



ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

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

ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ

Том 331, № 7, 2020

Издательство
Томского политехнического университета
2020

**ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА.
ИНЖИНИРИНГ ГЕОРСУРСОВ**

Редакционная коллегия

Семилетов И.П., гл. редактор, д-р геогр. наук (Россия)
Рихванов Л.П., д-р геол.-минерал. наук (Россия)
Оствальд Р.В., канд. хим. наук (Россия)
Савичев О.Г., д-р геогр. наук (Россия)
Покровский О.С., канд. геол.-минерал. наук (Франция)
Старostenko B.I., д-р физ.-мат. наук (Украина)
Конторович А.Э., д-р геол.-минерал. наук (Россия)
Белозеров В.Б., д-р геол.-минерал. наук (Россия)
Никитенков Н.Н., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Силкин В.М., д-р физ.-мат. наук (Испания)
Коротеев Ю.М., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Уленеков О.Н., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Борисов А.М., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Коршунов А.В., д-р хим. наук (Россия)
Пестряков А.Н., д-р хим. наук (Россия)
Тойпель У., Dsc (Германия)
Джин-Чун Ким, Dsc (Южная Корея)
Ильин А.П., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Заворин А.С., д-р техн. наук (Россия)
Ханьялич К., Dsc (Нидерланды)
Маркович Д.М., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Алексеенко С.В., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Воропай Н.И., д-р техн. наук (Россия)
Кочегуров А.И., канд. техн. наук (Россия)
Руи Д., PhD (Португалия)
Зиатдинов Р.А., канд. физ.-мат. наук (Южная Корея)
Спицын В.Г., д-р техн. наук (Россия)
Муравьев С.В., д-р техн. наук (Россия)
Пойлов В.З., д-р техн. наук (Россия)
Лотов В.А., д-р техн. наук (Россия)
Софронов В.Л., д-р хим. наук (Россия)
Бузник В.М., д-р хим. наук (Россия)
Захаров Ю.А., д-р хим. наук (Россия)
Антипенко В.Р., д-р хим. наук (Россия)
Голик В.И., д-р техн. наук (Россия)
Абуталипова Е.М., д-р техн. наук (Россия)
Полищук В.И., д-р техн. наук (Россия)
Хамитов Р.Н., д-р техн. наук (Россия)
Зюзев А.М., д-р техн. наук (Россия)
Кирьянова Л.Г., канд. филос. наук (Россия)
Глазырин А.С., выпуск. редактор, д-р техн. наук (Россия)

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

Подписной индекс в объединённом каталоге «Пресса России» – 18054

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

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

Учредителем является Томский политехнический университет.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Окончательное решение по публикации статьи принимает главный редактор журнала.

Все материалы размещаются в журнале на бесплатной основе.

Журнал издается ежемесячно.

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



**TOMSK
POLYTECHNIC
UNIVERSITY**

ISSN (print) – 2500_1019
ISSN (on_line) – 2413_1830

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

Volume 331, № 7, 2020

Tomsk Polytechnic University Publishing House
2020

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

Editorial Board

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

AIMS AND SCOPES

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

The journal was founded in 1903.

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

ISSN (print) – 2500-1019

ISSN (on-line) – 2413-1830

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

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

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

- Geo Assets exploration and refining;
- Geo Assets mining 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

