современными скрепляющими составами при ремонте и восстановлении подземных горных выработок.

Методы: натурные исследования, статистическая обработка результатов экспериментальных исследований.

Результаты. Рассмотрен вопрос применения скрепляющих материалов при ремонте и перекрепке горных выработок. Проведен комплексный анализ различных по основному скрепляющему компоненту скрепляющих составов, учитывающий их характеристики, область применения и требования к оборудованию для производства работ. Выделено восемь основных групп составов. Предложена технологическая схема упрочнения пород кровли и боков на участках сопряжений подготовительных горных выработок с использованием инъекционного упрочнения полиуретановыми составами.

Ключевые слова:

Устойчивость горных выработок, ремонт горных выработок, анкерное крепление, скрепляющие составы, химическое упрочнение.

Введение

Ведение горных работ в зонах неустойчивых горных пород сопряжено с повышенной опасностью. Наиболее характерные места возникновения таких зон – геологические нарушения. При работе в таких зонах возникает высокая вероятность массовых вывалов пород в горные выработки, что может привести к травмам горнорабочих и повреждению оборудования. Кроме того, эти зоны в виду сильной трещиноватости, как правило, обладают повышенной газо-, воздухо- и водопроницаемостью, что помимо вывалов также представляет серьезную опасность.

Проблемы возникают не только при неустойчивых вмещающих породах, но и угле. К проблемным можно отнести участки со слабым, склонным к интенсивному отжиму углем и с сильно трещиноватым кливажистым углем [1–3]. Проблемными местами, требующими дополнительного упрочнения даже при относительно устойчивых породах, также являются:

- кровля и бока передовых выработок, переходимых очистным забоем;
- сопряжения очистных забоев с выработками, оконтуриваемыми выемочным столбом;
- демонтажные камеры;
- участки выемочного столба и целиков, попадающие в зоны повышенного горного давления (ЗПГД). Следует отметить, что описанные выше зоны встречаются практически на каждой шахте. На многих шахтах ведение горных работ осложнено большим количеством геологических нарушений, которые периодически снижают эффективность подготовительных и очистных работ. Наибольшее распространение в качестве таких составов получили синтетические двухкомпонентные смолы [4]. В отечественной угольной промышленности технология получила широкое применение относительно недавно, хотя положительные результаты ее применения в Кузбассе были получены еще в 80-х гг. прошлого века.

Анализ составов и областей применения современных скрепляющих составов горных пород

Скрепляющие составы получают путем соединения двух химических компонентов, отверждающихся в холодном состоянии при их соединении и обеспечивающих необходимую прочность адгезии к горным породам. В качестве основного компонента состава обычно используют полимерные смолы: полиэфирную, карбамидоформальдегидную, фенолоформальдегидную, эпоксидную и пр. Вторым компонентом состава является отвердитель смолы с различными добавками и наполнителями, улучшающими технологические свойства и качество упрочнения горного массива.

Скрепляющие материалы должны обеспечивать их применение по двух- или однокомпонентной схеме, удовлетворять основному способу их применения – нагнетанию в массив.

Для упрочнения пород нагнетанием чаще всего применяют двухкомпонентную схему подачи состава, при которой каждый из компонентов (смола и отвердитель) подаются к пробуренному в породе шпuru отдельно, каждый по своему шлангу, а смешивание производится уже в шпуре поступлением в трещины [5, 6]. Иногда нагнетание скрепляющих составов (на основе карбамидных смол, вяжущих, цементов) производят по однокомпонентной схеме, при которой смешивание обоих компонентов осуществляется предварительно перед насосом.

Основным показателем допустимости скрепляющего состава для упрочнения горных пород служит критерий его адгезионной прочности к субстрату (породе) [7]. На основании опытных работ в зарубежной и отечественной практике приняты следующие необходимые и достаточные величины адгезионной прочности полимерного связующего состава к породам по требуемой величине деформации растяжения: не менее 1,5 МПа для пластичных составов (типа полиуретановых) и не менее 2,0 МПа для относительно хрупких составов. Эти критерии прочности справедливы для любого типа горных пород и их горно-геологического и эксплуатационного состояния [8]. Скрепляющие составы должны учитывать физико-механические и физико-химические свойства горных пород.

Склонные к трещинообразованиям и обрушениям породы большей частью представляют собой алевролиты и аргиллиты – углистые, глинистые или песчаные сланцы, которые могут содержать прослойки угля, глины, известняка, включающего соли угольной кислоты (карбонаты) песчаника и других минералов. Иногда встречаются также сыпучие породы мелких фракций, породы типа «мыльник» с ярко выраженными зеркалами скольжения породы, представляющие прочные угловатые куски неправильной формы, сцементированные непрочным углисто-глинистым минералом [9].

При выборе скрепляющих составов учитывается естественное состояние упрочняемых горных пород, характеризуемое их химико-минералогическим составом (As, Na⁺, Ca⁺⁺ и пр.) и водородным показателем pH водной вытяжки, который может колебаться в

широких пределах: 1–2 – кислые воды, 10–12 – щелочные воды.

Важное значение для выбора скрепляющего состава имеет преобладающая степень величины раскрытия трещин: если она мала (менее 1 мм), то прочность соединения блоков определяется их фрикционной связью и характеризуется главным образом адгезией состава к породе; если значительна (2–3 мм), во внимание принимается также когезионная прочность самого состава, так как система «субстрат–адгезив» (порода – связующий состав) работает как композит из двух материалов [10]. В этом случае показатель прочности связующего состава в отвержденном виде должен приближаться к соответствующему показателю породы.

Положительным качеством скрепляющего состава является его вспенивание – расширение (увеличение в объеме) в процессе полимеризации. Вспенивание приводит к возникновению дополнительных, распорных сил между блоками пород, способствующих их удержанию в равновесном состоянии.

Для сопротивления сдвигающим деформациям от возможного воздействия проводимых вблизи зоны упрочнения горных работ, в т. ч. динамического характера (например, взрывных), к скрепляющим составам предъявляется требование пластичности в процессе отверждения и эластичности в отвержденном виде [11, 12].

В зависимости от свойств упрочняемого и/или заполняемого массива, требуемого эффекта, применяют следующие типы составов:

- мочевиные;
- карбамидные;
- магнезиальные;
- на основе фенолоформальдегидных смол;
- органоминеральные;
- цементосодержащие;
- фенольные;
- полиуретановые.

На основе мочевины применяются следующие скрепляющие составы: «Iglaneige-PL», «Mariklej». Скрепляющий состав «Iglaneige-PL» представляет собой двухкомпонентную мочевиновую пену. Мочевинная смола смешивается с катализатором, получается мочевиновая пена. Состав характеризуется следующими данными:

- быстро вспенивается и хорошо заполняет пустоты;
- обладает высокими герметизирующими качествами;
- антистатические свойства пены;
- время реакции при смешивании компонентов – 0,5 мин;
- количество исходного материала для получения 1 м³ пены – 35 кг.

Состав имеет следующие области применения:

- заполнение закрепленных пустот;
- возведение вентиляционных перемычек;
- быстрое возведение изоляционных перемычек при авариях.

Мочевинный клей «Mariklej» предназначен в основном для упрочнения угля. Характеризуется хорошей адгезией, отсутствием агрессивности и токсичности. «Mariklej» рекомендуется для упрочнения уг-

лепородного массива при восстановлении аварийных участков горных выработок.

Карбамидные скрепляющие составы применяются для опережающего упрочнения угольных массивов, пород в выработках при очистных работах. Карбамидоформальдегидные составы на основе смол типа КФ-МТ, КФ-Ж, МФ-17 нашли довольно широкое применение, хотя практика показала их меньшую универсальность по сравнению с пенополиуретановыми составами. Составы холодного отверждения приготавливаются на основе карбамидоформальдегидных смол и отвердителя в виде 5–10%-х растворов ортофосфорной кислоты, хлористого железа или щавелевой кислоты. Нагнетание состава в массив производится по однокомпонентной схеме через шпур. Для повышения пластичности карбамидных составов разработаны специальные пластификаторы на основе акрилатных латексов. Установлено, что при введении в состав смолы КФ-Ж и отвердителя $FeCl_3$ 30 % латекса МБМ-5с эластичность состава существенно повышается.

Скрепляющие *магнезиальные* составы рекомендуются применять для опережающего упрочнения разрушенных (трещиноватых) пород и угля в следующих случаях:

- при проходке, поддержании и ремонте основных и подготовительных выработок;
- в монтажных и демонтажных камерах.

Упрочнение нарушенных трещинами горных пород и угля магнезиальным скрепляющим составом (вяжущим) является профилактической мерой, препятствующей трещинообразованию и обрушению неустойчивых пород в нарушенных зонах. Технология физико-химического упрочнения основана на принудительном нагнетании через шпур в трещиноватые породы (с раскрытием трещин 1,5 мм и более) жидкого магнезиального состава, который при отверждении связывает блоки пород или угля между собой, повышая общую устойчивость углепородного массива. Отверждение магнезиального состава (вяжущего) происходит в результате химической реакции при смешивании хлористого магния $MgCl_2$ и окиси магния MgO . В зависимости от условий упрочнений состав может нагнетаться в шпур с предварительно заложенными в них армирующими элементами (металлическими, полимерными, деревянными стержнями и т. д.), которые закрепляются по всей длине магнезиальным вяжущим и повышают несущую способность кровли благодаря ее дополнительному армированию. К достоинствам магнезиального вяжущего относятся высокие адгезионные и прочностные характеристики, хорошая проникающая способность, отсутствие усадки после отверждения, низкая стоимость по сравнению с другими скрепляющими составами, возможность длительного хранения исходных компонентов [13]. Однако основным преимуществом магнезиального вяжущего является то, что химический состав пород и количество влаги в них не оказывают существенного влияния на процесс отверждения нагнетаемого состава и на качество упрочнения.

Нагнетание магнезиальных скрепляющих составов в массив производится по однокомпонентной схеме.

Из известных в мировой и отечественной практике способов повышения устойчивости горного массива наиболее прогрессивным является упрочнение пород и угля скрепляющими составами на основе *фенолоформальдегидных* синтетических смол. Применение скрепляющих составов на основе фенолоформальдегидной смолы предусматривает:

- предупреждение обрушений, вывалов угля и породы в подготовительных и очистных забоях;
- повышение устойчивости пород и угля на сопряжениях выработок;
- повышение устойчивости пород и угля в выработках в зонах влияния геологических нарушений.

Из опытно-промышленного применения скрепляющего состава на основе фенолоформальдегидных смол [14, 15] установлено, что через 1,5–3 часа после нагнетания горный массив приобретает устойчивость, обеспечивающую безопасность и безаварийность продолжения работ по очистной выемке угля и проведению капитальных и подготовительных горных выработок.

Органоминеральные скрепляющие составы позволяют быстро и эффективно производить заполнение пустот, вывалов, осуществлять заделку трещин. Из органоминеральных составов на отечественных шахтах применяются: «Геофлекс», «Tekflex», «Геофом».

Органоминеральная смола «Геофлекс» состоит из двух жидких компонентов: А и В. «Геофлекс» относится к категории моментальных клеев. Не увеличивается в объеме после реакции компонентов. Подача состава в массив осуществляется насосной установкой, состоящей из двух одинаковых насосов.

Область применения:

- упрочнение трещиноватого массива;
- заполнение трещин без разрушения угля и породы.

Состав «Tekflex» состоит из двух компонентов: жидкого полимерного компонента и цементного порошка. Состав применяется с помощью пневматического насоса. Наносится после перемешивания на обрабатываемую поверхность выработки путем аэрозольного распыления. При производстве ремонтных работ в горных выработках состав может применяться:

- для удержания поверхности пород кровли от обрушения;
- удержания поверхности угля в боках выработок от вывалов;
- замены решетчатой затяжки;
- использования в качестве набрызг-бетона;
- защиты поверхностей выработок от атмосферных воздействий.

Состав «Геофом» – органоминеральная смола, состоит из двух жидких компонентов. Одним компонентом является модифицированное жидкое стекло – А, компонент В – модифицированный изоцианат [16]. Составы подаются отдельно по своим шлангам до смесителя. В смесителе перемешиваются и далее путем набрызга наносятся на подготовленную поверхность

выработки. Реакция компонентов происходит с увеличением объема состава. Состав относится к расширяющимся. После смешивания смола вспенивается в течение нескольких секунд. При производстве ремонтных работ состав «Геофом» может применяться:

- для заполнения пустот;
- заполнения куполов;
- заполнения открытых трещин;
- связывания разрушенных пород.

Благодаря простоте подготовки состава для подачи в массив, отсутствия токсичности, возгораемости получают широкое применение на шахтах следующие *цементосодержащие* скрепляющие материалы: «Текбленд», «Текфом», «Защита», «Барьер», «Распор».

Скрепляющий состав «Текбленд» – это однокомпонентный состав в виде цементного порошка серого цвета. После смешивания с водой и отверждения образуется легкий бетон. Подача водоцементной смеси к месту выполняемых работ производится при помощи насосного агрегата. Состав «Текбленд» не горюч, не токсичен, не взрывоопасен. На угольных шахтах данный скрепляющий состав получил широкое применение при возведении безврубловых, взрывоустойчивых, изоляционных перемычек. Основная область применения состава:

- возведение взрывоустойчивых противопожарных перемычек;
- возведение водоупорных, изолирующих перемычек;
- заполнение закрепленного пространства и куполов в выработках.

«Текфом» – это специальная цементная смесь, образующая легкую вспененную массу – пенобетон. Отличается от «Текбленда» пригодностью состава к применению высокотехнологичной технологии подачи и укладки пенобетона. В связи с этим «Текфом» рекомендуется к использованию при ремонте горных выработок для заполнения вывалов в кровле и боках выработок, куполов в кровле, глубоких отжимов в боках.

Скрепляющий состав «Защита» представляет собой герметик, имеющий двухкомпонентный состав: сухую цементную смесь и жидкую эмульсию полимерного латекса. Применяется при ремонтах для покрытия поверхностей выработок с повышенной трещиноватостью, с открытыми трещинами. Состав обладает высокими адгезионными свойствами, имеет высокую разрывную прочность (до 4,54 МПа). Возведенное покрытие обладает защитно-поддерживающими свойствами. Нагнетание состава в массив производится по двухкомпонентной схеме.

Скрепляющий состав «Барьер» поставляется в виде цементного порошка светло-серого цвета. После смешивания с водой образуется «легкий» бетон. Является негорючим, не взрывоопасным, не токсичным материалом. При ремонте и перекрепке горных выработок рекомендуется для заполнения закрепленного пространства, пустот в боках и кровле, вывалов и куполов. Известен также под названием «пенобетон».

Особенность получения пенобетона состоит в том, что воздушные ячейки в массе бетона образуются путем физического перемешивания воздуха с цементным раствором. Материал совершенно не токсичен.

На угольных шахтах России из *фенольных* вспенивающихся скрепляющих составов в настоящее время широкое применение получают «Карбофил» и «Марифлекс» (Марифлекс).

«Карбофил» обладает высоким фактором вспенивания и высокой скоростью реакции смешивания. Состав состоит из двух жидких компонентов фенольной смолы и катализатора. После смешивания и выхода из смесителя компоненты увеличиваются в объеме и создают пенную массу. Окончательно вспенивание и расширение объема до максимальной величины происходит за 3 минуты. Область применения состава:

- заполнение вывалов в выработках в кровле и боках;
- заполнение пустот в выработках с целью предотвращения скопления метана.

Скрепляющий состав «Марифлекс» представляет собой двухкомпонентную негорючую пену, обладающую изолирующими свойствами и относительно высокой прочностью. Компонентами состава являются смола фенольная и катализатор. При смешивании образуют плотную, мгновенно увеличивающую свой объем и быстро твердеющую пену. Рабочие свойства пена приобретает в течение 5 мин. Возведенное покрытие заменяет решетчатую или сетчатую затяжку в кровле и боках ремонтируемых выработок. Основная область применения состава «Марифлекс»:

- заполнение пустот в выработках при анкерном креплении выработок;
- заполнение вывалов, куполов, трещин в кровле и боках;
- применение для набрызг-покрытия.

Полиуретановые составы получают наиболее широкое применение на угольных шахтах для упрочнения пород и угля как в очистных, так и в подготовительных выработках [17, 18]. Разработано два вида полиэфирной части смолы – нормальная, со сроком схватывания 20–30 мин, и ускоренная, отверждающаяся за 1,5–2 мин. Ускоренная система применяется в экстренных случаях. Полиуретаны являются синтетическими полимерами, нашедшими свое применение в различных областях как жесткие или эластичные материалы, не вспененные или пенопласты. Для укрепления горных пород в подземных выработках были созданы полиуретановые системы, сочетающие в себе безопасность, простоту и надежность в применении. Применение полиуретана в подземных условиях обусловлено следующими важными свойствами:

- упругость и пластичность;
- увеличение объема благодаря вспениванию;
- короткое задаваемое время отверждения;
- хорошая адгезионная способность по отношению к породам и углю;
- наличие высоких когезионных свойств;
- низкая вязкость;

- отсутствие выделения воды или растворителя при отверждении.

Полиуретан, в отличие от неорганических вяжущих составов (цемент и т. п.) и других синтетических смол, обладает необходимой упругостью и пластичностью. Это способствует тому, что отвержденный состав при смещениях массива не теряет контакта с породой и по-прежнему может выполнять свою функцию. Благодаря увеличению объема состава при смешивании компонентов расход материала уменьшается пропорционально кратности вспенивания. Увеличение объема можно использовать для самонагнетания смолы [19]. Если скважины заделываются после загрузки смолы, то увеличение объема смеси приводит к росту давления в скважине, что в свою очередь способствует проникновению смолы в разрушенный массив. Важное значение для укрепления массива имеет хорошая проникающая способность синтетической смолы, которая определяется вязкостью компонентов. После смешивания компонентов низкая начальная вязкость состава резко повышается. Это свойство имеет то преимущество, что при креплении массива повышенной трещиноватости предотвращается перетекание смеси в зоны,

слишком удаленные от подлежащих упрочнению участков. На определенном расстоянии от места нагнетания смесь сама создает себе препятствие для дальнейшего внедрения в массив.

Анализ применения фенолоформальдегидных смол на отечественных угольных шахтах показывает, что наибольшее применение получают полиуретановые составы в виде:

- химических ампул для сталеполлимерных анкеров;
- пурпатронов для упрочнения выработок на локальных участках;
- смол для упрочнения пород и угля путем нагнетания смол в массив.

Наибольшее распространение получили следующие серии полиуретановых смол: «Беведол-Беведан» («Bevedol-Bevedan») типы S, WF, WFA и др.; «Карбокрэксил Н» типы А и В; «КарбоСтоп-И».

В результате анализа характерных особенностей всех рассмотренных скрепляющих составов сформированы 13 типовых ситуаций, где составы достигают наибольшего эффекта при применении. Полученные данные сведены в табл. 1.