| | | |
|---|-----|--|
| Сезонная динамика химического состава вод овражно-балочных систем городских территорий (на примере Саратова) Шешнёв А.С. | 7 | Seasonal dynamics of chemical composition of waters from gully systems in urban areas (by the example of Saratov) Sheshnev A.S. |
| Эффективность проветривания тупиковых подготовительных выработок после взрывных работ Колесов Е.В., Казаков Б.П. | 15 | Efficiency of ventilation of dead-end development headings after blasting operations Kolesov E.V., Kazakov B.P. |
| Аутигенные минералы в донных осадках сиповых областей моря Лаптевых Рубан А.С., Рудмин М.А., Гершелис Е.В., Леонов А.А., Мазуров А.К., Дударев О.В., Семилетов И.П. | 24 | Authigenic minerals in the bottom sediments from seeps of the Laptev Sea Ruban A.S., Rudmin M.A., Gershelis E.V., Leonov A.A., Mazurov A.K., Dudarev O.V., Semiletov I.P. |
| Оценка технологической и экономической эффективности гидравлического разрыва пласта с использованием геолого-гидродинамической модели, учитывающая особенности строения карбонатных коллекторов Менгалиев А.Г., Мартюшев Д.А. | 37 | Assessment of technological and economic efficiency of fracturing formations using geological and hydrodynamic models, considering features of carbonate reservoir structure Mengaliev A.G., Martyushev D.A. |
| Минералогия, geoхимия и генезис редкometалльного Zr-Nb-Hf-Ta-РЗЭ-Ga оруденения в пласте XXX Минусинского бассейна Вергунов А.В., Арбузов С.И., Еремеева В.В. | 49 | Mineralogy, geochemistry and genesis of rare metal Zr-Nb-Hf-Ta-REE-Ga mineralization of the seam XXX of Minusinsk basin Vergunov A.V., Arbuzov S.I., Eremeeva V.V. |
| Миграция ртути в постпирогенных условиях Журкова И.С. | 63 | Mercury migration in post-fire conditions Zhurkova I.S. |
| Подходы к численному исследованию топочных камер с циркулирующим кипящим слоем Гиль А.В., Заворин А.С., Кокшарев О.М. | 71 | Approaches to computational study of combustion chambers with circulating fluidized bed Gil A.V., Zavorin A.S., Koksharev O.M. |
| Potassium chloride effect on efficiency of fine slag used for treatment of expansive soil Shukla R.P., Parihar N.S., Gupta A.K. | 87 | Влияние хлорида калия на эффективность мелкого шлака, используемого для обработки дорожных почв Шукла Р.П., Парихар Н.С., Гупта А.К. |
| Перспективы типизации запасов углей для единого учета Охотников К.В. | 96 | Prospects of coal reserves typification for consolidated recording Okhotnikov K.V. |
| Изменчивость гидрометеорологического режима морей восточного сектора Арктики (Восточно-Сибирское, Чукотское) в современный период Плотников В.В., Вражкин А.Н., Мезенцева Л.И., Дружинин Н.И., Вакульская Н.М., Дубина В.А. | 103 | Variability of hydrometeorological regime of seas of East Arctic sector (East Siberian, Chukchi) in the modern period Plotnikov V.V., Vrazhkin A.N., Mezentseva L.I., Druzhinina N.I., Vakul'skaya N.M., Dubina V.A. |
| Состав биомаркеров и происхождение нефти арыкского прогиба (южный казахстан) Мадишиева Р.К., Серебренникова О.В., Исаев В.И., Портнов В.С., Оздоев С.М. | 116 | Composition of biomarkers and origin of oils of the Arykum depression (South Kazakhstan) Madisheva R.K., Serebrennikova O.V., Isaev V.I., Portnov V.S., Ozdoev S.M. |
| Процессы транспорта шлама при очистке скважин с произвольной ориентацией буровых труб, содержащих эксцентрично расположенное круглое ядро с подвижной стенкой: проблемы, результаты, перспективы (обзор) Харламов С.Н., Джангорбани М. | 131 | Cuttings transport in hole cleaning considering well orientation, pipe eccentricity and pipe rotation: problems, results, prospects (survey) Kharlamov S.N., Janghorbani M. |
| Нелинейная динамика топологически оптимальной нанобалки Тимошенко на основе модифицированной моментной теории Павлов С.П., Жигалов М.В., Захарова А.А., Крысько В.А. | 150 | Nonlinear dynamics of topologically optimal Timoshenko nanobeam based on the couple stress theory Pavlov S.P., Zhigalov M.V., Zakhарова А.А., Krysko V.A. |
| Сходимость результатов дистанционного метода дешифрирования с полевыми работами на линейном объекте. На примере оползневого участка Баборыкин М.Ю. | 161 | Convergence of the results of interpretation remote method with field work on a linear object. On the example of landslide plot Baborykin M.Yu. |
| Перспективы нефтегазоносности антиклинальной зоны Хали-Нефт Дашлары в связи с её палеотектоническими условиями Мухтарова Х.З., Насибова Г.Д. | 176 | Oil and gas potential of the Khali-Neft Dashlary anticline zone in relation to its paleotectonic settings Mukhtarova Kh.Z., Nasibova G.J. |
| Технологические решения в области обеспечения геопространственной информации о магистральных трубопроводах и объектах их инфраструктуры Аврунин Е.И., Уставич Г.А., Грекова А.О., Никонов А.В., Мелкий В.А., Долгополов Д.В. | 188 | Technological solutions in sphere of geospatial information on long distance pipelines and objects of their infrastructure Avrunev E.I., Ustavich G.A., Grekova A.O., Nikonov A.V., Melkiy V.A., Dolgopolov D.V. |