Таблица 1. Область применения скрепляющих составов
Table 1. Fastening compounds application area

	Наименование состава/Compound										
	П/Р		M/U	O/O		Ф/Ph		Ц/С			
	Беведол-Беведан Bevedol-Bevedan	КарбоСтоп И CarboStop I	Иглонейдж Jglonejge	Геофом/Geofoam	Геофлекс/Geoflex	Карбофилл/Carbofill	Карбофом/Carbofoam	Марифлекс/Mariflex	Текфом/Tekfoam	Текбленд/Tekblend	Текхард/Telhard
Достижимый наибольший эффект по применению The greatest application effect											
Укрепление обводненной и водоносной породы Water-saturated rocks fastening	+										
Упрочнение массива в очистных забоях и их сопряжениях Rock fastening at longwall and crossway areas	+				+	+					
Гидроизоляция Waterproofing	+	+		+							
Санация обводненных шахтных стволов Watered shafts sanitation	+										
Упрочнение грунта Soil fastening		+									
Герметизация буровых скважин Borehole sealing		+								+	
Упрочнение массива в подготовительных выработках Roadways and incline rock fastening	+				+						
Заполнение систем трещин в нарушенном массиве Systems of cracks filling in the disturbed massif					+	+		+			
Заполнение пустот и куполов Voids and domes filling			+	+		+	+	+	+	+	
Тампонаж угольного массива для уменьшения газопроницаемости Coal massif plugging to reduce gas permeability						+					
Анкерование горных пород с упрочнением окружающего массива Surroundin massif anchorage with fastening effect					+						
Заполнение и уплотнение перемычек Lintels filling and sealing				+		+		+	+	+	+
Возведение изолирующих полос, искусственных целиков Artificial pillars construction								+	+	+	

П – полиуретановые; М – мочевиные; О – органоминеральные; Ф – фенольные; Ц – цементосодержащие.
 P – polyurethane; U – urea; O – organomineral; Ph – phenol; C – cement-bearing.

Технологическая схема производства работ по упрочнению массива пород при ремонте выработок

Одним из наиболее распространённых явлений при длительной эксплуатации горных выработок является деформация углеродного массива на участках сопряжений выработок. Для предотвращения разрушения приконтурного массива пород рекомендуется произвести упрочнение боков выработок на сопряжениях скрепляющими составами типа «Беведол-Беведан» («Bevedol-Bevedan») со следующими параметрами (рис. 1), составленными с учётом требований нормативных документов и мирового опыта проведе-

ния работ по инъекционному упрочнению массивов пород [20]:

- радиус упрочнения 1500 мм;
- два шпура в вертикальном ряду;
- расстояние между шпурами в ряду 1700 мм;
- расстояние между рядами шпуров 2300 мм;
- угол наклона шпуров верхнего ряда 13°;
- длина шпуров нижнего ряда 4500 мм;
- длина шпуров верхнего ряда 4610 мм;
- глубина герметизации 1500 мм;
- давление нагнетания 2–5 МПа.

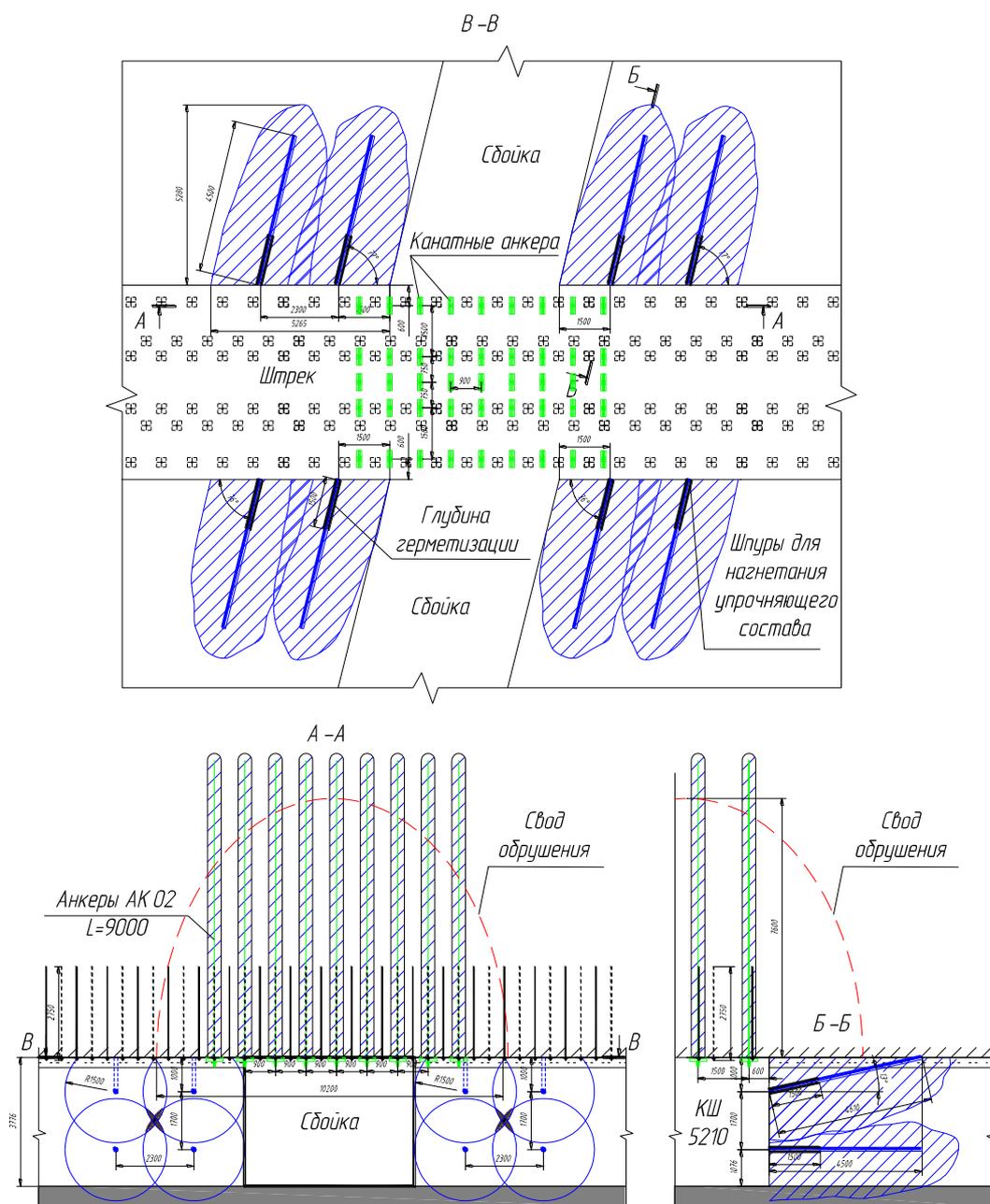


Рис. 1. Паспорт упрочнения боков и кровли штрака на сопряжении с помощью скрепляющего состава «Беведол-Беведан» («Bevedol-Bevedan»)

Fig. 1. Design project of roadway walls and roof strengthening using the fastening compound «Bevedol-Bevedan»

Анализ опыта применения скрепляющих составов при ремонте и восстановлении горных выработок показывает, что для составов с двумя компонентами, в том числе «Беведол-Беведан», широкое применение получают пневматические двухкомпонентные насосы типа SK90 1:1 (рис. 2). В табл. 2 приведены основные технические характеристики насоса SK90 1:1.



Рис. 2. Общий вид пневматического насоса SK90 1:1
 Fig. 2. Pneumatic pump SK90 1:1 general view

Таблица 2. Техническая характеристика пневматического двухкомпонентного насоса SK90 1:1

Table 2. Two-component pneumatic pump SK90 1:1 technical data

Показатель/Mark	
Рабочее давление пневмопривода, бар Pneumatic drive pressure, bar	4–7
Максимальный расход воздуха, м ³ /мин Maximum air consumption, m ³ /min	8
Максимальное давление нагнетания, бар Maximum discharge pressure, bar	160
Темп подачи полимерного состава, л/мин Feeding performance, l/min	7,5–20,0
Размеры, мм Dimensions, mm:	
длина/length	1200
ширина/width	450
высота/height	550
Масса, кг Weight, kg	80

Значение радиуса упрочнения зависит от давления при нагнетании, трещиноватости упрочняемого массива и интенсивности заполнения трещин составом. Его значение для конкретных условий может быть установлено путём контрольного нагнетания состава в шпур. Важное условие при проектировании схемы расположения шпуров – радиусы всех шпуров долж-

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анализ типовых форм деформаций приконтурного углепородного массива и особенности восстановления крепления горных выработок / С.С. Цибаев, А.А. Ренев, Ванг Цин, Юй Фэн-Хай // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 11. – С. 223–232.
2. Analysis of rock mass and anchor support elements deformations during the long-term maintenance of mine workings / S. Tsibaev, A. Renev, R. Zainulin, A. Kucherenko // Vth International Innovative Mining Symposium. – 2020. – V. 174. URL:

ны пересекаться (тёмные области на сечении А-А на рис. 1)

Диаметр шпуров, применяемых для упрочнения массива, равен 43 мм. Расстояние между шпурами в ряду определяется в зависимости радиуса упрочнения:

$$B \leq 2R_y - 0,7,$$

где B – расстояние между шпурами в ряду, м; R_y – радиус упрочнения, м.

Расстояние между рядами шпуров в зависимости от высоты бока принимается от 1,0 до 2,5 м. Ширина упрочняемой зоны должна быть не менее 5 м. Давление при нагнетании в пласт принимается от 2 до 5 МПа. Конкретное значение принимается по фактическому состоянию упрочняемого пласта при условии недопущения его дополнительного разрушения от напора при нагнетании. Угол наклона шпуров верхнего ряда принимается от 10 до 20°. Положение этих шпуров должно обеспечивать укрепление угля и ложной кровли. Длина шпуров верхнего ряда принимается в зависимости от угла их наклона. Для предотвращения выхода состава в выработку глубина герметизации должна быть не менее принятого для конкретного случая радиуса упрочнения. Она принимается от 1,3 до 2,3 м.

Выводы

1. Рассмотрен вопрос применения скрепляющих материалов при ремонте и перекрепке горных выработок. Скрепляющие составы, применяемые в отечественной и зарубежной угольной промышленности, разделяются на восемь групп по основному скрепляющему компоненту. Произведена оценка характеристик, области применения составов, требований к оборудованию для производства работ.
2. Применение скрепляющих составов в отечественной угольной промышленности сопряжено с отсутствием единой нормативной и методической документации, описывающей параметры, режимы и схемы производства работ по упрочнению массива.
3. Предложено проектное решение по упрочнению массива пород на участках сопряжений подготовительных выработок с использованием инъекционного нагнетания полиуретановых скрепляющих составов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ 075-03-2021 138/3).

<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017401001> (дата обращения 15.10.2021).

3. Renev A., Tsibaev S., Kalinin S. The evaluation of negative anthropogenic factors subjection on bolts stability and surrounding massif deformations // Coal in the 21st Century: Mining, Intelligent Equipment and Environment Protection: 9th China-Russia Symposium. – 2018. – P. 359–364. URL: <https://doi.org/10.2991/coal-18.2018.67> (дата обращения 15.10.2021).
4. Snparek R., Soucek K. Polyurethane geocomposites. mechanical properties and deformation // International Mine Water Association Proceedings. – Sevilla, Spain, 1999. – P. 657–661.

5. Shreedharan S., Kulatilake P.H.S.W. Discontinuum – equivalent continuum analysis of the stability of tunnels in a deep coal mine using the distinct element method // *Rock Mechanics And Rock Engineering*. – 2016. – № 49 (5). – P. 1903–1922. URL: https://www.researchgate.net/publication/284103706_Discontinuum-Equivalent_Continuum_Analysis_of_the_Stability_of_Tunnels_in_a_Deep_Coal_Mine_Using_the_Distinct_Element_Method (дата обращения 15.10.2021).
6. Sabri M.M., Shashkin K.G. Improvement of the soil deformation modulus using an expandable polyurethane resin // *Magazine of Civil Engineering*. – 2018. – V. 83 (7). – P. 222–234. DOI: 10.18720/MCE.83.20
7. Rock pressure manifestation in development workings advanced in a thick coal seam / K. Filimonov, D. Zorkov, S. Tsibaev, A. Kucherenko // *Vth International Innovative Mining Symposium*. – 2020. – V. 174. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017401037> (дата обращения 15.10.2021).
8. Qiu D., He Y., Yu Z. Investigation on compression mechanical properties of rigid polyurethane foam treated under random vibration condition: an experimental and numerical simulation study // *Materials*. – 2019. – V. 12 (20). DOI: 10.3390/ma12203385
9. Practical investigations into resin anchored roof bolting parameters / J. Purcell, D. Vandermaat, M. Callan, P. Craig // *Proc. of the 16th Coal Operators' Conference, Mining Engineering*. – 2016. – P. 53–63.
10. Bierman R., Gardner L., Piper P. An evaluation of the bond strength of multiple resin bolt and capsule combinations through laboratory testing and applied methodologies // *Deep Mining 2019: Proc. of the Ninth International Conference on Deep and High Stress Mining*. – 2019. – P. 175–190. URL: https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1952_14_Bierman (дата обращения 15.10.2021).
11. Gardner L., Fox M., Conley N. Selecting support for new mine development – a case study from Impala Platinum Ltd // *Proc. of the Seventh International Symposium on Ground Support in Mining and Underground Construction*. – Australia: Australian Centre for Geomechanics, 2013. – P. 411–420.
12. Practical approaches to sand management / A. Acock, T. Oroureke, D. Shirmboh, J. Alexander, G. Andersen, T. Kaneko, A. Venkitaraman, J. Lopez de Cardenas, M. Nishi, M. Numasawa, K. Yoshioka, A. Roy, A. Wilson, A. Twynam // *Oilfield Review*. – 2004. – V. 16. – P. 10–27. URL: https://www.researchgate.net/publication/288809656_Practical_approaches_to_sand_management (дата обращения 15.10.2021).
13. Yuxuan J. Quantitative study on the effect of shotcrete and anchor support considering the combined effect of surrounding rock and support. – Changsha: Hunan University, 2019. – 30 p.
14. Gale W.J., Fabjanczyk M.W., Guy R.J. Optimization of reinforcement design of coal mine roadways // *Proc. of the 11th International Conference on Ground Control in Mining*. – Wollongong, New South Wales, Australia: University of Wollongong, 1992. – P. 272–279.
15. Esterhuizen G.S., Tulu I.B. Analysis of alternatives for using cable bolts as primary support at two low-seam coal mines // *International Journal of Mining Science and Technology*. – 2015. – V. 16. URL: https://www.researchgate.net/publication/287374864_Analysis_of_alternatives_for_using_cable_bolts_as_primary_support_at_two_low-seam_coal_mines (дата обращения 15.10.2021).
16. Xuefu Y. Axial deformation theory and basic laws of surrounding rock deformation and failure // *Uranium Mining and Metallurgy*. – 1982. – V. 1 (1). – P. 7–14.
17. Numerical study on roadway stability under weak geological condition of PT Gerbang Daya Mandiri underground coal mine in Indonesia / P. Phanthoudeth, T. Sasaoka, H. Shimada, B. Ulaankhuu, J. Oya, S. Dwiki, T. Karian // *GSTF Journal of Geological Sciences (JGS)*. – 2016. – V. 3. – № 1. – P. 15–23. DOI: 10.5176/2335-6774.3.1.26.
18. Zhu W., Xu J., Xu G. Mechanism and control of roof fall and support failure incidents occurring near longwall recovery roadways // *The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. – 2017. – V. 117. – № 11. – P. 1063–1072. DOI: 10.17159/2411-9717/2017/v117n11a11.
19. Karampinos E., Hadjigeorgiou J., Pierce M. Explicit representation of rock reinforcement in 3D DEM models for foliated ground // *The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. – 2018. – V. 118. – № 12. – P. 1243–1250. DOI: 10.17159/2411-9717/2018/v118n12a2.
20. Временное руководство по упрочнению неустойчивого горного массива нагнетанием фенолформальдегидного состава на шахтах Кузбасса. – Прокопьевск: Куз-НИУИ, 1991. – 36 с.

Поступила 17.12.2021 г.

Информация об авторах

Цибаев С.С., кандидат технических наук, доцент кафедры разработки месторождений полезных ископаемых Кузбасского государственного технического университета имени Т.Ф. Горбачева.

Зорков Д.В., кандидат технических наук, доцент кафедры разработки месторождений полезных ископаемых Кузбасского государственного технического университета имени Т.Ф. Горбачева.

Ренев А.А., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой разработки месторождений полезных ископаемых Кузбасского государственного технического университета имени Т.Ф. Горбачева.

Ванг Цин, профессор, государственная лаборатория предотвращения и контроля катастроф в горном деле Шаньдунского научно-технического университета.

UDC: 622.267.7

FEATURES OF APPLICATION OF POLYMER AND ORGANIC FASTENING COMPOUNDS IN UNDERGROUND MINING WORKINGS REPAIR OPERATIONS

Sergey S. Tsibaev¹,
cibaevss@kuzstu.ru

Danil V. Zorkov¹,
zorkovdv@kuzstu.ru

Alexey A. Renev¹,
Traa@kuzstu.ru

Qing-duo Wan²,
qwang@sdust.edu.cn

¹ T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University,
28, Vesennaya street, Kemerovo, 650000, Russia.

² State Key Laboratory of Mining Disaster Prevention and Control Co-founded
by Shandong Province and the Ministry of Science and Technology, Shandong University of Science and Technology,
579, Qianwangang Road, Huangdao District, Qingdao, Shandong Province, 266590, China.

The relevance. Nowadays the special fastening compounds and technologies are widely used to increase the roof and walls rock stability, fill visible open cracks and voids. It can prevent rock or coal collapses and dumps during the repair operations into underground mine workings. The rock chemical fastening technology has been successfully used in Russian and foreign coal mines for over 30 years. The main idea of this technology is bonding unstable massif areas with special compounds. The application area of fastening compounds is very wide. It is well known that the presence of roof and walls rock falls leads to formation of domes, a significant increase in the height of mine workings and to formation of deep coal squeezing in the walls. The presence of domes collapses and deep squeezes are the places of methane accumulations in high workings. It has a current interest in mining when fastening compositions form the new technics for mine workings repair operations.

The main aim is rock massif fastening parameters and design solutions development using modern fastening compounds during the repair and recovery of mine workings.

Methods: field measurements, statistical processing of results.

Results. The paper considers a fastening compounds complex review during the mine workings repair operations. A comprehensive analysis of different fastening compounds in terms of the main bonding component was carried out. It took into account fastening compounds technical characteristics, their application areas and equipment requirements. Eight main groups of compounds were allocated. A technological scheme at workings crossway areas for roof and walls rock fastening using polyurethane compounds injection was proposed.

Key words:

Mine workings stability, mine workings repair, anchorage, fastening compounds, chemical fastening.

The research was financially supported by the State task of the Ministry of Science and Higher education of the Russian Federation (no. 075-03-2021 138/3).

REFERENCES

1. Tsibaev S.S., Renev A.A., Qing-duo Wan, Feng-hai Yu. Typical forms surrounding rock massif deformations analysis for mine workings support recovery. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 11, pp. 223–232. In Rus.
2. Tsibaev S., Renev A., Zainulin R., Kucherenko A. Analysis of rock mass and anchor support elements deformations during the long-term maintenance of mine workings. *Vth International Innovative Mining Symposium*, 2020, vol. 174. Available at: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017401001> (accessed 15 October 2021).
3. Renev A., Tsibaev S., Kalinin S. The evaluation of negative anthropogenic factors subjection on bolts stability and surrounding massif deformations. *9th China–Russia Symposium. Coal in the 21st Century: Mining, Intelligent Equipment and Environment Protection*. 2018. pp. 359–364. Available at: <https://doi.org/10.2991/coal-18.2018.67> (accessed 15 October 2021).
4. Snuparek R., Soucek K. Polyurethane geocomposites. mechanical properties and deformation. *International Mine Water Association Proceedings*. Sevilla, Spain, 1999. pp. 657–661.
5. Shreedharan S., Kulatilake P.H.S.W. Discontinuum – equivalent continuum analysis of the stability of tunnels in a deep coal mine using the distinct element method. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, no. 49 (5), pp. 1903–1922. Available at: https://www.researchgate.net/publication/284103706_Discontinuum-Equivalent_Continuum_Analysis_of_the_Stability_of_Tunnels_in_a_Deep_Coal_Mine_Using_the_Distinct_Element_Method (accessed 15 October 2021).
6. Sabri M.M., Shashkin K.G. Improvement of the soil deformation modulus using an expandable polyurethane resin. *Magazine of Civil Engineering*, 2018, vol. 83 (7), pp. 222–234. DOI: 10.18720/MCE.83.20
7. Filimonov K., Zorkov D., Tsibaev S., Kucherenko A. Rock pressure manifestation in development workings advanced in a thick coal seam. *Vth International Innovative Mining Symposium*. 2020. Vol. 174. Available at: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017401037> (accessed 15 October 2021).
8. Qiu D., He Y., Yu Z. Investigation on compression mechanical properties of rigid polyurethane foam treated under random vibration condition: an experimental and numerical simulation study. *Materials*, 2019, vol. 12 (20). DOI: 10.3390/ma12203385

9. Purcell J., Vandermaat D., Callan M., Craig P. Practical investigations into resin anchored roof bolting parameters. *Proc. of the 16th Coal Operators' Conference, Mining Engineering*, 2016, pp. 53–63.
10. Bierman R., Gardner L., Piper P. An evaluation of the bond strength of multiple resin bolt and capsule combinations through laboratory testing and applied methodologies. *Deep Mining 2019: Proc. of the Ninth International Conference on Deep and High Stress Mining*. 2019. pp. 175–190. Available at: https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1952_14_Bierman (accessed 15 October 2021).
11. Gardner L., Fox M., Conley N. Selecting support for new mine development – a case study from Impala Platinum Ltd. *Proc. of the Seventh International Symposium on Ground Support in Mining and Underground Construction*. Australia, Australian Centre for Geomechanics, 2013. pp. 411–420.
12. Acock A., Orourke T., Shirmboh D., Alexander J., Andersen G., Kaneko T., Venkitaraman A., Lopez de Cardenas J., Nishi M., Numasawa M., Yoshioka K., Roy A., Wilson A., Twynam A. Practical approaches to sand management. *Oilfield Review*, 2004, vol. 16, pp. 10–27. Available at: https://www.researchgate.net/publication/288809656_Practical_approaches_to_sand_management (accessed 15 October 2021).
13. Yuxuan J. *Quantitative study on the effect of shotcrete and anchor support considering the combined effect of surrounding rock and support*. Changsha, Hunan University, 2019. pp. 11–30.
14. Gale W.J., Fabjanczyk M.W., Guy R.J. Optimization of reinforcement design of coal mine roadways. *Proc. of the 11th International Conference on Ground Control in Mining*. Wollongong, New South Wales, Australia, University of Wollongong, 1992. pp. 272–279.
15. Esterhuizen G.S., Tulu I.B. Analysis of alternatives for using cable bolts as primary support at two low-seam coal mines. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2015, vol. 16. Available at: https://www.researchgate.net/publication/287374864_Analysis_of_alternatives_for_using_cable_bolts_as_primary_support_at_two_low-seam_coal_mines (accessed 15 October 2021).
16. Xuefu Y. Axial deformation theory and basic laws of surrounding rock deformation and failure. *Uranium Mining and Metallurgy*, 1982, vol. 1 (1), pp. 7–14.
17. Phanthoudeth P., Sasaoka T., Shimada H., Ulaankhuu B., Oya J., Dwiki S., Karian T. Numerical study on roadway stability under weak geological condition of PT Gerbang Daya Mandiri underground coal mine in Indonesia. *GSTF Journal of Geological Sciences (JGS)*, 2016, vol. 3, no. 1, pp. 15–23. DOI: 10.5176/2335-6774.3.1.26.
18. Zhu W., Xu J., Xu G. Mechanism and control of roof fall and support failure incidents occurring near longwall recovery roadways. *The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 2017, vol. 117, no. 11, pp. 1063–1072. DOI: 10.17159/2411-9717/2017/v117n11a11.
19. Karampinos E., Hadjigeorgiou J., Pierce M. Explicit representation of rock reinforcement in 3D DEM models for foliated ground. *The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 2018, vol. 118, no. 12, pp. 1243–1250. DOI: 10.17159/2411-9717/2018/v118n12a2.
20. *Vremennoe rukovodstvo po uprochneniyu neustoychivogo gornogo massiva nagnetaniem fenolformaldegidnogo sostava na shahhtakh Kuzbassa* [Temporary guide for unstable rock mass fastening using injection of phenol-formaldehyde composition in conditions of Kuzbass coal mines]. Prokopenk, KuzNUI Publ., 1991. 36 p.

Received: 17 December 2021.

Information about the authors

Sergey S. Tsibaev, Cand. Sc., associate professor, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University.

Danil V. Zorkov, Cand. Sc., associate professor, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University.

Alexey A. Renev, Dr. Sc., professor, head of the department, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University.

Qing-duo Wan, State Key Laboratory of Mining Disaster Prevention and Control Co-founded by Shandong Province and the Ministry of Science and Technology, Shandong University of Science and Technology.

УДК 574(1-925.121)

ТЕХНОГЕННОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ В РОССИЙСКОЙ АРКТИКЕ НА ПРИМЕРЕ НОРИЛЬСКОГО ПРОМЫШЛЕННОГО РАЙОНА

Юркевич Николай Викторович¹,
YurkevichNV2@ipgg.sbras.ru

Ельцов Игорь Николаевич¹,
YeltsovIN@ipgg.sbras.ru

Гуреев Вадим Николаевич^{1,2},
GureyevVN@ipgg.sbras.ru

Мазов Николай Алексеевич¹,
MazovNA@ipgg.sbras.ru

Юркевич Наталия Викторовна¹,
YurkevichNV@ipgg.sbras.ru

Еделев Алексей Викторович¹,
EdelevAV@ipgg.sbras.ru

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Акад. Коптюга, 3.

² Новосибирский государственный технический университет,
Россия, 630087, ул. Немировича-Данченко, 136.

Актуальность работы определяется растущей необходимостью в решении экологических вопросов в арктических регионах Российской Федерации с учетом их особой стратегической значимости для развития страны. Сложность задачи обусловлена, с одной стороны, наличием накопленного экологического ущерба, требующего ликвидации, а с другой – важностью разработки природосберегающих подходов к освоению новых ресурсов в ближайшем будущем.

Цель работы заключается в комплексном анализе состояния экосистемы и ее отдельных компонентов в Норильском промышленном районе как одной из значимых ресурсных территорий российской Арктики. Отдельное внимание уделено методам мониторинга окружающей среды и регулирующим сферу экологии документам, которые требуют устранения ряда острых противоречий и законодательных пробелов.

Методы исследования включают анализ литературных данных, опубликованных в отечественной и зарубежной печати за последнее десятилетие, по экологическим проблемам российских территорий Арктики в целом и Норильского промышленного района в частности. Для полноты результатов в работе использовался широкий набор библиографических систем, включая Российский индекс научного цитирования, базу данных Scopus, базу данных «Охрана окружающей среды» реферативного журнала ВИНТИ РАН.

Результаты. Выявлены характерные особенности арктических территорий, требующих как нестандартных технологических решений при ведении промышленной деятельности, так и специальных подходов в регулировании и контроле состояния экологии. На примере Норильского промышленного района показаны положительные изменения в экологических аспектах ведения производственной деятельности горно-металлургическим комбинатом, даже несмотря на инцидент с разливом топлива в 2020 г. В то же время предпринимаемых мер пока недостаточно для того, чтобы назвать экологическую обстановку в районе благополучной. Ожидают своего решения проблемы нейтрализации накопленного экологического ущерба. Эффективность запланированных мероприятий по улучшению состояния окружающей среды во многом зависит от изменения законодательных актов, пока слабо учитывающих специфику арктических территорий, а также усматривается в большей коллаборации промышленных предприятий как с научным сообществом, так и с проживающим в зоне их активности местным населением.

Ключевые слова:

Норильский промышленный район, Арктика, экология, накопленный экологический ущерб, мониторинг.

Введение

Арктика вместе с субарктическими территориями, частично включающими таежные зоны, играет существенную роль в экологическом равновесии Северного полушария: является регулятором кислорода и метана и районом, где проходят глобальные атмосферные процессы [1]. Особое значение имеет лес бореальной зоны, выполняющий важную средообразующую функцию в биосфере и во многом формирую-

щий углеродный цикл и климатическую систему Земли [2]. Одновременно с этим природные ресурсы арктических территорий – важный компонент национальных интересов России, а арктические ресурсы корпорации, соответственно, являются приоритетными в национальной экономике Российской Федерации, определяя ее основные тенденции [3]. Значимые для экономики ресурсы Арктики составляют 70 % от общероссийских: на конец XX в. северные предприятия обеспечивали до 12 % ВВП России, а в начале XXI в.

горно-промышленный комплекс российской Арктики на 60–96 % обеспечивал производство целого ряда цветных и благородных металлов, добычу 80 % газа и 60 % нефти [4, 5].

Поскольку добыча и обработка полезных ископаемых неизбежно сопряжена с нанесением ущерба окружающей среде, возникает необходимость оперативного поиска баланса между соблюдением национальных интересов России и экологическим благополучием арктических территорий. Дополнительной проблемой в построении такого баланса является накопленный экологический ущерб, в основном связанный с последствиями промышленного освоения территорий Севера в советский период. Несмотря на ликвидацию многих источников загрязнения в постсоветское время, арктическое побережье до сих пор остается экологически неблагоприятным районом, не менее 15 % площади которого на начало 2010-х гг. имело критический уровень загрязнения [1, 5].

Наиболее острые экологические проблемы текущего дня включают рекультивацию нарушенных земель, ликвидацию ущерба, накопленного за предыдущие периоды, нейтрализацию последствий от потепления климата, поскольку возрастает опасность поступления в экосистемы токсичных веществ химических и радиоактивных отходов [1, 5]. Сохранение и защита природных экосистем, включая ликвидацию последствий от накопленного экологического ущерба, являются в настоящее время приоритетными задачами.

Исследование представляет собой обзор публикаций по теме экологического состояния территорий российской Арктики, и в особенности Норильского промышленного района (НПР) с крупнейшим в регионе предприятием, за последние 12 лет: 2010–2021 гг. Для отбора публикаций использовались как российские, так и международные библиографические указатели, включая Scopus (раздел Earth and Planetary Sciences), реферативный журнал ВИНТИ РАН (раздел «Охрана окружающей среды») и Российский индекс научного цитирования. В качестве запроса использовались следующие термины на русском и английском языках в различных комбинациях: Арктика, субарктика, Крайний Север, экология, ущерб, Норильск.

Особенности экологического состояния арктических территорий Российской Федерации

Способность экосистем к самовосстановлению основывается на их адаптационных, буферных и регенерационных качествах. Адаптационные показатели связаны с растительным покровом, буферные – с геолого-морфологическими характеристиками местности, а регенерационные – с климатическими и гидрологическими факторами среды. Особенностью арктических экосистем является снижение всех перечисленных показателей самовосстановления в сравнении с другими климатическими зонами России [6], они чрезвычайно чувствительны как к естественным, так и к антропогенным воздействиям и обладают крайне низкой устойчивостью [7, 8].

Свойственные арктическим территориям отрицательные температуры воздуха и земной поверхности, а также длительное стояние снежного покрова приводят к ограниченной подвижности почвенных растворов и циркуляции поверхностных вод, снижают скорость физико-химических реакций в экосистеме и, соответственно, потенциал их самоочищения, связанный с малой скоростью ассимиляции поллютантов и низкой активностью микроорганизмов, разлагающих токсичные вещества. Иными словами, поскольку в микробиоценозах почв лесотундровой зоны высоко содержание органических веществ, но низкая доля элементов минерального питания и большая доля трудноразлагаемых фракций, у микроорганизмов в воде и почве наблюдается слабая способность к трансформации токсичных соединений [9–11].

Растительный покров арктических территорий редкий и отличается низкой скоростью регенерации, большей продолжительностью жизни и медленным циклом смены поколений. Лесным экосистемам присущи замедленные процессы энерго- и массообмена и низкая биологическая продуктивность [10]. Невысокий уровень энерго- и массообмена свойствен обитающим на арктических территориях организмам, что в итоге способствует их высокой чувствительности к неблагоприятным воздействиям и быстрому продвижению экотоксикантов в коротких пищевых цепях в случае их возникновения [12]. Влияние тяжелых металлов на биохимические процессы в растительном покрове в совокупности с отрицательной среднегодовой температурой ведет к замедлению его биоразложения [10].

Таким образом, даже незначительные антропогенные и, реже, естественные воздействия наносят существенный урон арктическим экосистемам, на восстановление которых уходит несколько десятилетий [13]. Особенно губительными оказываются длительные непрерывные воздействия на экосистему, так как они нарушают динамику круговорота элементов и в итоге приводят к новому состоянию или деградации экосистемы. Соответственно, функционирование, продуктивность и устойчивость экосистем и условия их длительного существования зависят от стабильности биогеохимических циклов органических веществ и минеральных элементов, которые контролируются биологическими и геохимическими факторами в их совокупности [10].

Основные источники и причины экологического неблагополучия арктических территорий Российской Федерации

Освоение природных ресурсов на арктических территориях России разнообразно и зависит от десятков факторов, среди которых присутствуют как естественные, так и антропогенные. Необходимо учитывать тип полезных ископаемых, технологию их разработки, зависимость от транспортной системы. С учетом высокой значимости ресурсов северных территорий для экономики и развития страны неизбежно встает вопрос о потенциальной военной защите этих территорий, предполагающей усиление военного

присутствия [5]. Таким образом, нанесение ущерба окружающей среде носит комплексный и разнообразный характер, где каждый конкретный случай требует особого детального рассмотрения.

Главными источниками загрязнения являются:

- предприятия горнодобывающей промышленности;
- хвостохранилища ликвидированных предприятий, отвалы пород и шламонакопители, которые резко изменяют структуру крио- и гидросферы [4, 14];
- заброшенные объекты хозяйственной деятельности – метеостанции, аэродромные площадки, пункты противоздушной обороны, бочки (число которых оценивается в 12 млн единиц [5]);
- промышленные отходы от бурения и эксплуатации скважин: бентонитовая глина, щелочи, цементный раствор, дизельное топливо [1, 15, 16];
- токсиканты, перенесенные воздушными потоками и речным течением в Арктику из средних широт, причем суровый климат превращает приполярные территории в «холодные ловушки» для различных стойких токсических веществ [11].

Часто отходы хозяйственной деятельности в виде твердых бытовых отходов (стройматериалы, бочки, техника, остатки сооружений, аккумуляторы) не вывозятся и бессистемно скапливаются на необорудованных площадках. На начало 2010-х гг. насчитывалось до 4 млн т промышленного мусора [5].

Антропогенные источники

Добывающие и обрабатывающие предприятия.

Первостепенное значение в особенностях функционирования компаний имеет их тип – ресурсный или обрабатывающий, который определяет специфику производственной деятельности, приоритеты, отношения с НИОКР [3]. Соответственно, различным в зависимости от типа предприятия будет наносимый природе экологический ущерб. Преобладает мнение, что ущерб от добычи полезных ископаемых, то есть недропользования, менее масштабный в сравнении с ущербом от металлургических и перерабатывающих предприятий, к каковым относится горно-металлургический комбинат в НПП [4]. Однако до сих пор представляет проблему выяснение того, какая часть загрязнения вызвана недропользованием, а какая – металлургией. Вредные выбросы предприятий воздействуют практически на все элементы экосистемы Арктики: атмосферу, воду, почву, растительный покров и организмы.

Аварийные ситуации. Поскольку ущерб окружающей среде наносится даже при отлаженной добыче и переработке полезных ископаемых, то гораздо большие катастрофические последствия для арктических территорий несут аварийные ситуации. Особые риски для арктической биоты приносит загрязнение нефтью, в которой содержатся мутагены, канцерогены, ингибиторы биосинтеза и прочие токсические компоненты; при этом опасность разлива присутствует на всех этапах – добычи, хранения или транспортировки. Источниками же аварий становятся фонтанирование скважин во время разведки или добычи, утечки из трубопроводов либо резервуаров хранения

нефтепродуктов, а также аварии при перевозке на автомобилях, по железной дороге или водными видами транспорта [17].

Разливы нефти при низких температурах сохраняются значительно дольше из-за медленной скорости испарения, а попадание нефти в лед или под него делает ее труднодоступной для бактериального разложения. Многолетнемерзлые породы и водные объекты российской Арктики характеризуются невысокой биологической активностью, связанной с низким видовым разнообразием микроорганизмов и их замедленной метаболической активностью [18–20]. Поэтому, по прогнозам, разложение нефти в почве Арктики может занимать несколько десятилетий [17]. И хотя в экспериментах по ликвидации разливов нефти на арктических территориях эффективность доходит до 90 %, в реальных условиях среднее значение сбора разлитых нефтепродуктов составляет не более 10–15 % [17].

Военные объекты. Мероприятия по обороне северных границ Российской Федерации, где в советское время было создано три рубежа обороны, наносят российской Арктике экологический ущерб, сопоставимый по масштабам с ущербом от горно-промышленного комплекса [4]. С одной стороны, военная составляющая значительно снизилась с распадом СССР, с другой – при снижении военного контингента заброшенными остались здания, заводы по обслуживанию атомного флота, базы, аэродромы, техника, запчасти, неиспользованное топливо, строительные материалы. Все это внесло основной вклад в накопленный экологический ущерб [4, 5]. Отдельно необходимо упомянуть отработанные ступени ракет с остатками топлива, запускаемые с космодрома Плесецк: на начало 2010-х гг. их общий объем составлял 3000 т [5]. Вклад в загрязнение на военных объектах также вносят сильнодействующие ядовитые вещества.

В последнее десятилетие техногенная нагрузка от военных объектов вновь возрастает в рамках развертывания Объединенного стратегического командования «Север», что связано с особым статусом северных рубежей и их природных ресурсов в экономике России, а также необходимостью контроля Северного морского пути [6].

Транспорт и логистика. Поскольку северные территории мало заселены – менее 1 % жителей России [4], а населенные пункты и стратегически важные месторождения рассредоточены, транспортная сеть развита слабо, и в каждом случае требуется разработка уникальных логистических схем как снабжения промышленных и военных объектов, так и последующей транспортировки добытых ресурсов. Как правило, либо реализуются дорогостоящие программы собственного флота, либо создаются хозяйственно-транспортные альянсы [3]. Затраты на логистические цепочки нередко оказываются сопоставимыми с расходами на саму добычу полезных ископаемых. В случае «Норильея», например, к 2010-м гг. соотношение расходов на добычу и транспортировку составляло 49 и 51 % соответственно [3]. Наибольший ущерб от транспортных систем в НПП принесло строитель-

ство железной дороги и шоссе между Норильском и Талнахом [4].

Существенный урон растительному покрову российской Арктики наносит гусеничный транспорт, используемый при разведке полезных ископаемых, строительстве трубопроводов и линий электропередач: часто несколько тракторов объединяются в одну группу, которая при передвижении образует глубокие борозды, впоследствии превращающиеся в овраги [15]. Разрушения грунта и растительного покрова – до 50 % площади – наблюдаются на большинстве участков вдоль газопроводов [15]. При этом даже незначительные нарушения почвенно-растительного покрова вызывают более глубокое оттаивание вечной мерзлоты, оседание грунта и активную эрозию [15].