| | | |
|---|-----|--|
| Формирование методологического подхода исследования поверхности-активных веществ для увеличения нефтеотдачи пластов (на примере месторождения Удмуртской республики) Наговицына Н.П., Дереняев Р.А. | 202 | Formation of a methodological approach for research of surface-active substances to enhanced oil recovery (on the example of deposit of the Udmurt republic) Nagovitsyna N.P., Derendyaev R.A. |
| Уран и торий в аэрозольных выпадениях г. Новосибирска и его окрестностей (Западная Сибирь) Артамонова С.Ю. | 212 | Uranium and thorium in aerosol fallout of Novosibirsk city and its vicinity (West Siberia) Artamonova S.Yu. |
| Золото-сульфидно-кварцевое рудопроявление Арыскан (Западная Тува): условия образования и геохимические особенности флюидов Кужугет Р.В., Анкушева Н.Н., Редина А.А., Прокопьев И.Р., Ондар Э.-Д.В. | 224 | Arysakan gold-sulphide-quartz ore occurrence (Western Tuva): conditions of formation and geochemical peculiarities of fluids Kuzhuget R.V., Ankusheva N.N., Redina A.A., Prokopyev I.R., Ondar E.D.V. |
| Исследование изменений глобального климата как сложной системы с использованием вейвлетных фазо-частотных функций, фазо-частотных и фазо-временных характеристик гелиокосмических и климатических переменных. Часть 1 Алексеев В.И. | 238 | Studying changes in global climate as a complex system using wavelet phase-frequency functions, phase-frequency and phase-temporal characteristics of heliocosmic and climatic variables. Part 1 Alekseev V.I. |

УДК 504.064:614.7

СЕЗОННАЯ ДИНАМИКА ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ВОД ОВРАЖНО-БАЛОЧНЫХ СИСТЕМ ГОРОДСКИХ ТЕРРИТОРИЙ (НА ПРИМЕРЕ САРАТОВА)

Шешнёв Александр Сергеевич,
sheshnev@inbox.ru

Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского,
Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83.

Актуальность исследования определяется необходимостью обеспечения экологического благополучия водных объектов в зоне воздействия крупных городов. В соответствии с современными природоохранными, экологическими и градостроительными требованиями водный сток с урбанизированных территорий не должен оказывать негативного воздействия на качество водных ресурсов.

Цель: определение сезонной динамики (весенний максимум и летне-осенний минимум стока) поступления загрязняющих веществ с водным стоком оврагов и балок с территории города Саратова в Волгоградское водохранилище.

Методы: морфометрический анализ водосборных бассейнов овражно-балочных комплексов; картографирование притоков естественного и техногенного происхождения; опробование вод в устьевых створах перед впадением в Волгоградское водохранилище; химический анализ состава поверхностных вод по приоритетным показателям по общепринятым методикам (суммарно 140 определений); оценка и анализ качества вод относительно нормативов для водных объектов рыбохозяйственного значения.

Результаты. Выполнена характеристика функционирования городских оврагов и балок; определены особенности формирования химического состава и транспорта вод по эрозионной сети урбанизированной территории; установлен состав вод десяти крупнейших овражно-балочных комплексов по приоритетным загрязняющим веществам для Волгоградского водохранилища (нитриты, железо общее, медь, цинк, сульфаты, азот аммония, нефтепродукты); в водном стоке обнаружены концентрации загрязняющих веществ, многократно превышающие установленные нормативы для водоемов рыбохозяйственного назначения. Качество водного стока не соответствует нормативам, установленным для водных объектов рыбохозяйственного значения, к которым относится Волгоградское водохранилище как часть волжского бассейна. В сезонной динамике химического состава вод не обнаруживается однонаправленных тенденций. Из 70 сравнимых пар проб весеннего и летне-осеннего стока снижение концентраций летом выявлено в 41 случае (58,6 %), повышение – в 21 (30 %), отсутствие изменений – в 8 (11,4 %). Контроль качества стока следует вести исходя из анализа конкретных водосборных бассейнов. Учитывая, что водохранилище служит источником централизованного хозяйственно-питьевого водоснабжения и объектом рекреационной деятельности, необходима организация систем очистки поверхностного водного стока.

Ключевые слова:

Городской поверхностный сток, загрязнение вод, урбанизированные территории, урбокология, овражно-балочные системы, Волгоградское водохранилище.

Введение

На территории крупных городов существенно преобразуются рельеф и геологическая среда. Наиболее чувствительны к техногенным воздействиям элементы эрозионного рельефа – овражно-балочные комплексы и малые реки. Зачастую долины оказываются спланированы, а водотоки частично или полностью замещаются искусственной дренажной сетью в виде ливневых коллекторов. Актуальность исследования определяется необходимостью обеспечения экологического благополучия водных объектов в зоне воздействия крупных городов. В соответствии с современными природоохранными, экологическими и градостроительными требованиями водный сток с урбанизированных территорий не должен оказывать негативного воздействия на качество водных ресурсов.

В результате антропогенного воздействия в городах ухудшается качество поверхностных вод, важное место при этом принадлежит изменению состава талого и дождевого стоков [1]. Источники загрязнения поверхностного стока чрезвычайно разнообразны [2, 3]. Поверхностный сток выступает важным механизмом рассеяния токсичных загрязнителей, смывающихся с урбанизированных территорий [4, 5], и служит

основной причиной ухудшения качества воды в зоне воздействия городов [6]. В связи с присутствием таких токсичных химических загрязнителей, как тяжелые металлы, городские ливневые стоки могут представлять значительный риск для здоровья человека [7]. Сток с урбанизированных территорий оказывает на приемный бассейн многолетнее физическое, химическое и микробиологическое воздействие, что ухудшает условия водопользования [8], становится гигиенической проблемой и приводит к необходимости восстановления экологического потенциала водоемов [9, 10]. В условиях города даже небольшие ручьи и дождевые коллекторы могут оказывать существенное воздействие на качество вод в принимающих водоток реках и водохранилищах [11].

Состав стока подвержен существенным сезонным колебаниям [12, 13]. На интенсивность поступления твердых и растворимых материалов, токсичность и химический состав стока влияют интенсивность осадков и морфология водосбора [14]. Выделение границ водосборов в условиях урбанизированных территорий затруднено в связи с антропогенным изменением рельефа, а часть стока по искусственной дренажной сети перебрасывается в соседние бассейны.

Увеличение в результате урбанизации до нескольких раз объемов поверхностного стока актуализирует вопросы модернизации городского дренажа [15]. Управление ливневыми и сточными стоками города все более усложняется по мере роста и усложнения инфраструктуры городов. Подземные искусственные дренажные сети устаревают и зачастую не справляются со своими функциями. В связи с этим возникают предложения об использовании зеленой инфраструктуры для замещения или дополнения к устаревшей искусственной дренажной сети [16]. Все чаще рассматриваются возможности ренатурализации малых рек и крупных ручьев, закрытых ранее в подземные коллекторы [17]. В целях организации поверхностного стока следует рассматривать возможность создания в городских балках рекреационных зон с каскадами прудов. Разрабатываются технические аспекты отведения поверхностного стока урбанизированных территорий и очистки в условиях плотной застройки [18].

Управление качеством ливневого стока – важный фактор предотвращения подтопления и загрязнения водных ресурсов в зоне воздействия города [19, 20]. Рекомендуется всю дождевую воду дорожного стока в коммерческих и промышленных зонах собирать и обрабатывать перед сбросом из-за их высокой загрязненности [21]. Механизмы улучшения качества городских водотоков должны опираться на управление всей системой водосбора и инвентаризацией в его пределах источников загрязнения [11]. В условиях крупных российских городов выявлению водотоков и экологическому мониторингу водного стока овражно-балочных комплексов уделяется недостаточное внимание, что частично может быть объяснено отнесением поверхностного стока в ранее действующем законодательстве к условно чистым водам, не требующим очистки перед сбросом. Водотоки нередко закрыты в ливневых коллекторах и располагаются в промышленных зонах.

Систематический сброс неочищенных сточных вод оказывает значительное влияние на качество поверхностных вод урбанизированных территорий Российской Федерации [22]. Волгоградское водохранилище замыкает Волжско-Камский каскад, расположено в индустриально развитом регионе и аккумулирует широкий спектр химических веществ природного и антропогенного происхождения [23]. Саратов – крупнейший город на берегах Волгоградского водохранилища, поверхностный сток с территории которого оказывает существенное влияние на экосистемы водоема.

Цель исследования – определение сезонной динамики (весенний максимум и летне-осенний минимум стока) поступления приоритетных загрязняющих веществ с водным стоком оврагов и балок с территории города Саратова в Волгоградское водохранилище.

Объекты и методы исследования

Территория Саратова располагается на восточной оконечности Приволжской возвышенности на правом берегу Волги и имеет высокое овражно-балочное расчленение. При росте и развитии города эрозионные

формы рельефа либо полностью уничтожены, либо существенно трансформированы путем засыпки разнообразным материалом [24]. Однако эрозионная сеть продолжает выполнять дренажные функции, транспортируя сток как открытым потоком, так и по ливневым коллекторам, проложенным в тальвегах долин. Учитывая, что водосборы расположены на урбанизированной территории, следует с водным стоком овражно-балочных комплексов ожидать поступление значительного объема загрязняющих веществ в Волгоградское водохранилище.