Кроме инфраструктуры наземного транспорта во второй половине XX в. в Арктике были созданы атомный флот, аэродромы, пункты противовоздушной обороны и радиолокационные станции. Они обслуживают Северный морской путь, связанный как с оборонными мероприятиями, так и с логистическими схемами функционирования горнодобывающих и обрабатывающих предприятий, и тем самым вносят дополнительный вклад в накопленный экологический ущерб. В частности, нерешенной проблемой остаются затопленные в акватории Северного Ледовитого океана суда и ядерные секции кораблей [21, 22].

Источники радиоактивного загрязнения. Исторически особый вклад в ухудшение общей экологической обстановки внесли подземные ядерные испытания 1974–1978 гг. с аварийными выбросами радионуклидов на поверхность [1]. Кроме того, в российской Арктике функционируют две атомные электростанции – на Кольском (Кольская, 67°27'55" с.ш. 32°28'59" в.д.) и Чукотском (Билибинская, 68°03'01" с.ш. 166°32'20" в.д.) полуостровах, накопившие большое количество жидких и твердых радиоактивных отходов, а также отработавшее ядерное топливо [5].

Естественные источники

Климатические изменения. Среди естественных причин, оказывающих заметное влияние на окружающую среду в Арктике, в последние десятилетия доминирует изменение климата. Начиная со второй половины 1970-х гг. оно проявляется в арктической и субарктической зонах России наиболее ярко в сравнении с остальной территорией страны. Средняя температура воздуха в России увеличивается на 0,43 °С в десятилетие, что 2,5 раза выше среднемирового темпа [23]. В Якутии же с 1966 по 2015 гг. на различных территориях наблюдалось потепление на 1,7–3,1 °С [1]. Причины потепления включают колебания климатической системы, уровень солнечной радиации, изменения геологической активности Земли, антропогенный фактор.

С одной стороны, потепление может приводить к повышению продуктивности субарктических и арктических экосистем из-за удлинения вегетационного периода и роста среднегодовой температуры многолетнемерзлых пород. Особенно это проявляется в районах термокарстовых озер, поймах рек и тундро-

вых ложбинах [24, 25]. С другой стороны, опасность потепления для арктических экосистем проявляется в учащении наводнений и увеличении их масштабов, поскольку с повышением температуры в атмосфере растет количество водяного пара, влияющего на интенсивность осадков. Наводнения, кроме нанесения прямого ущерба инфраструктуре, влияют на расконсервацию складированных в многолетнемерзлом грунте отходов, которые затем попадают в водные объекты [1, 26].

В этих условиях любая авария, подобная произошедшей 29 мая 2020 г. в связи с разливом 21 тыс. м³ нефтепродуктов на топливохранилище ТЭЦ-3 Норильско-Таймырской энергетической компании, в сочетании с таянием вечной мерзлоты, усиливает экологические угрозы.

Арктические условия, при которых холодное воздействие в совокупности с поллютантами приводит к усилению стресса растительности и остановке ее роста [8]. Прочие характерные для Арктики условия, такие как движение льдов, непредсказуемые погодные условия и полярная ночь, во многом повышают риски аварийных ситуаций и затрудняют ликвидацию их последствий [17, 26].

Изученность, состав и экологическое состояние компонентов окружающей среды Норильского промышленного района

В Норильском промышленном районе (рисунок) расположен крупнейший металлургический комплекс в Арктике, который одновременно является и самым крупным индустриальным комплексом на Земле, формирующим замкнутую корпоративную территорию с собственной системой тепло- и энергообеспечения, транспортного обеспечения, включая морской, речной флот, железнодорожный транспорт и авиапарк, а также кадровое обеспечение [3, 4, 27]. Владующая горно-металлургическим комбинатом компания «Норникель» относится, скорее, к обрабатывающим, а не к добывающим корпорациям, и ориентирована прежде всего на поиск рынков сбыта, а не ресурсов, которыми она надежно обеспечена.

«Норникель» работает стационарно уже более 85 лет, что с учетом истощения ресурсов является беспрецедентным сроком на мировом уровне [3]. В НПП сосредоточены предприятия с наибольшим в мире производством палладия и никеля, а также одним из наиболее крупных производств платины и меди. По состоянию на середину 2010-х гг. НПП обеспечивал 39 % мирового производства палладия, от 14 до 20 % никеля, 12 % родия, 11 % платины, 6 % кобальта и 2 % меди [28, 29]. К производимым «Норникелем» продуктам тяжелой металлургии также относятся техническая сера, технический селен, катодная медь, концентраты драгоценных металлов, никелевый фэйнштейн, первичный никель, никелевая карбонильная дробь, никелевый карбонильный порошок, никелевый концентрат, кобальтовый концентрат, электролитный кобальт, техническая серная кислота, сульфат натрия, хлорид натрия, никелевый штейн и медный штейн [7].

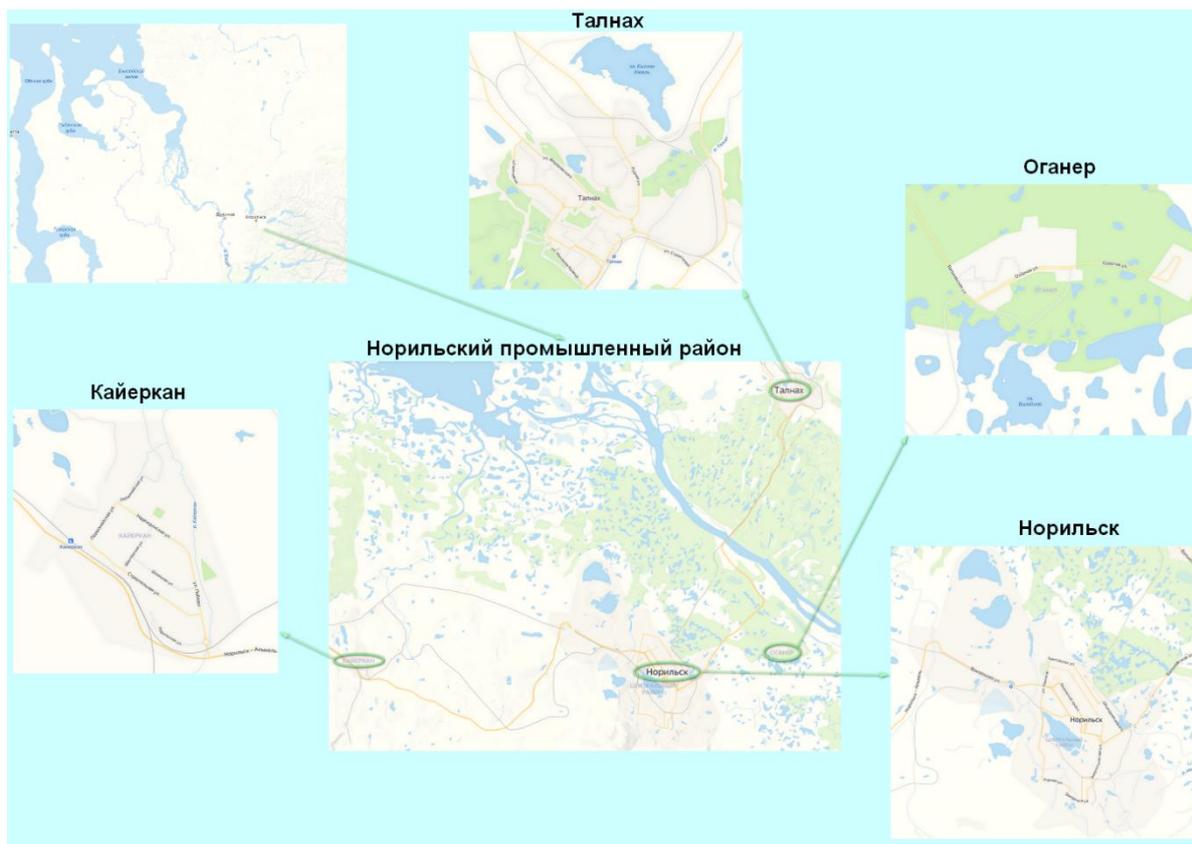


Рисунок. Схема Норильского промышленного района
Figure. Scheme of the Norilsk Industrial Area

Столь широкий ряд продукции обуславливает и разнообразие вредных выбросов с предприятий НПП, а общая масса отходов составляет более 1 млрд т и занимает свыше 6 тыс. га [5]. На предприятия НПП приходится 78 % вредных выбросов Красноярского края и 10 % – Российской Федерации [9, 23]. Наиболее вредоносными поллютантами являются сера и ряд тяжелых металлов: медь, никель, кобальт и свинец. Из-за различий в путях распространения поллютантов четкие пространственные корреляции между концентрациями серы и тяжелых металлов, с одной стороны, и степенью повреждений компонентов экосистем (например, растительности, почвы или воды) – с другой – отсутствуют [30], поскольку пылевые частицы выпадают сразу, газообразные же вещества (сера) вначале поднимаются вверх и осаждаются за 30-километровым радиусом от источника эмиссии, где уже отсутствуют критические значения по тяжелым металлам [9].

Диоксид серы вносит наибольший вклад в уровень загрязнения окружающей среды НПП: в последние годы на его долю приходится 96–98 % всех выбросов [2, 31]. Сера выпадает на расположенные рядом с источниками территории в количестве 570–17000 кг на км² (ср. с фоновым значением 50 кг). Выбросы меди в зоне преимущественного загрязнения за год достигают от 18 до 2700 кг (средние значения в зонах с низкой пылевой нагрузкой – от 0,05 до 56 кг). Расчеты для свинца на загрязненных территориях: от 1 до 25 кг (средние значения на незагрязненных территориях – от 0,02 до 1,5 кг на км²). Суммарные пылевые

нагрузки в середине 2000-х гг. составляли от 43 до 47 тыс. т [32].

Негативное воздействие предприятий НПП на окружающую среду в основном затрагивает близлежащие территории и носит локальный характер – по линиям ветров. Экологическое состояние НПП на текущий момент оценивается как кризисное, но не катастрофическое, что предполагает возможность восстановления природной среды [4]. Тем не менее часть нарушенных экосистем находится на необратимых стадиях вырождения [33]. В меньшей степени влияние НПП касается экологии Сибири в целом. Вопрос же о том, оказывает ли горно-металлургический комбинат серьезное воздействие на экологическое состояние обширной территории Арктики, остается спорным, поскольку исследований мало, а их данные разнородны [34]. В отдельных работах указывается на регистрацию выбросов предприятий НПП (преимущественно в виде пыли и аэрозолей) в акваториях российских арктических морей, в Центральной Арктике и в более отдаленных районах американского материка, включая Канаду, куда поллютанты могли проникнуть через Северный Полюс [4, 35]. В то же время подробный анализ информации о состоянии снега, почвы, водоемов и растительного покрова в НПП и близлежащих районах показал незначительное прямое влияние на объекты окружающей среды Арктики [34]. Отсутствие надежных свидетельств о переносе вредных веществ на значительные расстояния подтверждается и в других исследованиях [36, 37].

Влияние локальных выбросов предприятий НПП, прежде всего воздушных, или аэротехногенных, приходится на широкий ряд природных компонентов, прежде всего атмосферу, через которую впоследствии прямо или косвенно заражаются воды рек и водоемов, почва, что приводит к деградации растительности и соответственно развитию заболеваний животных и человека на территории до 200 км от промышленной зоны, особенно в случае с тяжелыми металлами, которые, попадая в окружающую среду, включаются в биогеохимические процессы и накапливаются в живых организмах [9, 12]. Например, в озере Пясино у 100 % рыб обнаружены аномалии внутренних органов [38].

Загрязнения атмосферы в виде пыли осаждаются на подстилающую поверхность на расстоянии до 7 км от источников выбросов; поллютанты в виде аэрозолей и газов (например, водорастворимые формы серы) распространяются на территорию до 400 км [32]. Вода кроме загрязнения через атмосферу подвергается загрязнению нагретыми сбросами сточных вод с токсичными компонентами и аварийными сбросами из пульпопроводов.

Одним из последних случаев нанесения существенного урона экосистеме вокруг НПП в результате аварии стал разлив 21 тыс. м³ (17 тыс. т) нефтепродуктов на ТЭЦ-3 29 мая 2020 г. Авария произошла в результате просадки бетонного фундамента под резервуаром топливного бака № 5. При этом гипотезу о влиянии на просадку процессов таяния вечной мерзлоты ряд исследователей отвергает [39, 40]. Шесть тысяч тонн нефтепродуктов впиталось в грунт, а остальные через реки Амбарная и Далдыкан попали в озеро Пясино, загрязнив в общей сложности 180 тыс. м² [13, 40]. Следует отметить, что значительная часть дизельного топлива из реки Амбарной попала в протоки и мелкие озера, чему способствовало отсутствие паводков и снега, а поверхностные загрязнения в основном удалось собрать в первые две недели и, таким образом, не допустить масштабного загрязнения озера Пясино [41].

Ниже представлено текущее состояние основных компонентов экологической системы НПП.

Атмосфера

Наиболее интенсивному загрязнению, связанному с выбросами от добычи и переработки в НПП сульфидных руд цветных металлов, подвергается атмосфера, а основным источником загрязнения являются дымовые и газовые выбросы от плавильных заводов [34]. Отдельный вклад в загрязнение атмосферы НПП, оцениваемый на уровне 10 %, вносит автотранспорт, особенно в зимний период, что также способствует аккумулярованию вредных примесей в приземной атмосфере [23].

К поллютантам атмосферы НПП относится широкий спектр загрязняющих веществ: угарный газ, диоксид серы, оксиды азота, летучие органические соединения; парниковые газы – углекислый газ, метан и оксид азота; а также аэрозоли, к которым относится черный углерод (сажа), образующиеся либо при сжи-

гании топлива, либо при производственной деятельности [23]. На газообразный сернистый ангидрид, образуемый при окислении сульфидной серы при обжиге руды, приходится до 96–98 % выбросов [2, 31]. В 2019 г. выпадение серы превышало критическое значение в 5,2 раза и составляло 10,4 т на км² в год, что было наивысшим показателем в России [23]. Дымовой шлейф от горно-металлургического комбината достигает 120 км в длину и 40 км в ширину [33], а качественное изменение концентрации серы при активном переходе газа в частицу фиксируется на расстоянии 60–100 км от источника выбросов [31].

Оксид и диоксид азота играют важную роль в фотохимических процессах в тропосфере и стратосфере и вызывают образование фотохимического смога и высоких концентраций тропосферного озона [23]. Как следствие, выбросы аэрозолей существенно снижают прозрачность атмосферы, а также воздействуют на формирование и структуру облаков, которые уменьшают поверхностное излучение и вызывают рассеивание света.

При оценке степени загрязнения атмосферы НПП важным представляется понимание особенностей ее циркуляции, обусловленной рельефом местности. Преобладает юго-восточная роза ветров, а критическая концентрация выбросов, по разным оценкам, наблюдается в южном [9], юго-восточном [29] и юго-западном [34] направлениях от источников эмиссии. Доминирующее направление ветра оказывается напрямую связано с зонами, наиболее сильно пострадавшими от загрязнения. Геоморфологические особенности рельефа НПП формируют горизонтально-неоднородное и изменчивое по высоте поле ветра, предотвращающее распространение загрязнения на север и в целом локализирующее загрязнение экосистем [34]. К настоящему моменту восстановлены поля длительных выпадений пыли и тяжелых металлов, а также намечены возможности установления связей аэрозольного загрязнения с яркостными характеристиками снегового покрова [42].

Исследования атмосферы дают ключ к пониманию путей загрязнения прочих компонентов природной среды НПП и Арктики в целом. Динамический анализ антропогенного влияния НПП, проводимый Росгидрометом в течение 27 лет, позволил оценить закономерности распространения в атмосфере тяжелых металлов, осаждающихся на подстилающую поверхность. Изменения антропогенной нагрузки через атмосферу оказались связаны с уменьшением вредных выбросов, а также с изменением процессов циркуляции воздушных масс во времени, которые могут оказывать эффект, сопоставимый с эффектом от снижения вредных выбросов [35]. В совокупности эти два процесса привели к снижению уровня загрязнения в 2000-х гг. в сравнении с 1990-ми гг. [34, 35]. В 2010-х гг. также отмечено снижение загрязнения атмосферы на 8 % [7]. Однако, несмотря на улучшившееся за последние 30 лет качество воздуха в российской Арктике, уровень загрязнения в НПП все еще остается очень высоким [23].

Снежный покров

Отличительной характеристикой снежного покрова НПП и Арктики в целом является большая продолжительность снежного периода и способность накапливать множество поллютантов из нижних слоев атмосферы. Другой важной особенностью снежного покрова является то, что при таянии он превращается в источник вторичного загрязнения остальных компонентов экосистемы: тяжелые металлы или нефтепродукты при таянии через грунтовые воды или речной сток могут попадать в море, где, увлекаемые течением, распространяются на значительные расстояния в акватории [17]. Кроме того, черный углерод, оседая на белоснежных арктических покровах, изменяет их отражательные свойства, а оксиды азота и оксид серы приводят к закислению атмосферных осадков, что в целом способствует преждевременному таянию снежного покрова и ледников [23].

Интенсивность загрязнения снежного покрова вокруг НПП во многом зависит от метеорологических условий, связанных со скоростью и направлением ветра в различные сезоны, а также хорошо коррелирует с составом атмосферы НПП [32]. Химические элементы поступают в снежный покров различными путями: с атмосферными осадками, путем поглощения из атмосферы газов и водорастворимых аэрозолей, путем взаимодействия с твердыми пылевыми частицами [32].

Картирование загрязнений снежного покрова вокруг НПП показывает, что наиболее сильно загрязняет снег дефляционная пыль с промышленных объектов, в меньшей мере – промышленные выбросы в атмосферу, за чем следует естественная дефляция. В 2010-х гг. количество пыли в снеге двукратно превышало объем пыли, выбрасываемой предприятиями «Норникеля», что говорит о неучтенном вкладе иных источников, включая автотранспорт и продукты дефляции с карьеров и хвостохранилищ. Химический состав техногенной пыли в снежном покрове характеризуется высоким содержанием в нем серы, тогда как в природной пыли больше кальция и цинка природного происхождения [32].

Промышленная пыль осаждается в основном в радиусе 40 км, 90 % приходится на семикилометровую зону вокруг источников эмиссии. На отдаленные от Норильска северные территории полуострова Таймыр (100 км и более от источника загрязнения) предприятия НПП, по-видимому, не оказывают существенного негативного воздействия, что показано по исследованию уровня рН снега [34]. Аналогичная ситуация с тенденцией к снижению загрязнения в районе Норильска выявлена по анализу концентрации серы в снегу. Концентрации тяжелых металлов, таких как медь, цинк и никель, также были высокими в НПП, но низкими в других прилегающих регионах [34].

Таким образом, исследование снежного покрова обладает высокой информативностью при выявлении общего техногенного загрязнения окружающей среды.

Вода

Загрязнение рек и водоемов представляет собой наиболее острую экологическую проблему. В НПП оно происходит при таянии снегов, воздействии

сточных вод, при аварийных ситуациях (например, разливе вредных веществ), а также через осаждение вредных примесей из атмосферы, притом что воздушный перенос металлов распространяется до 30 км [38]. Элементный состав вод чрезвычайно сложен и определяется множеством параметров, включающих химические, физические, геологические и биологические. Водные системы являются коллекторами загрязнений и отражают изменения геохимических циклов элементов под влиянием антропогенных факторов [12].

На начало XXI в. гидроэкологическое состояние практически всех водных объектов НПП выходило за пределы нормы по удельному комбинаторному индексу загрязненности воды (ведомственному нормативу Росгидромета), хотя и не было катастрофическим [43]. На территории отмечается наибольшая в арктической Сибири минерализация, проявляющаяся в повышенных концентрациях никеля и меди. Величина рН характеризует озера как щелочные, низкая цветность является индикатором присутствия соединений железа; кроме того, выявлено высокое содержание сульфатов, что подтверждает ключевой фактор антропогенного вклада в элементный состав вод [12]. Воздушный перенос микроэлементов хотя и не приводит к существенному загрязнению вод, но повышает концентрацию многих элементов. Глобальное же нарастание содержания элементов в водах суши, даже при соответствии предельно допустимым концентрациям (ПДК), приводит к их включению в биогеохимические циклы и токсическому накоплению в живых организмах [12].

Тяжелые металлы накапливаются прежде всего в верхних слоях донных осадков, могут переходить в иловую и придонную воду, создавая источник вторичного загрязнения водоема: загрязненный осадочный материал быстро достигает дна, особенно в прибрежных и мелководных частях водоемов, а затем загрязнение переходит в иловую и наддонную воду [38].

Важным объектом исследования уровня загрязнения водной системы НПП являются болота. Биогеохимические исследования, в том числе оценивающие наличие металлов в нетронутых водно-болотных угодьях НПП, как и российской части Арктики в целом, не проводились до начала 1990-х гг. В одной из первых работ оценивались концентрации кадмия, свинца, цинка и меди на нетронутых водно-болотных угодьях: для отдаленных от Норильска районов Таймыра было показано соответствие содержания тяжелых металлов в водоемах фоновым уровням и, таким образом, отсутствие влияния НПП на водоемы нетронутых территорий [36]. Результаты оценки вод по тому же набору элементов в водоемах вблизи НПП в конце XX в. показали, что их концентрация могла в 1000 раз превышать фоновые уровни, определенные для незагрязненных территорий [37].

Данными 2019 г. с оценкой органолептических и химических показателей пяти районов НПП продемонстрировали незначительное локальное воздействие промышленности на состояние водных источников [44]. Наиболее загрязненным водоемом НПП

является озеро Пясино, в которое направлены стоки рек и загрязняющих вод Норильска. В меньшей мере загрязнению подвергнуты озера Лама и Пуринские. Река Пясино, вытекающая из озера Пясино, является потенциальным поставщиком загрязняющих веществ в Карское море и воды океана. Особенно актуально это в случае аварийных ситуаций, подобных случившейся на ТЭЦ-3 в 2020 г. [45]. Стоит отметить загрязненность вод Карского моря тяжелыми металлами и нефтепродуктами и безотносительно деятельности НПП – под воздействием других предприятий или военных объектов. Основную роль в формировании состава воды и донных отложений играют выпадающие в Карское море Обь и Енисей, водосборы которых охватывают территории со значительными антропогенными выбросами тяжелых металлов [46]. При этом речные потоки в 10 раз интенсивнее атмосферных, которые, тем не менее, также играют значимую роль в переносе тяжелых металлов в тех частях Карского моря, где влияние Оби и Енисея уже незначительно [47, 48]. Определенный вклад в загрязнение прибрежных вод вносят объекты накопленного экологического ущерба от прошлой военной деятельности на островах Карского моря [16, 49].

По результатам исследования, проведенного авторами и их коллегами из ИНГТ СО РАН в рамках Большой Норильской Экспедиции СО РАН в 2020 г., для более десятка водоемов (оз. Пясино, оз. Лама, оз. Мелкое и др.) и водотоков (руч. Надеждинский, р. Далдыкан, р. Амбарная, р. Пясино, р. Болгохтох, р. Купец и др.), расположенных в 10–15-километровой зоне воздействия НПП, установлены превышения в содержании металлов (медь, цинк, железо, никель, кобальт, алюминий, кадмий, молибден и др.), сульфатов, нефтепродуктов над нормативными ПДК вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения. В водных объектах, находящихся в непосредственной близости (сотни метров) промышленных предприятий, превышения могут достигать тысяч раз (по меди, никелю, железу, алюминию). При удалении концентрации веществ резко падают, с превышением ПДК от нескольких единиц до десятков раз. Также содержание выше нормативов ПДК_{рх} (больше в 2–3 раза для меди, цинка, железа) обнаружены в водных объектах, условно относящихся к неподвергающимся техногенному воздействию.

Почва

Почвы НПП относятся к тундровым, развивающимся на почвообразующих породах морского и ледникового происхождения, и представлены в основном криоземами, а также подбурами, торфяно-криоземами, грануземами и литоземами [9, 50]. Они разделены на три зоны: 1) Норильск, где почвы загрязнены шлаками; 2) пригород на расстоянии до 15 км, где загрязнение происходит от аэрозолей; 3) фоновая зона до 100 км от города [51]. Наибольшая площадь загрязнения наблюдается в 30-километровом радиусе от источников, а наивысшие концентрации, как и в случае со снежным покровом, наблюдаются по розе ветров от источников вредных выбросов. Уровень содержания

никеля и меди – приоритетных загрязнителей почв – наиболее высоким оказался в массивах Оганер и Талнах – более 200 мг/кг. Максимальное содержание серы в наиболее приближенных к источникам эмиссии почвах – более 7000 мг/кг, что превышает фоновое значение в 8 раз. В торфяниках на расстоянии 45–70 км от источников выбросов концентрация серы превышает фон в 2 раза. На расстоянии в 85 км в торфяных залежах загрязнение серой не фиксируется [52].

Сера и металлы активно накапливаются в верхних 5 см торфяных залежей (с максимумом в поверхностном горизонте от 0 до 2 см) при прохождении техногенных потоков сквозь торфяную толщу в пределах 30 см [52]. Под влиянием прямых или косвенных воздействий предприятий НПП в свойствах почв происходят физические и химические изменения: утрачиваются элементы питания, накапливаются поллютанты, в особенности тяжелые металлы, а присутствие серы ведет к подкислению почв [9, 52]. Поступление в почву тяжелых металлов, наиболее губительных для микробоценозов, происходит в виде сухих и влажных атмосферных выпадений, с растительным опадом либо через поверхностный сток. Накапливаясь в значительных количествах, поллютанты прежде всего воздействуют на жизнедеятельность почвенных микроорганизмов [9].

Кроме поллютантов к негативным изменениям в почвах приводит гибель деревьев и смена растительности, также вызванные воздействием на них загрязняющих веществ горно-металлургического комбината. Изменения растительного покрова ведут к снижению аккумуляции органических веществ в почве, падению интенсивности обмена веществом и энергией между компонентами экосистемы, изменению гидротермического режима, далее к смене типов почв и, как следствие, к увеличению глубины сезонного оттаивания многолетней мерзлоты и общему нарушению устойчивости экосистемы [9, 10].

Значительные структурно-функциональные нарушения микробного комплекса почвы связаны с полным отмиранием растительного покрова. Мертвый растительный материал становится сорбционным, седиментационным и механическим барьером с высокой концентрацией тяжелых металлов. Численность микроорганизмов, соответственно, становится намного ниже в сравнении с незагрязненными почвами, а их функциональность в шесть раз ниже, что вызвано замедлением метаболизма микроорганизмов под действием тяжелых металлов [9]. В конечном итоге, несмотря на определенную приспособляемость микроорганизмов к постоянному поступлению агрессивных поллютантов, структурно-функциональные нарушения почв ведут к замедлению круговорота биогенных элементов, а также снижают устойчивость почв к загрязнению.

Аналогично водным объектам НПП, почвы напрямую подвержены загрязнению в случае аварийных ситуаций, как в случае с уже описанной аварией на ТЭЦ-3 Норильска.

Растительный покров

В зоне действия предприятий НПП находятся лесотундровые, тундровые и болотные экосистемы.

С учетом субарктического климата с холодной зимой и коротким летом продолжительность вегетационного периода (+5 °C) составляет 80–90 дней, а период интенсивного роста (+10 °C) – 60 дней [9].

Начиная с 1930-х гг., на которые приходится начало интенсивной индустриализации, загрязнение от НПП затронуло большие площади тайги и тундры [2, 53]. Следует отметить противоречивость в оценке площади поврежденной растительности, степени тяжести повреждений, а также недостаточную изученность воздействия промышленного загрязнения на функционирование и продуктивность растительного покрова [2]. По разным оценкам, максимальная площадь поражения за время работы горно-металлургического комбината составила от 500 тыс. [8] до 7 млн га [4].

По степени нарушенности выделяют сильно, умеренно и слабо нарушенные фитоценозы, а также условно фоновые территории [50]. Наибольшая деградация растительности наблюдается на непосредственно прилегающей к Норильску территории, а также, аналогично снежному покрову и почве, в зоне распространения воздушно-пылевого шлейфа от выбросов. В зоне наиболее интенсивного антропогенного воздействия наблюдаются участки полностью уничтоженной растительности – прежде всего это южная, юго-восточная и северо-восточная области от Норильска [34]. Зона средних нарушений приходится на область распространения шлейфа за исключением его центральной части и выражается пониженным флористическим разнообразием растительных сообществ.

В НПП отмечается пониженное видовое разнообразие во всех систематических группах высших и низших растений, притом что постоянные промышленные выбросы не дают растительным покровам перейти в стадию восстановления [33]. При этом растения по-разному реагируют на токсические выбросы горно-металлургического комбината. Наиболее приспособленными оказались растения с быстрой регенерацией – злаки, ивы и некоторые виды разнотравья [33]. Напротив, водоросли, медленно регенерирующие мхи и лишайники, а также арктические виды цветковых растений наиболее чувствительны к химическому загрязнению. Первыми из экосистем исчезают лишайники, что приводит к деградации тундровых систем [33]. В свою очередь, сокращение мхов и лишайников существенно влияет на сокращение оленьих пастбищ и популяции северных оленей [15].

Антропогенное воздействие на растительный покров можно отслеживать по скорости деградации лесов, которая хорошо согласуется с динамикой техногенной нагрузки на экосистему НПП. Согласно работе А.В. Кирдянова с соавторами [8], леса подразделяются на ослабленные, сильно ослабленные, усыхающие и погибшие. Гибель отдельных деревьев началась в 1940-х гг. В 1960-е гг. начали работать новые производства, трехкратно увеличился объем продукции металлов, были построены высокие трубы, что в свою очередь увеличило площадь загрязнения. С этого времени фиксируется массовая гибель деревьев. В 1970-х гг. наблюдается полное разрушение древосто-

ев и всплеск гибели лиственницы [8]. К 1990-м гг. на расстоянии 120 км от Норильска наблюдалось 50 %-е уничтожение лиственного леса, а в 7–50-километровой зоне – 100 %-ное уничтожение [15].

В 1990-х – начале 2000-х гг. отмечено возобновление роста колец деревьев, возможно, связанное со снижением техногенной нагрузки. Всего с 1960-х гг. с подветренной стороны НПП погибло до 24 тыс. км² леса, что совпало с резким увеличением концентрации серы, меди и никеля в атмосфере [2]. Никель признан наиболее высокотоксичным для растительности, в особенности для высших растений – березовых и лиственничных лесов, ивы, ольхи и прочих кустарников [52]. Тяжелые металлы в совокупности с серой в виде кислотных дождей поражают хвою деревьев. Это приводит к нарушению фотосинтеза, а также росту уязвимости деревьев к насекомым и грибам. Дополнительным фактором поражения растительного покрова является почва, подверженная воздействию поллютантов (прежде всего серы) [8].

Перед гибелью деревьев отмечается деградация их роста [8], и именно промышленный фактор, по видимому, объясняет «проблему дивергенции» в дендрохронологии: начиная с 1960-х гг. наблюдаются расхождения между летним ростом температуры и реальным приростом древесных растений. Высказывается мнение, что повышенная концентрация аэрозолей из-за выбросов снижает чувствительность деревьев к температуре, тем самым замедляя их рост [2]. По текущим прогнозам, при сохранении существующих темпов загрязнения зона полностью погибших лесов, охватывающая сегодня 86 км от Норильска, будет расширяться [8].

Основные современные методы мониторинга

Главная задача мониторинга – точная оценка уровня повреждений всех компонентов экосистемы, которая в числе прочего может использоваться для выработки экологических нормативов по допустимым уровням выбросов вредных веществ. Применяемые при мониторинге экологического состояния НПП подходы и методы напрямую зависят от анализируемых объектов и их характеристик. Задействуется широкий методологический и технический инструментарий различных дисциплин, часто сочетающий разнообразие подходов для верификации и повышения достоверности результатов.

В широком смысле для прямого наблюдения за большинством компонентов экосистем, рассмотренных выше, применяются либо наземные, либо дистанционные технологии, а для прогнозирования экологических процессов, последствий возможных аварий широко применяются теоретические модели.

В наземных измерениях методологической основой является сравнение наблюдаемых уровней концентрации поллютантов с региональным геохимическим фоном. Кроме того, могут применяться гигиенические эталоны – предельно или относительно допустимые концентрации вредных веществ. Поскольку высокие уровни концентрации поллютантов могут быть вызваны различными причинами, для выявления

антропогенного характера загрязнения используется анализ величин их концентрации в зависимости от удаленности от источника загрязнения [50]. Выявление аномалий, обусловленных промышленной деятельностью в НПП, при которых концентрации различных элементов превышают фоновые значения, является одной из наиболее значимых эколого-геохимических задач [52]. Коэффициент аномальности, то есть отношение среднего содержания элемента к природной норме – геохимическому фону, является методологической основой выявления загрязнения [52].

С разработкой автоматизированных систем учета важным средством мониторинга становятся стационарные посты с различными датчиками, круглосуточно и в режиме реального времени позволяющими отслеживать уровень загрязнения природных компонентов, в том числе неспециалистам, что усиливает общественный экологический контроль [54]. Ниже приведены некоторые примеры наземных наблюдений за отдельными компонентами экосистемы НПП, включая атмосферу, воду, почву и растительный покров.

Концентрация вредных выбросов в атмосферу рассчитывается по оценке баланса массы пассивной и химически активной примесей, которые попадают в атмосферу из стационарного точечного источника. При этом для достоверной оценки экологического состояния атмосферы недостаточно просто выявлять степень загрязненности воздуха: следует также учитывать различия в процессах осаждения примесей на поверхность [35].

Для анализа экологического состояния почв и их химического состава используются энергодисперсионные рентгенофлуоресцентные анализаторы: в традиционном рентгенофлуоресцентном режиме определяются тяжелые металлы, тогда как для выявления сверхтяжелых металлов применяется рентгенорадиометрический режим. При анализе проб почвы, воды и донных отложений водоемов в полевых условиях применяются многопараметрические измерители, способные в экспресс-режиме оценивать широкий ряд характеристик, таких как рН, окислительно-восстановительный потенциал, растворенный кислород, проводимость, температура, соленость. Определение элементного состава проб воды, почв и донных отложений проводится при помощи масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС), обладающей высокой чувствительностью к определению металлов и примесных элементов. Другими распространенными методами определения элементного состава образцов являются атомно-эмиссионная спектрометрия (АЭС) и атомно-абсорбционная спектрометрия (ААС). Биологический потенциал почвы анализируется при исследовании свойств микроорганизмов, которые являются оперативными и чувствительными маркерами. Микробные комплексы быстро и отчетливо реагируют на антропогенные факторы, позволяя, таким образом, вести их мониторинг и отслеживать структурно-функциональные изменения в биологическом круго-

вороте [9]. Предварительная подготовка проб и фиксация наличия в них поллютантов определяется по ГОСТам и протоколам, подробно изложенным в различных методиках определения массовой концентрации элементов [16, 55].

Для определения концентраций элементов в воде может использоваться масс-спектрометрия, а для оценки влияния показателей водной среды на распределение элементов – анализ многофакторного шкалирования [12]. Эффективным методом определения техногенных загрязнений является фактор обогащения (ER), применяемый для оценки загрязнения почвы и водных объектов и рассматриваемый как отношение содержания металла в исследуемом образце к референтному металлу в этом же образце в сравнении с таковым отношением металлов в фоновых породах [12].

В анализе деградации растительных покровов часто используется сравнительный анализ величины радиального прироста деревьев с перекрестной датировкой погодичной изменчивости ширины годичных колец деревьев из одинаковых дендроклиматологических районов и жизненного состояния растительности [8]. Проводится оценка биологического разнообразия с составлением геоботанических карт [33]. Оценка индекса хлорофилла легла в основу составления карт повреждения растительного покрова вокруг НПП с учетом уровня поражений, а полученные спектрометрией данные показали хорошую корреляцию с оценкой концентрации серы в хвое деревьев [56]. Для вычисления содержания серы и тяжелых металлов в различных компонентах экосистемы и анализа временной динамики ее состояния могут применяться пространственные регрессионные модели [57].

Значительное место в исследовании загрязнения отдельных компонентов экосистемы занимают методы дистанционного зондирования – спутникового и самолетного с использованием самолетов-лабораторий [31]. Спектр таких методов достаточно широк и применим к различным метеоусловиям, временам года и типам решаемых задач. В дистанционном наблюдении за территорией НПП часто используются аппараты Европейского космического агентства, которые позволяют проводить мониторинг наземных экосистем, в том числе количественную оценку повреждения растительного покрова, в режиме реального времени с созданием соответствующих карт [56, 57]. Карты экологического риска впоследствии могут использоваться для контроля опасных процессов в экосистемах, входящих в зоны крупных промышленных объектов в Арктике.

В частности, спутниковое зондирование было успешно применено при мониторинге причин аварии на ТЭЦ-3 Норильска в 2020 г. Интерферограммы по снимкам земных покровов позволили выполнить мониторинг состояния топливных резервуаров и прилегающей к ним территории. По полученным данным группа исследователей сделала вывод, что разгерметизация резервуара не была вызвана смещением отражающей поверхности исследуемой территории вследствие таяния вечной мерзлоты [39]. Отметим,

что данные со спутников дополнительно могут использоваться для смежных целей: в частности, для мониторинга хода работ по ликвидации последствий экологических катастроф. Так, на ТЭЦ-3 эффективность восстановительных работ оценивалась по анализу спутниковых снимков, последовательно отображающих следы транспорта ликвидационных служб, появление емкостей для сбора разлитой жидкости и др. [41].

В недавних спутниковых наблюдениях за уровнем серы в НПП использовались инфракрасный интерферометр для зондирования атмосферы и тепловое инфракрасное зондирование, которые показали перспективность для измерения приповерхностного загрязнения серой [58, 59]. Спутниковое зондирование активно применяется для определения уровня углекислого газа в атмосфере арктических территорий Российской Федерации [60].

Широко задействуются методы математического моделирования. Так, при аварийных ситуациях, например, разливах нефти, возможно использование гидродинамического моделирования процессов эволюции нефтяного разлива на земной поверхности, позволяющего оценить масштабы загрязнения [17]. Набирают популярность подходы на основе обратных задач, включающих совместное применение математических моделей по переносу примесей с имеющимися экспериментальными данными. Обратная задача, например, решалась в исследовании особенностей атмосферной циркуляции в НПП [42].

Несмотря на широкий и сложный инструментарий мониторинга и сейчас отмечаются его ограниченные возможности и несистематический характер, часто обусловленные недоступностью подробных данных об источниках загрязнения, химическом и дисперсном составе выбросов. Даже с учетом давней истории экологических наблюдений отмечается отсутствие масштабных комплексных оценок разрушения экосистемы НПП [2], слабая геоэкологическая и геокриологическая изученность района [4], а также противоречивость информации об экологической обстановке на данной территории [44].