Длины долинных комплексов составляют 1,8–6 км, их водосборные бассейны имеют площадь от 3,5 до 36 км². Овраги субпараллельны, имеют широтное простиранье, базисом эрозии служит Волгоградское водохранилище. Маршрутное обследование и анализ фоновых материалов показали, что расход водотоков складывается из нескольких составляющих: разгрузка подземных вод в виде родников, приток дренажных вод, талого и дождевого стоков, поступление сточных вод от предприятий и частного сектора. Сброс вод предприятиями осуществляется на основании договоров с эксплуатирующей организацией «Водосток», а отвод канализационных стоков частным сектором ведется незаконно. Баланс притоков естественного и техногенного происхождения сложно установить, а в функции предприятия «Водосток» входит лишь прием и транспорт поверхностных стоков, но не контроль их химического состава и экологического состояния.

На водосборе Назаровки расположены крупнейшие промышленные предприятия, направляющие стоки в водоток, а вблизи нефтеперерабатывающего завода наблюдаются выходы нефтесодержащих «родников» в долину. Долинные комплексы Токмаковского и Залетаевского оврагов находятся под воздействием стоков инфраструктурных объектов городской станции аэрации и других предприятий. Овраги Мутный ключ и Крутецкий пересекают промышленные зоны и принимают стоки предприятий и, вероятно, частного сектора. Овраги Белоглинский и Глебучев расположены в центральной исторической части города, геоморфологически слабо выражены, заполнены насыпными грунтами разнообразного состава и сложения, водотоки заключены в бетонные коллекторы. В коллекторе Глебучева оврага выявлены несанкционированные подключения жителей малоэтажной застройки. Водосборы оврагов Сеча и Безымянный заняты дачными массивами и эксплуатируемым Соколовогорским нефтяным месторождением, на котором применяется законтурное заводнение. Алексеевский овраг окружен коттеджной застройкой и залесен.

В периоды весеннего максимума (апрель) и летне-осеннего минимума стока (август) 2019 г. проведено гидрохимическое опробование вод, поступающих в Волгоградское водохранилище по десяти овражно-балочным комплексам (рисунок). Отбор проб выполнен в устьях водотоков, из них два заключены в ливневые коллекторы (овраги Белоглинский и Глебучев), восемь впадают в водохранилище открытым потоком. Водосборные бассейны находятся в разных функцио-

нальных зонах: в южной части города – промышленные, много- и малоэтажные жилые районы, в центральной – многоэтажная селитебная застройка, в северной – дачные участки и нефтепромыслы.