Регулирующие документы и контроль. Подходы к расчету и ликвидации накопленного экологического ущерба

Законодательство в сфере экологии предусматривает три вида экологического контроля: государственный надзор, производственный контроль непосредственно на предприятиях, а также общественный контроль. Одной из основных задач в большинстве регулирующих документов называется расчет и ликвидация накопленного экологического ущерба, то есть последствий хозяйственной деятельности, осуществляемой в прошлом и обусловившей нынешнее загрязнение, которое продолжает наносить вред окружающей среде и является основной экологической проблемой Арктики. Наиболее важным этапом является оценка экологического ущерба: составление карт с пострадавшими участками, оценка их опасности, выявление возможностей регенерации. Последу-

ющими задачами по ликвидации накопленного экологического ущерба являются: а) очистка водоемов от затопленных и брошенных объектов и опасных загрязняющих веществ; б) подготовка, вывоз и утилизация бочек; в) вывоз и утилизация транспорта и металлолома; г) вывоз и утилизация радиоизотопных термоэлектрических генераторов (РИТЭГов); д) ликвидация отвалов горно-промышленных комбинатов; е) ликвидация нефтезагрязнений [5].

Государственный надзор в сфере экологии и проблемы в его реализации

На текущий момент разработано и находится в действии несколько законодательных актов и положений, регулирующих оценку экологической обстановки в российской Арктике, подходы к ликвидации накопленного ущерба и стратегию дальнейшего освоения северных территорий.

С 18 сентября 2008 г. действовали утвержденные Президентом Российской Федерации «Основы государственной политики РФ в Арктике на период до 2020 г. и дальнейшую перспективу» № 1969, а с 08 февраля 2013 г. – «Стратегия развития Арктической зоны и обеспечение безопасности на период до 2020 г.», где особое внимание уделялось ликвидации последствий ущерба, нанесенного в предыдущие годы [5, 16]. С 17 февраля 2012 г. действует утвержденный Правительством России проект «Основы государственной политики в области экологического развития Российской Федерации до 2030 года».

С 2019 по 2024 г. в рамках Указа Президента № 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года» от 07 мая 2018 г. функционирует национальный проект «Экология», предусматривающий комплекс мероприятий по снижению выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух в крупных промышленных центрах, включая Норильск. В 2020 г. были изданы «Основы государственной политики РФ в Арктике на период до 2035 года» и «Стратегия развития АЗРФ и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года», также касающиеся вопросов экологии и рационального природопользования в Арктике [61].

При решении задач оценки и ликвидации накопленного экологического ущерба первостепенное значение имеет сбор информации о местоположении объектов, объемах загрязнения, технологии утилизации поллютантов, логистике. Для расчета ущерба, причиненного различным компонентам экосистемы, разработаны соответствующие индивидуальные методики:

- Методика исчисления размера вреда, причиненного водным объектам вследствие нарушения водного законодательства. Утверждена приказом Минприроды РФ от 13 апреля 2009 г. № 87.
- Методика определения размеров ущерба от деградации почв и земель. Утверждена Минприроды России и Роскомземом в июле 1994 г.
- Порядок определения размеров ущерба от загрязнения земель химическими веществами. Утвержден Роскомземом и Минприроды РФ в 1993 г.

- Об исчислении размера вреда, причиненного лесам вследствие нарушения лесного законодательства. Постановление Правительства РФ от 26 ноября 2007 г. № 806.
- Методика исчисления размера вреда, причиненного водным биологическим ресурсам. Утверждена приказом Федерального агентства по рыболовству от 25 ноября 2011 г. № 1166.
- Методика исчисления размера ущерба от загрязнения подземных вод от 11 февраля 1998 г. № 81.

В каждой методике реализуется декомпозиция экологического ущерба по компонентам окружающей среды (почвы, водные объекты, леса, биологические ресурсы), а ущерб для каждого компонента детализируется по элементам вредного воздействия. Например, в случае деградации почв и земель учитываются такие элементы вредного воздействия, как технологическая и физическая деградация, эрозия, засоление, осолонцевание, заболачивание. При загрязнении земель химическими веществами ущерб определяется количеством загрязняющих веществ, степенью и глубиной загрязнения почв, захламливанием земель несанкционированными свалками отходов. Трудности возникают при оценке ущерба, наносимого представителям малочисленных народов арктических территорий, когда устоявшаяся жизнь и промыслы коренных народов оказываются под угрозой из-за биодegradации пресных водоемов, накопления стойких органических загрязнителей и стойких токсичных веществ в традиционной пище, загрязнения мест охотничьих и рыболовных промыслов.

На международном уровне часто применяется «воспроизводственный» подход компенсации ущерба, при котором нарушитель возмещает ущерб в натуральной форме за счет восстановительных работ. Также при наличии могут быть задействованы специализированные природоохранные распределительные фонды целевого назначения [61].

Реализации государственных планов по эффективному контролю экологической ситуации на арктических территориях России, по расчету и ликвидации накопленного экологического ущерба препятствуют несколько ключевых проблем, решение которых является залогом устойчивого развития Арктики и освоения ее ресурсов. Характерной особенностью России в решении вопросов расчета накопленного в Арктике ущерба и его ликвидации является несистемность проводимых мер, а также отставание в решении этой проблемы от других стран с арктическими территориями [11]. К этой проблеме добавляется недостаточное развитие нормативно-правовой базы, а также частое несоблюдение технологических и природоохранных регламентов при проведении работ [4, 17]. К примеру, трудно применимым оказывается международный «воспроизводственный» подход, поскольку отсутствуют четкие требования к содержанию проектов восстановительных работ и не прописан порядок учета затрат, которые понес сам нарушитель во время ликвидации аварий [61]. Ликвидация накопленного экологического вреда осуществляется на ограниченных территориях и не во всех субъектах

России. Координация работ на федеральном и региональном уровнях осуществляется слабо, нет общей программы работ. Нередко отсутствуют законодательные акты, четко фиксирующие процедуру применения методик и самого процесса возмещения вреда, что приводит к неэффективности их использования [61].

Нерешенной остается проблема централизованных подходов, например, ГОСТ накопленного экологического ущерба 2010 г. на материалах юга Сибири, при котором не учитывается специфика арктических территорий, диктующих особенности производственных процессов. На примере «Норникеля» и некоторых других ресурсных и обрабатывающих компаний выявлен ряд существенных отличий, диктуемых спецификой Арктики, от прочих российских и международных корпораций, что в обязательном порядке должно учитываться при разработке теории о закономерностях образования, пространственного поведения и эволюции ресурсных корпораций, в итоге влияющих и на экологическую политику таких компаний [3].

Не учитываются географические или природно-климатические условия и в федеральных законах, регламентирующих порядок возмещения экологического вреда [4, 17, 62]. Обратной стороной проблемы является разработка излишне строгих, а потому часто невыполнимых регламентов, требующих применения сверхдорогих технологий очистки и восстановления экосистем. В то же время для предотвращения аварийных ситуаций строгое соблюдение рекомендуемых сроков диагностики и эксплуатации объектов промышленной инфраструктуры согласно ГОСТам представляется вполне оправданным.

В настоящее время регулирование экологической обстановки арктической зоны осуществляется несколькими ведомствами: Минздравом РФ (разработка ПДК и оценка влияния на здоровье населения); Минприроды РФ (оценка влияния на флору и фауну); Минпромторгом РФ (контроль технологических процессов производства), что в целом усложняет ситуацию [17]. Отмечаются противоречия в документах, а также отсутствие в некоторых случаях научной обоснованности и экспериментальной проверки. Закрытость информации сказывается на доминирующем негативном образе окружающей среды российской Арктики как в отечественных, так и в международных публикациях [44]. Парадоксальной является ситуация, при которой концентрация прибыли формируется не на арктических территориях, а вдали от них, так что к решению экологических проблем и поддержке северных территорий должно подключаться государство, которому необходимо переориентировать средства в Арктику из федерального бюджета [3].

Производственный контроль

За прошедшее десятилетие отмечено совершенствование экологической политики на предприятиях российской Арктики, хотя и с оговоркой, что текущих вложений в природоохранные мероприятия оказывается недостаточно, а инновационные ресурсосбере-

гающие технологии реализуются не везде и не в полной мере [7]. Потенциал внедрения инноваций и быстрого реагирования на катастрофы оказался в большой степени зависим от типов управления компаниями, где в более ранние периоды их развития предпочтительными оказываются жесткие централизованные подходы, тогда как при превращении в крупные корпорации со множеством филиалов лучшие результаты дает делегирование полномочий в филиалы [3].

В НПП, в отличие от многих корпораций Севера по добыче и обработке полезных ископаемых, компания «Норникель» в области защиты окружающей среды показывает положительную динамику и последовательно увеличивает расходы на охрану окружающей среды [7]. Повышаются системы для очистки выбросов пыли, стабилизируется процесс сжигания топлива, снижается содержание серы в переработке сырья, в целом снижаются объемы отходов (с 2011 по 2018 гг. на 25 %) и выбросов в атмосферу, чему способствуют новые технологии строительства карьеров и снижение объемов добычи открытым способом [7, 34].

В 2004 г. «Норникель» запустил программу, направленную на внедрение интегрированной системы менеджмента качества и экологического менеджмента в главном управлении и производственных подразделениях, отвечающей международным стандартам. Были разработаны методические подходы по экологическому контролю для минимизации отрицательного воздействия на природную среду с установкой автоматизированных датчиков измерения и учета в местах выброса, информация от которых стекается в единый центр управления данными [54].

В 2009 г. в «Норникеле» была завершена программа формирования собственного парка транспортных судов-контейнеровозов. В 2015 г. запущена программа реконфигурации производственных мощностей, предполагающая существенное снижение выбросов серы [29, 63, 64]. В 2016 г. основное производство по переработке никеля и металлов платиновой группы было перемещено из Заполярного филиала на Кольскую горно-металлургическую компанию – для приближения производства к рынкам сбыта и, соответственно, для смягчения экологических проблем. В 2018 г. был запущен проект на Талнахской фабрике, предполагающий к 2025 г. на 90 % снизить выбросы серы в атмосферу [3]. Проблемы экологии и промышленной безопасности призван снизить и проект «Техпрорыв», направленный на переход к «зеленой» экономике с помощью технологий искусственного интеллекта, в том числе с использованием дронов и роботов. Быстро развивается платформенная модель процесса добычи полезных ископаемых, характеризующаяся компактностью, обособленностью, новой логистикой и полной цифровизацией всех бизнес-процессов. Благодаря этому внедряются существенно меньшие по размеру технологии сжатого рабочего пространства, происходит сокращение внутризаводских перемещений и компактное размещение производственных площадок [15].

Экологический контроль остается одной из важнейших правовых мер по обеспечению рационального использования природных ресурсов НПП и защиты окружающей среды от вредного воздействия. Это наглядно подтвердила авария на ТЭЦ-3, где были выявлены нарушения в порядке сроков проведения капитального ремонта резервуара и недостаточная эффективность боновых заграждений, пропускающих многие вредные соединения [40, 65], хотя по данным спутниковых снимков и отмечается оперативность служб по ликвидации аварии [41]. Таким образом, вопросы о недостаточной эффективности технического и экологического контроля продолжают быть актуальными, и даже с учетом увеличения экологических издержек «Норникеля» отмечается необходимость усиления контроля [44].

Общественный контроль

Модель общественного экологического контроля на арктических территориях России набрала популярность в последнее десятилетие. Эта концепция, от которой ожидается высокий положительный эффект, предполагает предоставление общественности данных мониторинга и возможности ее участия в принятии значимых решений при проведении экологической экспертизы [54]. Таким образом, модель позволяет гражданам и общественным объединениям реализовать право на получение своевременной, полной и достоверной информации о состоянии окружающей среды в местах своего проживания и предпринимаемых мерах по охране окружающей среды [54, 55, 66].

Цели общественного контроля в российской Арктике включают объединение усилий различных групп населения северных территорий, руководства предприятий и государственных надзорных органов в решении проблем охраны окружающей среды, систематическое отслеживание экологических тенденций на территории, создание условий для межведомственного взаимодействия, совершенствование государственной политики в области экологии и, как следствие, содействие экологическому воспитанию населения.

Рекомендации

Поскольку самостоятельно на переработку отходов природе потребуются десятки, если не сотни, лет, оперативное решение обозначенных выше задач представляется крайне актуальным. Их решение видится в разработке особых режимов природопользования и охраны окружающей природной среды – с учетом особенностей арктических территорий, совершенствования государственного регулирования относительно загрязнения арктических экосистем, постоянного мониторинга загрязнения, рекультивации ландшафтов, утилизации токсичных отходов и обеспечения химической безопасности, в особенности в местах компактного проживания людей [7, 67, 68]. Предлагается в отчетных документах указывать научно обоснованные и конкретные проведенные мероприятия по повышению эффективности природоохранной деятельности, а также усилить связь пред-

приятий с научными организациями для совместной разработки и реализации инновационных технологий, направленных на снижение пагубного воздействия на природу Арктики [7, 61, 67].

При крупных экологических катастрофах полезным могло бы оказаться привлечение международных партнеров, как для точной оценки ущерба, так и для разработки возможных совместных действий по ликвидации последствий аварии, чему в настоящий момент противоречит режим регламентированного въезда в Норильск иностранцев и необходимость специальных согласований. Некоторым исключением может служить Международная Хартия в целях мониторинга разлива топлива на ТЭЦ-3 в Норильске в 2020 г. [69].

Наиболее перспективным в решении экологических проблем Арктики и ликвидации накопленного ущерба представляется развитие государственно-частного партнерства [70], в том числе с привлечением общественности. Это продиктовано и самой спецификой расположения корпораций в малонаселенных и удаленных районах, где их функции не имеют конкурентов, а потому взаимодействие корпораций с государством и населением становится намного более полным и многоаспектным в сравнении с корпорациями, расположенными на освоенных территориях [3]. В этой же связи ждет решения проблема приобретения прав собственности на отходы и земельные участки, на которых они расположены. С одной стороны, это актуально, поскольку бывший собственник не сможет заявить на них права, с другой – предполагается, что бывший собственник будет обязан возместить новому владельцу земельного участка причиненный брошенными отходами вред, а также расходы на перемещение отходов в места их сбора [69].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бурцева Е.И., Петрова А.Н. Экологические проблемы северных территорий Якутии в условиях промышленного освоения и глобального потепления // Успехи современного естествознания. – 2017. – № 5. – С. 83–88.
2. Ecological and conceptual consequences of Arctic pollution / A.V. Kirilyanov, P.J. Krusic, V.V. Shishov, E.A. Vaganov, A.I. Fertikov, V.S. Myglan, V.V. Barinov, J. Browne, J. Esper, V.A. Ilyin, A.A. Knorre, M.A. Korets, V.V. Kukarskikh, D.A. Mashukov, A.A. Onuchin, A. Piermattei, A.V. Pimenov, A.S. Prokushkin, V.A. Ryzhkova, A.S. Shishikin, K.T. Smith, A.V. Taynik, M. Wild, E. Zorita, U. Büntgen // Ecology Letters. – 2020. – V. 23. – № 12. – P. 1827–1837.
3. Пилиясов А.Н., Богодухов А.О. Арктическая корпорация: подступы к формированию новой теории (Часть 1) // ЭКО. – 2021. – № 1. – С. 40–66.
4. Лаухин С.А. О некоторых проблемах накопленного экологического ущерба от недропользования в российской Арктике (на примере Востока России) // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2020. – № 1. – С. 76–81.
5. Соколов Ю.И. Арктика: к проблеме накопленного экологического ущерба // Арктика: экология и экономика. – 2013. – № 2. – С. 18–27.
6. Летучий Ю.А. Оценивание экологического ущерба от деятельности Вооруженных сил в Арктическом регионе // Труды военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2015. – № 649. – С. 175–180.
7. Цукерман В.А., Иванов С.В. Экологическая политика ресурсных корпораций при промышленном освоении месторождений минерального сырья арктической зоны Российской Федерации // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 10. – С. 56–66.

Заключение

Арктика благодаря стратегическим запасам ресурсов входит в сферу особых геополитических и национальных интересов Российской Федерации. Особенность арктической природы заключается в ее чрезвычайной чувствительности как к естественным, так и к антропогенным воздействиям, а также в низкой способности экосистем к восстановлению и в их неустойчивости. Наиболее острые экологические задачи текущего дня включают рекультивацию нарушенных земель, ликвидацию ущерба за предыдущие периоды и последствий от потепления климата.

Главными источниками загрязнения на текущий момент являются деятельность добывающей и обрабатывающей промышленности, аварийные ситуации на производстве, объекты обеспечения функционирования Вооруженных Сил России, последствия ядерных испытаний и деятельности АЭС, организация перевозки грузов и людей, брошенные объекты хозяйственной деятельности, токсиканты, перенесенные воздушными потоками и поверхностным стоком в Арктику из средних широт.

В качестве рекомендации по решению существующих экологических задач на арктических территориях предлагается разработка режимов природопользования с учетом локальных особенностей, совершенствование государственного регулирования и совершенствование системы мониторинга окружающей среды. Эти меры предполагается осуществлять в рамках государственно-частного партнерства с активным привлечением общественности.

Исследование выполнено при финансовой поддержке программы ФНИ (проект № 0266-2019-0008).

8. Динамика усыхания лиственницы сибирской в зоне влияния техногенных эмиссий предприятий Норильского промышленного района / А.В. Кирдянов, В.С. Мыглан, А.В. Пименов, А.А. Кнорре, А.К. Экарт, Е.А. Ваганов // Сибирский экологический журнал. – 2014. – № 6. – С. 945–952.
9. Оценка состояния микробных комплексов почв лесотундровой зоны в условиях аэротехногенного загрязнения / А.В. Богородская, Т.В. Пономарева, О.А. Шапченко, А.С. Шишкин // Почвоведение. – 2012. – № 5. – С. 582–593.
10. Ведрова Э.Ф., Мухортова Л.В. Биогеохимическая оценка лесных экосистем в зоне влияния Норильского промышленного комплекса // Сибирский экологический журнал. – 2014. – № 6. – С. 933–944.
11. Оценка значения стойких токсичных веществ в накопленном экологическом ущербе для Арктики / М.В. Чашин, Е. Барнес, Р.С. Даер, Н.В. Захарова, И.Л. Ручина, Е.В. Зибарев, А.В. Кузьмин, К.В. Корбукова, Л.И. Абрютин // Экология человека. – 2009. – № 2. – С. 8–12.
12. Геохимические закономерности распространения элементов в водах озер арктических регионов / Т.И. Моисеенко, М.И. Дину, Н.А. Гашкина, Т.А. Кремлева, В.Ю. Хорошавин // Геохимия. – 2020. – Т. 65. – № 6. – С. 521–532.
13. Сазонов А.Д., Комаров Р.С., Передера О.С. Разлив нефтепродуктов в Норильске 29 мая 2020 года: предполагаемые причины и возможные экологические последствия // Экология. Экономика. Информатика. Серия: Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем. – 2020. – Т. 1. – № 5. – С. 173–177.
14. Терещенко С.В., Марчевская В.В., Павлишина Д.Н. Пути снижения негативного воздействия горного производства на окружающую природную среду // Вестник Кольского научного центра РАН. – 2016. – № 4. – С. 62–66.