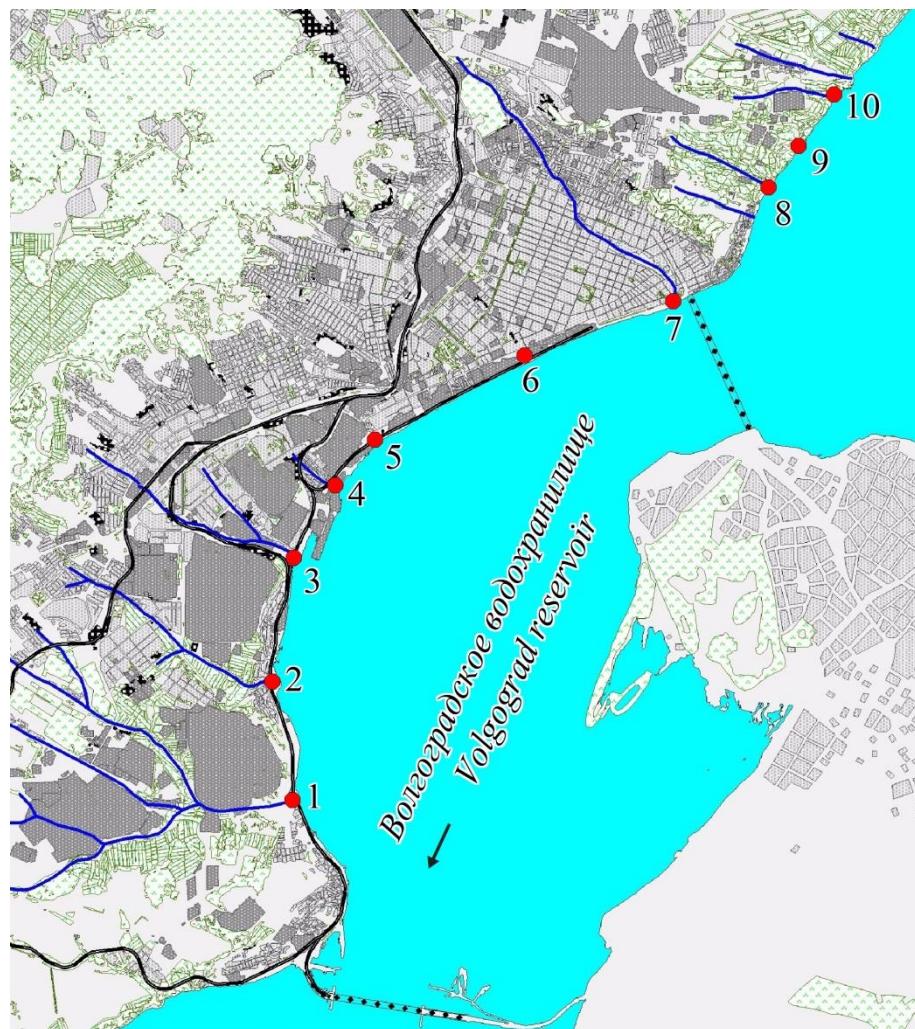


Рисунок. Местоположение объектов исследования, устья водотоков: 1 – Назаровка, 2 – Токмаковский, 3 – Залетаевский, 4 – Мутный ключ, 5 – Крутенъкий, 6 – Белоглинский, 7 – Глебучев, 8 – Сеча, 9 – Безымянный, 10 – Алексеевский

Figure. Location of the objects of research, mouths of watercourses: 1 – Nazarovka, 2 – Tokmakovskiy, 3 – Zaletaevskiy, 4 – Mutny klyuch, 5 – Krutenykiy, 6 – Beloglinskiy, 7 – Glebuchev, 8 – Secha, 9 – Bezumyanniy, 10 – Alekseevskiy

Химико-аналитические исследования проб вод выполнялись в аттестованной испытательной лаборатории Института химии Саратовского госуниверситета и лаборатории геоэкологии общепринятыми методами хроматографии и атомно-абсорбционной спектроскопии. Концентрация определяемых показателей приводится как среднее арифметическое по результатам двукратного определения компонента в каждой пробе. Суммарно получено 140 значений осредненных фактических концентраций. Случаи фактической концентрации ниже порога чувствительности метода обозначены как «н.о.» («не определены»). Экологическая оценка выполнена в соответствии с нормативами предельно допустимых концентраций (ПДК) вредных веществ для водных объектов рыбохозяйственного значения [25], к которым относится приемный бассейн – Волгоградское водохранилище. Определяемые вещества относятся

к трем классам опасности: 2 класс – высокоопасные (нитриты – NO_2); 3 класс – умеренно опасные (железо общее – Fe, медь – Cu, цинк – Zn); 4 класс – малоопасные (сульфаты – SO_4 , азот аммония – $\text{N}-\text{NH}_4$, нефтепродукты – НП). Данный перечень основан на результатах предыдущих исследований городских водотоков и приоритетных загрязняющих веществах в Волгоградском водохранилище [26].

Результаты исследований и их обсуждение

Результаты аналитических исследований проб вод представлены в таблице.

По отношению к ПДК анализируемые компоненты в период весеннего максимума стока образуют следующие ряды распределения для водотоков в порядке повышения:

- Назаровка – НП(н.о.)< $\text{N}-\text{NH}_4(0,05)$ < $\text{SO}_4(2,27)$ < $\text{Fe}(2,9)$ < $\text{NO}_2(5,63)$ < $\text{Zn}(70)$ < $\text{Cu}(880)$;