15. Shchelkunova R.P. The effect of industry and transport on reindeer pastures: the example of Taymyr // *Polar Geography and Geology*. – 1993. – V. 17. – № 4. – P. 251–258.
16. Исследование объектов накопленного экологического ущерба на острове Вилькицкого (Карское море) / Р.А. Колесников, В.М. Макеев, Е.Н. Романова, В.И. Стурман, К.А. Журкина // *Инженерные изыскания*. – 2018. – С. 12. – № 5–6. – С. 32–41.
17. Актуальные проблемы предотвращения, ликвидации разливов нефти в Арктике и методы оценки экологического ущерба прибрежным территориям / В.И. Павленко, Ж. Муангу, В.Б. Коробов, А.С. Лохов // *Арктика: экология и экономика*. – 2015. – № 3. – С. 4–11.
18. Characterization of viable bacteria from siberian permafrost by 16S rDNA sequencing / T. Shi, R.H. Reeves, D.A. Gilichinsky, E.I. Friedmann // *Microbial Ecology*. – 1997. – V. 33. – № 3. – P. 169–179.
19. Isolation and degradation potential of a cold-adapted oil/PAH-degrading marine bacterial consortium from Kongsfjorden (Arctic region) / F. Crisafi, L. Giuliano, M.M. Yakimov, M. Azzaro, R. Denaro // *Rendiconti Lincei-Scienze Fisiche E Naturali*. – 2016. – V. 27. – P. 261–270.
20. Микроорганизмы в ликвидации последствий нефтяного загрязнения (обзор) / Т.Ю. Коршунова, С.П. Четвериков, М.Д. Бакаева, Е.В. Кузина, Г.Ф. Рафикова, Д.В. Четверикова, О.Н. Логинов // *Прикладная биохимия и микробиология*. – 2019. – Т. 55. – № 4. – С. 338–349.
21. Соловьянов А.А. Экологические проблемы Арктической зоны Российской Федерации: состояние и пути решения // *Охрана атмосферного воздуха. Атмосфера*. – 2011. – № 2. – С. 21–30.
22. Влияние затонувших судов на экологическую безопасность прибрежных акваторий и береговых зон России / Н.А. Вальдман, С.В. Викторов, В.Н. Илюхин, Л.Л. Озерова // *Труды Крыловского государственного научного центра*. – 2019. – № 4. – С. 231–244.
23. Ложкина О.В., Онищенко И.А. Анализ опасного загрязнения атмосферного воздуха крупных городов арктической зоны отработавшими газами транспортных средств // *Проблемы управления рисками в технике*. – 2020. – № 3. – С. 20–26.
24. Lake drainage in permafrost regions produces variable plant communities of high biomass and productivity / S. Loiko, N. Klimova, D. Kuzmina, O. Pokrovsky // *Plants*. – 2020. – V. 9. – № 7. – P. 1–42.
25. Impact of permafrost thaw and climate warming on riverine export fluxes of carbon, nutrients and metals in Western Siberia / O.S. Pokrovsky, R.M. Manasypov, S.G. Kopysov, I.V. Krickov, L.S. Shirokova, S.V. Loiko, A.G. Lim, L.G. Kolesnichenko, S.N. Vorobyev, S.N. Kirpotin // *Water (Switzerland)*. – 2020. – V. 12. – № 6. – P. 1–21.
26. Проблемы контроля фильтрации вод через гидротехнические сооружения в условиях вечной мерзлоты / Н.В. Юркевич, Н.В. Юркевич, В.Н. Гуреев, Н.А. Мазов // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2020. – Т. 331. – № 4. – С. 126–138.
27. Пилиясов А.Н., Богодухов А.О. Арктическая корпорация: подступы к формированию новой теории (Часть 2) // *ЭКО*. – 2021. – № 2. – С. 62–84.
28. Vazhenov O., Oykher A. Strategic analysis of environmental and economic potential of Norilsk metallurgical cluster / *International Conference on Efficient Production and Processing (ICEPP-2020)*. – Prague, Czech Republic, February 27–28, 2020). E3S Web of Conferences. – 2020. – V. 161. – P. 1–6.
29. Леонтьев Л.И., Тарасов А.В. Экологические проблемы «Норильского никеля» и возможные пути их решения // *Экология и промышленность России*. – 2017. – Т. 21. – № 2. – С. 15–19.
30. Nemirovskaya I.A., Shevchenko V.P. Organic compounds and suspended particulate matter in snow of high latitude areas (Arctic and Antarctic) // *Atmosphere*. – 2020. – V. 11. – № 9. – P. 1–23.
31. Численное исследование процессов переноса и трансформации газовых и аэрозольных примесей в шлейфе выбросов Норильского промышленного района / В.Ф. Рапута, Д.В. Симоненков, Б.Д. Белан, Т.В. Ярославцева // *Оптика атмосферы и океана*. – 2018. – Т. 31. – № 6. – С. 438–442.
32. Загрязнение снежного покрова в зоне воздействия предприятий Норильского промышленного района / А.А. Онучин, Т.А. Буренина, О.Н. Зубарева, О.В. Трефилова, И.В. Данилова // *Сибирский экологический журнал*. – 2014. – № 6. – С. 1025–1037.
33. Телятников М.Ю., Пристяжнюк С.А. Антропогенное влияние предприятий Норильского промышленного района на растительный покров тундры и лесотундры // *Сибирский экологический журнал*. – 2014. – № 6. – С. 903–922.
34. Long-term changes of heavy metal and sulphur concentrations in ecosystems of the Taymyr Peninsula (Russian Federation) North of the Norilsk Industrial Complex / A.V. Zhulidov, R.D. Robarts, D.F. Pavlov, J. Kämäri, T.Y. Gurtovaya, J.J. Meriläinen, I.N. Pospelov // *Environmental Monitoring and Assessment*. – 2011. – V. 181. – № 1–4. – P. 539–553.
35. Виноградова А.А., Максименков Л.О., Погарский Ф.А. Изменения атмосферной циркуляции и загрязнения окружающей среды в Сибири от промышленных районов Норильска и Урала в начале XXI в. // *Оптика атмосферы и океана*. – 2009. – Т. 22. – № 6. – С. 527–234.
36. Concentrations of Cd, Pb, Zn and Cu in pristine wetlands of the Russian Arctic / A.V. Zhulidov, J.V. Headley, R.D. Robarts, A.M. Nikanorov, A.A. Ischenko, M.A. Champ // *Marine Pollution Bulletin*. – 1997. – V. 35. – № 7–12. – P. 242–251.
37. Concentrations of Cd, Pb, Zn and Cu in contaminated wetlands of the Russian Arctic / A.V. Zhulidov, J.V. Headley, R.D. Robarts, A.M. Nikanorov, A.A. Ischenko, M.A. Champ // *Marine Pollution Bulletin*. – 1997. – V. 35. – № 7. – P. 252–259.
38. Гурский Ю.Н. Выявление и оценка уровня антропогенных загрязнений на основе геохимического изучения иловых вод морских и пресноводных отложений // *Вестник Московского университета. Серия 4. Геология*. – 2017. – № 5. – С. 49–58.
39. Захаров А.И., Захарова Л.Н., Митник Л.М. Мониторинг стабильности топливных резервуаров Норильской ТЭЦ-3 методами радарной интерферометрии // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. – 2020. – Т. 17. – № 5. – С. 281–285.
40. Якуцени С.П., Соловьев И.А. Расчет ущерба окружающей среде в результате аварии на складе ГСМ в Норильске // *Географическая среда и живые системы*. – 2020. – № 4. – С. 48–56.
41. Наблюдение загрязнений реки Амбарной, возникших в результате аварии на ТЭЦ-3 города Норильска 29 мая 2020 г. / К.А. Трошко, П.В. Денисов, О.Ю. Лаврова, Е.А. Лупян, А.А. Медведев // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. – 2020. – Т. 17. – № 3. – С. 267–274.
42. Леженин А.А., Рапута В.Ф., Ярославцева Т.В. Численный анализ атмосферной циркуляции и распространения загрязняющих примесей в окрестностях Норильского промышленного района // *Оптика атмосферы и океана*. – 2016. – Т. 29. – № 6. – С. 467–471.
43. Zaslavskaya M.B., Erina O.N., Efimova L.E. Comparing the efficiency of river water quality parameterization by different methods under a significant human-induced impact // *Geography and Natural Resources*. – 2019. – V. 40. – № 2. – P. 122–128.
44. Носова О.В., Галишевская В.В., Кармановская Н.В. Мониторинг вод открытых водоемов Норильского промышленного района // *Культура. Наука. Производство*. – 2020. – № 5. – С. 80–85.
45. Преимущества и недостатки нефтяных сорбентов для ликвидации разливов на акватории в условиях низких температур / Е.А. Мазлова, И.А. Мерициди, Я.Ю. Блиновская, К.К. Размахин, О.А. Куликова // *Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе*. – 2020. – № 6. – С. 55–60.
46. Некоторые особенности распределения тяжелых металлов в поверхностном слое донных осадков Карского моря / В.Ю. Русаков, Т.Г. Кузьмина, М.А. Левитан, Е.С. Торопченко, А.В. Жилкина // *Геохимия*. – 2017. – № 12. – С. 1088–1099.
47. Ji X., Abakumov E., Xie X. Atmosphere-ocean exchange of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in the Russian Arctic Ocean // *Atmospheric Chemistry and Physics*. – 2019. – V. 19. – № 22. – P. 13789–13807.
48. Виноградова А.А., Котова Е.И. Загрязнение северных морей России тяжелыми металлами: поток из атмосферы и речной стока // *Геофизические процессы и биосфера*. – 2019. – Т. 18. – № 1. – С. 22–32.
49. Agbalyan E., Krasnenko A., Shinkaruk E. Concentration of heavy metals and metalloids in the bottom sediments of the Vilkitsky

- Island's lakes (the Kara Sea) // Actual Problems of Ecology and Environmental Management: Cooperation for Sustainable Development and Environmental Safety (APEEM 2020). – Moscow, Russia, April 23–24, 2020. E3S Web of Conferences. – 2020. – V. 169. – P. 1–6.
50. Эколого-функциональная оценка состояния почв в зоне аэротехногенного воздействия Норильского промышленного комплекса / Т.В. Пономарева, О.В. Трефилова, А.В. Богородская, О.А. Шапченкова // Сибирский экологический журнал. – 2014. – № 6. – С. 987–996.
51. Загрязнение почв выбросами предприятий цветной металлургии / Ю.Н. Водяницкий, И.О. Плеханова, Е.В. Прокопович, А.Т. Савичев // Почвоведение. – 2011. – № 2. – С. 240–249.
52. Ефремова Т.Т., Ефремов С.П. Эколого-геохимическая оценка уровней загрязнения тяжелыми металлами и серой бугристых торфяников юга Таймыра // Сибирский экологический журнал. – 2014. – № 6. – 965–974.
53. Kharuk V.I., Nilsson S., Samarskaia E. Anthropogenic and technogenic stress factors to forests in Siberia // IASA Working Paper WP-96-104. – Laxenburg, Austria, 1996. – 104 p.
54. Automated systems of ecological control in Norilsk / N.V. Karmanovskaya, A.T. Smirnova, V.I. Litovchenko, S.G. Efa // 2nd International Scientific Conference on Advanced Technologies in Aerospace, Mechanical and Automation Engineering (MIST: Aerospace 2019). IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – Krasnoyarsk, 18–21 November, 2021. – V. 734. – P. 1–4.
55. Кармановская Н.В., Базелянская Т.П. Исследование экологического состояния водных объектов и почв на промышленных арктических территориях // Культура. Наука. Производство. – 2020. – № 6. – С. 74–78.
56. Forest disturbance assessment using satellite data of moderate and low resolution / M.A. Korets, V.A. Ryzhkova, I.V. Danilova, A.I. Sukhinin, S.A. Bartalev // Environmental Change in Siberia. Advances in Global Change Research. – Dordrecht: Springer, 2010. – P. 3–19.
57. Корец М.А., Рыжкова В.А., Данилова И.В. Использование ГИС для оценки состояния наземных экосистем Норильского промышленного района // Сибирский экологический журнал. – 2014. – № 6. – 887–902.
58. IASI observations of sulfur dioxide (SO₂) in the boundary layer of Norilsk / S. Bauduin, L. Clarisse, C. Clerbaux, D. Hurtmans, P.-F. Coheur // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. – 2014. – V. 119. – № 7. – P. 253–263.
59. Environmental risk zones mapping using satellite monitoring data / A. Zotin, D. Zuev, V. Kashkin, M. Kurako, K. Simonov // Procedia Computer Science. – 2018. – V. 126. – P. 1597–1605.
60. Анализ содержания CO₂ вблизи российских городов по спутниковым измерениям ОСО-2 / А.А. Никитенко, Ю.М. Тимофеев, И.А. Березин, Я.А. Виролайн, А.В. Поляков // Оптика атмосферы и океана. – 2020. – Т. 33. – № 7. – С. 538–543
61. Шевчук А.В. Эколого-экономические аспекты развития Арктики // Научные труды Вольного экономического общества России. – 2020. – Т. 226. – № 6. – С. 146–162.
62. Рудакова Л.В., Рудаков Р.Б. Обоснование особого подхода к правовому регулированию возмещения экономического ущерба от экологических нарушений в Арктических районах // Экологическая безопасность промышленных регионов: III Уральский международный экологический конгресс. – Екатеринбург, 25–31 мая 2015. – Екатеринбург: СОУ-МАНЭБ, ИЭ УрО РАН, УГТУ, 2015. – С. 252–256.
63. Леонтьев Л.И., Тарасов А.В. Экологические проблемы «Норильского никеля» и возможные пути их решения. Ч. 3. Сера и ее применение // Экология и промышленность России. – 2017. – Т. 21. – № 5. – С. 11–15.
64. Леонтьев Л.И., Тарасов А.В. Экологические проблемы «Норильского никеля» и возможные пути их решения. Ч. 2. Применение и утилизация диоксида серы // Экология и промышленность России. – 2017. – Т. 21. – № 4. – С. 20–25.
65. Коптев Д.П. Норильский разлив: уроки и последствия // Бурение и нефть. – 2020. – № 7–8. – С. 3–9.
66. Кармановская Н.В. Производственный и общественный экологический контроль в Норильске // Экология урбанизированных территорий. – 2020. – № 2. – С. 94–99.
67. Tsukerman V.A., Ivanov S.V. Management of the industrial waste when exploiting mineral resources of the Arctic // 17th International Symposium on Solid Oxide Fuel Cells (SOFC-XVII) IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 18–23 July, 2020. – V. 459 – P. 1–5.
68. Экологические проблемы Арктики. – 2021. URL: <https://arctic.narfu.ru/spisok-literatury/ekologiya/ekologicheskie-problemy-arktiki> (дата обращения: 22.05.2021).
69. Activation-655 – Oil spill in Russia. – 2021. URL: <https://cgt.disasterscharter.org/en/655> (дата обращения: 22.05.2021).
70. Харитонов Г.Н. Финансовые механизмы и организационные модели ликвидации накопленного экологического ущерба в районах Крайнего Севера // Проблемы рационального использования природного и техногенного сырья Баренц-региона в технологии строительных и технических материалов: 5-я Всероссийская научная конференция с международным участием. – Апатиты, 12–15 ноября 2013. – С. 190–195.

Поступила 25.05.2021 г.

Информация об авторах

Юркевич Н.В., кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории эколого-экономического моделирования техногенных систем, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

Ельцов И.Н., доктор технических наук, профессор, директор Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

Гуреев В.Н., кандидат педагогических наук, старший научный сотрудник информационно-аналитического центра, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН; доцент, Новосибирский государственный технический университет.

Мазов Н.А., кандидат технических наук, заведующий информационно-аналитическим центром, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

Юркевич Н.В., кандидат геолого-минералогических наук, заведующая лабораторией эколого-экономического моделирования техногенных систем, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

Еделев А.В., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории эколого-экономического моделирования техногенных систем, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

UDC 574(1-925.121)

TECHNOGENIC EFFECT ON THE ENVIRONMENT IN THE RUSSIAN ARCTIC BY THE EXAMPLE OF THE NORILSK INDUSTRIAL AREA

Nikolay V. Yurkevich¹,
YurkevichNV2@ipgg.sbras.ru

Igor N. Eltsov¹,
YeltsovIN@ipgg.sbras.ru

Vadim N. Gureev^{1,2},
GureyevVN@ipgg.sbras.ru

Nikolay A. Mazov¹,
MazovNA@ipgg.sbras.ru

Nataliya V. Yurkevich¹,
YurkevichNV@ipgg.sbras.ru

Aleksey V. Edelev¹,
EdelevAV@ipgg.sbras.ru

¹ Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, SB RAS,
3, Koptuyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

² Novosibirsk State Technical University,
136, Nemirovich-Danchenko street, Novosibirsk, 630087, Russia.

The relevance of the study is caused by the increased necessity to solve ecological issues in Russian Arctic regions considering their importance for the development of the country. The task complexity lies both in the presence of cumulative environmental damage and the topicality to elaborate sustainable approaches to natural resource development in the near future.

The main aim is to analyze the condition of the ecosystem and its separate components in the Norilsk industrial area as one of the significant resource territories in the Russian Arctic. Special attention is paid to techniques of monitoring the environment and official documents regulating ecology that require the elimination of acute contradictions and legislative vacuum.

Methods of the research include analyses of research papers published in Russian and foreign sources in the last decade on environmental challenges in the Russian Arctic and especially in the Norilsk industrial area. Various bibliographic systems including the Russian Science Citation Index, Scopus, and «Environment protection» abstract service by VINITI were used.

Results. Unique characteristics of Arctic regions were revealed that require both non-traditional technological concepts when conducting an industrial activity, and special approaches when regulating and controlling ecological state. The example of the Norilsk industrial area was used to demonstrate improvements in ecological aspects of industrial activity of mining and smelting enterprise even despite the incident with a fuel spill in 2020. However, the attempted measures are still insufficient to regard the current ecological situation as satisfactory. The problems of neutralization of cumulative environmental damage have awaited solutions. The efficiency of planned measures for improvement of the state of the environment essentially depends on changes in legal acts poorly considering specific features of Arctic territories, as well as on closer collaboration of industrial enterprises both with the scientific community and local residents.

Key words:

Norilsk industrial area, Arctic, ecology, cumulative environmental damage, monitoring.

The research was financially supported by the Fundamental Research program (project no. 0266-2019-0008).