- Токмаковский – $\text{NO}_2(0,25) < \text{N}-\text{NH}_4(2,95) < \text{SO}_4(3,35) < \text{Fe}(7,6) < \text{НП}(30) < \text{Zn}(60) < \text{Cu}(2600)$;
- Залетаевский – $\text{N}-\text{NH}_4(0,03) < \text{SO}_4(3,25) < \text{Fe}(5,7) < \text{NO}_2(30) < \text{НП}(70) < \text{Zn}(120) < \text{Cu}(7000)$;
- Мутный ключ – $\text{НП}(\text{н.о.}) < \text{N}-\text{NH}_4(0,08) < \text{SO}_4(2,38) < \text{Fe}(2,6) < \text{NO}_2(27,5) < \text{Zn}(30) < \text{Cu}(1100)$;
- Крутенький – $\text{НП}, \text{Zn}(\text{н.о.}) < \text{N}-\text{NH}_4(3,7) < \text{SO}_4(3,75) < \text{Fe}(6) < \text{NO}_2(125) < \text{Cu}(1200)$;
- Белоглинский – $\text{НП}(\text{н.о.}) < \text{N}-\text{NH}_4(0,68) < \text{SO}_4(2,4) < \text{Fe}(5,6) < \text{Zn}(50) < \text{NO}_2(67,5) < \text{Cu}(1100)$;
- Глебучев – $\text{НП}, \text{N}-\text{NH}_4(\text{н.о.}) < \text{NO}_2(0,13) < \text{Fe}(1) < \text{SO}_4(1,25) < \text{Zn}(10) < \text{Cu}(480)$;
- Сеча – $\text{НП}(\text{н.о.}) < \text{N}-\text{NH}_4(2,13) < \text{SO}_4(2,92) < \text{Fe}(3,1) < \text{Zn}(10) < \text{NO}_2(72,5) < \text{Cu}(980)$;
- Безымянный – $\text{НП}, \text{N}-\text{NH}_4(\text{н.о.}) < \text{NO}_2(0,25) < \text{SO}_4(2,85) < \text{Fe}(8,1) < \text{Zn}(60) < \text{Cu}(2400)$;
- Алексеевский – $\text{НП}(\text{н.о.}) < \text{N}-\text{NH}_4(0,05) < \text{NO}_2(1) < \text{SO}_4(3,73) < \text{Fe}(3,8) < \text{Zn}(30) < \text{Cu}(2400)$.

По отношению к ПДК анализируемые компоненты в период летне-осеннего минимума стока образуют следующие ряды распределения для водотоков в порядке повышения:

- Назаровка – $\text{НП}(\text{н.о.}) < \text{N}-\text{NH}_4(0,02) < \text{SO}_4(1,38) <$

- Токмаковский – $\text{NO}_2(3,88) < \text{Cu}(7) < \text{Zn}(750)$;
- Токмаковский – $\text{НП}(\text{н.о.}) < \text{SO}_4(2) < \text{N}-\text{NH}_4(3,45) < \text{Fe}(4,4) < \text{NO}_2(13,5) < \text{Zn}(24) < \text{Cu}(1060)$;
- Залетаевский – $\text{НП}(\text{н.о.}) < \text{N}-\text{NH}_4(0,04) < \text{SO}_4(2,15) < \text{Fe}(3,1) < \text{NO}_2(8,75) < \text{Zn}(29) < \text{Cu}(1300)$;
- Мутный ключ – $\text{N}-\text{NH}_4(0,02) < \text{SO}_4(1,56) < \text{NO}_2(2,5) < \text{Fe}(4) < \text{НП}(28) < \text{Zn}(39) < \text{Cu}(590)$;
- Крутенький – $\text{НП}(\text{н.о.}) < \text{N}-\text{NH}_4(0,04) < \text{SO}_4(4,1) < \text{Fe}(5) < \text{NO}_2(37,5) < \text{Zn}(123) < \text{Cu}(1250)$;
- Белоглинский – $\text{НП}(\text{н.о.}) < \text{N}-\text{NH}_4(0,43) < \text{SO}_4(1,4) < \text{Fe}(5,4) < \text{NO}_2(6,88) < \text{Zn}(7) < \text{Cu}(600)$;
- Глебучев – $\text{SO}_4(1,69) < \text{N}-\text{NH}_4(1,7) < \text{Fe}(4,1) < \text{НП}(4,4) < \text{Zn}(18) < \text{NO}_2(19,38) < \text{Cu}(1880)$;
- Сеча – $\text{НП}(\text{н.о.}) < \text{N}-\text{NH}_4(0,06) < \text{NO}_2(0,38) < \text{Fe}(1,8) < \text{SO}_4(3,15) < \text{Zn}(52) < \text{Cu}(1800)$;
- Безымянный – $\text{НП}, \text{N}-\text{NH}_4(\text{н.о.}) < \text{NO}_2(0,25) < \text{SO}_4(11,6) < \text{Zn}(27) < \text{Fe}(49,2) < \text{Cu}(1250)$;
- Алексеевский – $\text{НП}, \text{N}-\text{NH}_4(\text{н.о.}) < \text{SO}_4(0,3) < \text{NO}_2(0,38) < \text{Fe}(1,8) < \text{Zn}(7) < \text{Cu}(310)$.

Приведенные данные подтверждают неудовлетворительное качество водного стока с городской территорией, при этом в наиболее высоких концентрациях находятся тяжелые металлы – цинк и медь.