REFERENCES

1. Burtseva E.I., Petrova A.N. Environmental problems of the Northern Yakutia in the industrial development and global warming. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 2017, no. 5, pp. 83–88. In Rus.
2. Kirdeyanov A.V., Krusic P.J., Shishov V.V., Vaganov E.A., Fertikov A.I., Myglan V.S., Barinov V.V., Browse J., Esper J., Ilyin V.A., Knorre A.A., Korets M.A., Kukarskikh V.V., Mashukov D.A., Onuchin A.A., Piermattei A., Pimenov A.V., Prokushkin A.S., Ryzhkova V.A., Shishikin A.S., Smith K.T., Taynik A.V., Wild M., Zorita E., Büntgen U. Ecological and conceptual consequences of Arctic pollution. *Ecology Letters*, 2020, vol. 23, no. 12, pp. 1827–1837.
3. Pilyasov A.N., Bogodukhov A.O. Arctic corporation: approaches to a new theory (P. 1). *EKO*, 2021, no. 1, pp. 40–66. In Rus.
4. Laukhin S.A. About some problems in the accumulated ecological damage due to the extraction of raw materials in the Russian Arctics (by the example of the Russian East). *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya*, 2020, no. 1, pp. 76–81. In Rus.
5. Sokolov Yu.I. Arktika: k probleme nakoplennoy ekologicheskoy ushcherby [Arctic: problem of the accumulated environmental damage]. *Arktika: ekologiya i ekonomika*, 2013, no. 2, pp. 18–27.
6. Letuchiy Yu.A. Otsenivanie ekologicheskoy ushcherby ot deyatelnosti Vooruzhennykh sil v Arkticheskom regione [Evaluation of ecological damage from armed forces activity in the Arctic region]. *Trudy voenno-kosmicheskoy akademii imeni A.F. Mozhayskogo*, 2015, no. 649, pp. 175–180.
7. Tsukerman V.A., Ivanov S.V. Environmental policy of resource corporations in commercial mineral production in the Arctic Zone

- of Russia. *Gorny informatsionno-analiticheskiy byulleten*, 2020, no. 10, pp. 56–66. In Rus.
8. Kirryanov A.V., Myglan V.S., Pimenov A.V., Knorre A.A., Ekart A.K., Vaganov E.A. Die-off dynamics of Siberian larch under the impact of pollutants emitted by Norilsk enterprises. *Contemporary Problems of Ecology*, 2014, vol. 7, no. 6, pp. 679–684.
 9. Bogorodskaya A.V., Ponomareva T.V., Shapchenkova O.A., Shishikin A.S. Assessment of the state of soil microbial cenoses in the forest-tundra zone under conditions of airborne industrial pollution. *Eurasian Soil Science*, 2012, vol. 45, no. 5, pp. 521–531.
 10. Vedrova E.F., Mukhortova L.V. Biogeochemical evaluation of forest ecosystems in the area affected by Norilsk industrial complex. *Contemporary Problems of Ecology*, 2014, vol. 7, no. 6, pp. 669–678.
 11. Chashchin M.V., Barnes E., Daer R.S., Zakharova N.V., Ruchina I.L., Zibarev E.V., Kuz'min A.V., Korbukova K.V., Abyrutina L.I. Assessment of resistant toxic substances importance in accumulated environmental damage for Arctic region. *Ekologiya cheloveka*, 2009, no. 2, pp. 8–12. In Rus.
 12. Moiseenko T.I., Dinu M.I., Gashkina N.A., Kremleva T.A., Khoroshavin V.Y. Geochemical features of elements distributions in the lake waters of the Arctic region. *Geochemistry International*, 2020, vol. 58, no. 6, pp. 613–623.
 13. Sazonov A.D., Komarov R.S., Peredera O.S. Oil product spill in Norilsk May 29, 2020: alleged reasons and possible environmental impact. *Ekologiya. Ekonomika. Informatika. Seriya: Sistemnyy analiz i modelirovaniye ekonomicheskikh i ekologicheskikh sistem*, 2020, vol. 1, no. 5, pp. 173–177. In Rus.
 14. Tereshchenko S.V., Marchevskaya V.V., Pavlishina D.N. Ways to reduce negative environmental impact of mining industry. *Vestnik Kolskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2016, no. 4, pp. 62–66. In Rus.
 15. Shchelkunova R.P. The effect of industry and transport on reindeer pastures: the example of Taymyr. *Polar Geography and Geology*, 1993, vol. 17, no. 4, pp. 251–258.
 16. Kolesnikov R.A., Makeev V.M., Romanova E.N., Sturman V.I., Zhurkina K.A. The investigation of the objects of the past environmental damage on the Vilkitsky Island (Kara sea). *Inzhenernye izyskaniya*, 2018, pp. 12, no. 5–6, pp. 32–41. In Rus.
 17. Pavlenko V.I., Muangu Zh., Korobov V.B., Lokhov A.S. Aktualnye problemy predotvrashcheniya, likvidatsii razlivov nefli v Arktike i metody otsenki ekologicheskogo uscherba pribrezhnym territoriyam [Actual problems of the prevention and elimination of oil spills in Arctic and methods of evaluation of ecological damage in coastal territories]. *Arktika: ekologiya i ekonomika*, 2015, no. 3, pp. 4–11.
 18. Shi T., Reeves R.H., Gilichinsky D.A., Friedmann E.I. Characterization of Viable Bacteria from Siberian Permafrost by 16S rDNA Sequencing. *Microbial Ecology*, 1997, vol. 33, no. 3, pp. 169–179.
 19. Crisafi F., Giuliano L., Yakimov M.M., Azzaro M., Denaro R. Isolation and degradation potential of a cold-adapted oil/PAH-degrading marine bacterial consortium from Kongsfjorden (Arctic region). *Rendiconti Lincei-Scienze Fisiche E Naturali*, 2016, vol. 27, pp. 261–270.
 20. Korshunova T.Y., Chetverikov S.P., Bakaeva M.D., Kuzina E.V., Rafikova G.F., Chetverikova D.V., Loginov O.N. Microorganisms in the Elimination of Oil Pollution Consequences (Review). *Applied Biochemistry and Microbiology*, 2019, vol. 55, no. 4, pp. 344–354.
 21. Solovyanov A.A. Ekologicheskie problemy Arkticheskoy zony Rossiyskoy Federatsii: sostoyaniye i puti resheniya [Ecological problems in Arctic zones of Russian Federation: current condition and ways of solution]. *Okrana atmosfernogo vozdukha. Atmosfera*, 2011, no. 2, pp. 21–30.
 22. Val'dman N.A., Viktorov S.V., Ilyukhin V.N., Ozerova L.L. Environmental impact of sunken ships upon Russian coastal waters and shorelands. *Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra*, 2019, no. 4, pp. 231–244. In Rus.
 23. Lozhkina O.V., Onishchenko I.A. Analiz opasnogo zagryazneniya atmosfernogo vozdukha krupnykh gorodov arkticheskoy zony otrabotavshimi gazami transportnykh sredstv [Analysis of dangerous air pollution of big cities in the arctic zone by vehicle exhaust emissions]. *Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere*, 2020, no. 3, pp. 20–26.
 24. Loiko S., Klimova N., Kuzmina D., Pokrovsky O. Lake drainage in permafrost regions produces variable plant communities of high biomass and productivity. *Plants*, 2020, vol. 9, no. 7, pp. 1–42.
 25. Pokrovsky O.S., Manasyrov R.M., Kopysov S.G., Krickov I.V., Shirokova L.S., Loiko S.V., Lim A.G., Kolesnichenko L.G., Vorobyev S.N., Kirpotin S.N. Impact of permafrost thaw and climate warming on riverine export fluxes of carbon, nutrients and metals in Western Siberia. *Water (Switzerland)*, 2020, vol. 12, no. 6, pp. 1–21.
 26. Yurkevich N.V., Yurkevich N.V., Gureev V.N., Mazov N.A. Problems of controlling water filtration in hydraulic structures in permafrost regions. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 4, pp. 126–138. In Rus.
 27. Pilyasov A.N., Bogodukhov A.O. Arctic corporation: approaches to a new theory (P. 2). *EKO*, 2021, no. 2, pp. 62–84. In Rus.
 28. Bazhenov O., Oykhner A. Strategic analysis of environmental and economic potential of Norilsk metallurgical cluster. *International Conference on Efficient Production and Processing (ICEPP-2020). E3S Web of Conferences*. Prague, Czech Republic, February 27–28, 2020. Vol. 161, pp. 1–6.
 29. Leont'ev L.I., Tarasov A.V. Environmental challenges of «Norilsk Nickel» and their possible solutions. *Ekologiya i promyshlennost Rossii*, 2017, vol. 21, no. 2, pp. 15–19. In Rus.
 30. Nemirovskaya I.A., Shevchenko V.P. Organic compounds and suspended particulate matter in snow of high latitude areas (Arctic and Antarctic). *Atmosphere*, 2020, vol. 11, no. 9, pp. 1–23.
 31. Raputa V.F., Simonenkov D.V., Belan B.D., Yaroslavtseva T.V. Numerical study of gas and aerosol impurity transfer and transformation processes in the plume of the Norilsk industrial region. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2018, vol. 31, no. 5, pp. 466–470.
 32. Onuchin A.A., Burenina T.A., Zubareva O.N., Trefilova O.V., Danilova I.V. Pollution of snow cover in the impact zone of enterprises in Norilsk Industrial Area. *Contemporary Problems of Ecology*, 2014, vol. 7, no. 6, pp. 714–722.
 33. Telyatnikov M.Y., Prstyazhnyuk S.A. Anthropogenous influence of Norilsk industrial area on plant vegetation cover of the tundra and forest tundra. *Contemporary Problems of Ecology*, 2014, vol. 7, no. 6, pp. 654–668.
 34. Zhulidov A.V., Robarts R.D., Pavlov D.F., Kämäri J., Gurtovaya T.Y., Meriläinen J.J., Pospelov I.N. Long-term changes of heavy metal and sulphur stability in ecosystems of the Taymyr Peninsula (Russian Federation) North of the Norilsk Industrial Complex. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2011, vol. 181, no. 1–4, pp. 539–553.
 35. Vinogradova A.A., Maksimenkov L.O., Pogarskii F.A. Changes in the atmospheric circulation and environmental pollution in Siberia from the industrial regions of Norilsk and the Urals in the early 21st century. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2009, vol. 22, no. 4, pp. 396–404.
 36. Zhulidov A.V., Headley J.V., Robarts R.D., Nikanorov A.M., Ischenko A.A., Champ M.A. Concentrations of Cd, Pb, Zn and Cu in pristine wetlands of the Russian Arctic. *Marine Pollution Bulletin*, 1997, vol. 35, no. 7–12, pp. 242–251.
 37. Zhulidov A.V., Headley J.V., Robarts R.D., Nikanorov A.M., Ischenko A.A., Champ M.A. Concentrations of Cd, Pb, Zn and Cu in contaminated wetlands of the Russian Arctic. *Marine Pollution Bulletin*, 1997, vol. 35, no. 7, pp. 252–259.
 38. Gursky Y.N. Detection and evaluation of anthropogenic pollution on the basis of geochemical study of the interstitial waters of marine and freshwater sediments. *Moscow University Geology Bulletin*, 2017, vol. 72, no. 6, pp. 424–435.
 39. Zakharov A.I., Zakharova L.N., Mitnik L.M. Monitoring of the Norilsk TPP-3 fuel tanks stability by means of radar interferometry techniq. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, vol. 17, no. 5, pp. 281–285. In Rus.
 40. Yakutseni S.P., Solov'ev I.A. Calculation of environmental damage as a result of an accident at a fuel depot in Norilsk. *Geograficheskaya sreda i zhivye sistemy*, 2020, no. 4, pp. 48–56. In Rus.
 41. Troshko K.A., Denisov P.V., Lavrova O.Yu., Lupyan E.A., Medvedev A.A. Observation of the Ambarnaya River pollution resulting from the accident at the Norilsk Thermal Power Plant no.

- 3 on May 29, 2020. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, vol. 17, no. 3, pp. 267–274. In Rus.
42. Lezhenin A.A., Raputa V.F., Yaroslavtseva T.V. Numerical analysis of atmospheric circulation and pollution transfer in the environs of Norilsk industrial region. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2016, vol. 29, no. 6, pp. 565–569.
 43. Zaslavskaya M.B., Erina O.N., Efimova L.E. Comparing the efficiency of river water quality parameterization by different methods under a significant human-induced impact. *Geography and Natural Resources*, 2019, vol. 40, no. 2, pp. 122–128.
 44. Nosova O.V., Galishevskaya V.V., Karmanovskaya N.V. Monitoring vod otkrytykh vodoemov Noril'skogo promyshlennogo rayona [Monitoring open water waters of the Norilsk industrial area]. *Kultura. Nauka. Proizvodstvo*, 2020, no. 5, pp. 80–85.
 45. Mazlova E.A., Meritsidi I.A., Blinovskaya Ya.Yu., Razmakhnin K.K., Kulikova O.A. Advantages and disadvantages of oil sorbents for oil spill response at low temperatures. *Zashchita okruzhayushchey sredy v neftegazovom komplekse*, 2020, no. 6, pp. 55–60. In Rus.
 46. Rusakov V.Y., Kuzmina T.G., Levitan M.A., Toropchenova E.S., Zhilkina A.V. Heavy metal distribution in the surface layer of bottom sediments of the Kara Sea. *Geochemistry International*, 2017, vol. 55, no. 12, pp. 1079–1089.
 47. Ji X., Abakumov E., Xie X. Atmosphere-ocean exchange of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in the Russian Arctic Ocean. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, vol. 19, no. 22, pp. 13789–13807.
 48. Vinogradova A.A., Kotova E.I. Pollution of Russian Northern Seas with Heavy Metals: Comparison of Atmospheric Flux and River Flow. *Izvestiya – Atmospheric and Ocean Physics*, 2019, vol. 55, no. 7, pp. 695–704.
 49. Agbalyan E., Krasnenko A., Shinkaruk E. Concentration of heavy metals and metalloids in the bottom sediments of the Vilkitsky Island's lakes (the Kara Sea). *Actual Problems of Ecology and Environmental Management: Cooperation for Sustainable Development and Environmental Safety (APEEM 2020). E3S Web of Conferences*. Moscow, Russia, April 23–24, 2020. Vol. 169, pp. 1–6.
 50. Ponomareva T.V., Trefilova O.V., Bogorodskaya A.V., Shapchenkova O.A. Ecological and functional estimation of soil condition within the zone of technogenic impact of Norilsk industrial complex. *Contemporary Problems of Ecology*, 2014, vol. 7, no. 6, pp. 694–700.
 51. Vodyanitskii Y.N., Plekhanova I.O., Prokopovich E.V., Savichev A.T. Soil contamination with emissions of non-ferrous metallurgical plants. *Eurasian Soil Science*, 2011, vol. 44, no. 2, pp. 217–226.
 52. Efremova T.T., Efremov S.P. Ecological and geochemical assessment of heavy-metal and sulfur pollution levels in hilly peatbogs of southern Taimyr. *Contemporary Problems of Ecology*, 2014, vol. 7, no. 6, pp. 685–693.
 53. Kharuk V.I., Nilsson S., Samarskaia E. Anthropogenic and technogenic stress factors to forests in Siberia. *IASA Working Paper WP-96-104*. Laxenburg, Austria, 1996. 104 p.
 54. Karmanovskaya N.V., Smirnova A.T., Litovchenko V.I., Efa S.G. Automated systems of ecological control in Norilsk. *2nd International Scientific Conference on Advanced Technologies in Aerospace, Mechanical and Automation Engineering (MIST: Aerospace 2019. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Krasnoyarsk, 18–21 November, 2021. Vol. 734, pp. 1–4.
 55. Karmanovskaya N.V., Bazelyanskaya T.P. Research of the ecological state of water bodies and soils in the industrial Arctic territories. *Kultura. Nauka. Proizvodstvo*, 2020, no. 6, pp. 74–78. In Rus.
 56. Korets M.A., Ryzhkova V.A., Danilova I.V., Sukhinin A.I., Bartalev S.A. Forest disturbance assessment using satellite data of moderate and low resolution. In: *Environmental Change in Siberia. Advances in Global Change Research*. Dordrecht, Springer, 2010. pp. 3–19.
 57. Korets M.A., Ryzhkova V.A., Danilova I.V. GIS-based approaches to the assessment of the state of terrestrial ecosystems in the Norilsk Industrial Region. *Contemporary Problems of Ecology*, 2014, vol. 7, no. 6, pp. 643–653.
 58. Bauduin S., Clarisse L., Clerbaux C., Hurtmans D., Coheur P.-F. IASI observations of sulfur dioxide (SO₂) in the boundary layer of Norilsk. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2014, vol. 119, no. 7, pp. 253–263.
 59. Zotin A., Zuev D., Kashkin V., Kurako M., Simonov K. Environmental risk zones mapping using satellite monitoring data. *Procedia Computer Science*, 2018, vol. 126, pp. 1597–1605.
 60. Nikitenko A.A., Timofeev Y.M., Berezin I.A., Poberovskii A.V., Virolainen Y.A., Polyakov A.V. The analysis of OCO-2 satellite measurements of CO₂ in the vicinity of Russian cities. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2020, vol. 33, no. 6, pp. 650–655.
 61. Shevchuk A.V. Ecological and economic aspects of Arctic development. *Nauchnye trudy Volnogo ekonomicheskogo obshchestva Rossii*, 2020, vol. 226, no. 6, pp. 146–162. In Rus.
 62. Rudakova L.V., Rudakov R.B. Obosnovanie osobogo podkhoda k pravovomu regulirovaniyu vozmeshcheniya ekonomicheskogo ushcherba ot ekologicheskikh narusheniy v Arkticheskikh rayonakh [Validation of especial approach to legal regulations of compensation of economic damage from ecological disturbance in Arctic regions]. *III Uralskiy mezhdunarodny ekologicheskii kongress. Ekologicheskaya bezopasnost promyshlennykh regionov [III Ural international ecological congress. Environmental safety of industrial regions]*. Ekaterinburg, 25–31 May 2015. Ekaterinburg, SOO – MANEB, IE UrO RAN, UGGU Publ., 2015. pp. 252–256.
 63. Leontev L.I., Tarasov A.V. Ecological problems of «Norilsk Nickel» and possible solutions. P. 3. Sulfur and its use. *Ekologiya i promyshlennost Rossii*, 2017, vol. 21, no. 5, pp. 11–15. In Rus.
 64. Leontev L.I., Tarasov A.V. Environmental issues of «Norilsk Nickel» and possible solutions. P. 2. Use and recovery of sulfur dioxide. *Ekologiya i promyshlennost Rossii*, 2017, vol. 21, no. 4, pp. 20–25. In Rus.
 65. Koptev D.P. Norilsk spill: lessons and consequences. *Burenie i neft*, 2020, no. 7–8, pp. 3–9. In Rus.
 66. Karmanovskaya N.V. Industrial and public environmental control in Norilsk. *Ekologiya urbanizirovannykh territoriy*, 2020, no. 2, pp. 94–99. In Rus.
 67. Tsukerman V.A., Ivanov S.V. Management of the industrial waste when exploiting mineral resources of the Arctic. *17th International Symposium on Solid Oxide Fuel Cells (SOFC-XVII). IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 18–23 July, 2020. Vol. 459, pp. 1–5.
 68. *Ekologicheskie problemy Arktiki* [Ecological problems in Arctic]. 2021. Available at: <https://arctic.narfu.ru/spisok-literatury/ekologiya/ekologicheskie-problemy-arktiki> (accessed: 22 May 2021).
 69. *Activation-655 – oil spill in Russia*. 2021. Available at: <https://cgt.disasterscharter.org/en/655> (accessed: 22 May 2021).
 70. Kharitonova G.N. Finansovye mekhanizmy i organizatsionnye modeli likvidatsii nakoplenno ekologicheskogo ushcherba v rayonakh Kraynego Severa [Financial mechanisms and organizational models for eliminating cumulative ecological damage in Far North regions]. *5-ya Vserossiyskaya nauchnaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiem. Problemy ratsionalnogo ispolzovaniya prirodno i tekhnogenno syrya Barents-regiona v tekhnologii stroitelnykh i tekhnicheskikh materialov* [5th All-Russian scientific conference with international participation. Problems of rational use of natural and technogenic raw materials of Barents Region in technology of building and technical materials]. Apatity, 12–15 November 2013. pp. 190–195.

Received: 25 May 2021.

Information about the authors

Nikolay V. Yurkevich, Cand. Sc., senior researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, SB RAS.

Igor N. Eltsov, Dr. Sc., professor, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, SB RAS.

Vadim N. Gureev, Cand. Sc., senior researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, SB RAS; assistant professor, Novosibirsk State Technical University.

Nikolay A. Mazov, Cand. Sc., head of the information analytical center, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, SB RAS.

Nataliya V. Yurkevich, Cand. Sc., head of the laboratory, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, SB RAS.

Aleksey V. Edelev, Cand. Sc., senior researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, SB RAS.

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

Дата выхода 30.12.2021. Формат 60x84/8. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл. печ. л. 29,08. Уч.-изд. л. 26,3.
Заказ 250-21. Тираж 500 экз. Цена 1020 руб.



Издательство

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Адрес учредителя, редакции, издателя, типографии:
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.