Таблица. Результаты количественного химического анализа проб вод, мг/л

Table. Results of quantitative chemical analysis of the water samples, mg/l

| Параметр Parameter | Места отбора проб/Sampling sites | | | | | | | | ПДК MPC | | |
|-----------------------------------|----------------------------------|------------------------------|------------------------------|-----------------------------|-------------------------|------------------------------|-----------------------|---------------|--------------|--------------|-------|
| | Назаровка Nazarovka | Токмаковский Tokmakovskiy | Залетаевский Zaletaevskiy | Мутный ключ Mityu Klyuch | Крутенький Krutenkiy | Белоглинский Beloglinskiy | Глебучев Glebuchev | Сеча Sеча | | | |
| Железо общее Iron total | 0,29 0,28 | 0,76 0,44 | 0,57 0,31 | 0,26 0,4 | 0,6 0,5 | 0,56 0,54 | 0,1 0,41 | 0,31 0,18 | 0,81 4,92 | 0,38 0,18 | 0,1 |
| Сульфаты Sulfates | 227 138 | 335 200 | 325 215 | 238 156 | 375 410 | 240 140 | 125 169 | 292 315 | 285 1160 | 373 30 | 100 |
| Нитриты Nitrites | 0,45 0,31 | 0,02 1,08 | 2,4 0,7 | 2,2 0,2 | 10 3 | 5,4 0,55 | 0,01 1,55 | 5,8 0,03 | 0,02 0,02 | 0,08 0,03 | 0,08 |
| Азот аммония Ammonium nitrogen | 0,02 0,008 | 1,18 1,38 | 0,01 0,016 | 0,03 0,008 | 1,48 0,016 | 0,27 0,17 | н.о. 0,68 | 0,85 0,023 | н.о. н.о. | 0,02 0,4 | 0,4 |
| Нефтепродукты Oil products | н.о. н.о. | 1,5 н.о. | 3,5 н.о. | н.о. 1,4 | н.о. н.о. | н.о. 0,22 | н.о. н.о. | н.о. н.о. | н.о. н.о. | н.о. н.о. | 0,05 |
| Медь Copper | 0,88 0,75 | 2,6 1,06 | 7 1,3 | 1,1 0,59 | 1,2 1,25 | 1,1 0,6 | 0,48 1,88 | 0,98 1,8 | 2,4 1,25 | 2,4 0,31 | 0,001 |
| Цинк Zinc | 0,7 0,07 | 0,6 0,24 | 1,2 0,29 | 0,3 0,39 | н.о. 1,23 | 0,5 0,07 | 0,1 0,18 | 0,1 0,52 | 0,6 0,27 | 0,3 0,07 | 0,01 |

Примечание: в числителе – результаты анализа в весенний период; в знаменателе – в летне-осенний период.

Note: in the numerator – the results of the analysis in spring; in the denominator – in summer-autumn.

Сезонная динамика определяемых компонентов

Из 70 сравнительных пар проб весеннего и летне-осеннего стока снижение концентраций летом выявлено в 41 случае (58,6 %), повышение – в 21 (30 %), отсутствие изменений – в 8 (11,4 %). Понижение концентраций летом в сравнении с весной наблюдается в 60 % случаев по сульфатам, азоту аммония и цинку; в 70 % случаев – по железу, нитритам и меди. По ряду показателей отмечена резко разнонаправленная сезонная динамика.

Содержание нитритов летом резко понижается в ручьях Крутенький (3,3), Залетаевский (3,42), Белоглинский (9,8), Мутный ключ (11) и Сеча (193 раза). Многократное повышение концентрации происходит в ручьях Токмаковский (54) и Глебучев (155 раза).

Концентрация азота аммония существенно уменьшилась в ручьях Мутный ключ (3,8), Сеча (37) и Крутенький (92,5 раза); увеличилась в ручье Глебучев (от отсутствия до 0,68 мг/л).

Концентрация цинка резко снизилась в водотоках Залетаевский (4,1), Алексеевский (4,3), Белоглинский (7,1), Назаровка (10 раз); повысилась в ручьях Сеча (5,2) и Крутенький (от отсутствия до 1,23 мг/л).

Содержание меди значительно уменьшилось в ручьях Залетаевский (5,4) и Алексеевский (7,7 раза), возросло в ручье Глебучев (3,9 раза).

Резкое понижение концентрации сульфатов произошло в водотоках Алексеевском (12,4 раза), понижение – в Безымянном (4,1 раза).

Существенное повышение содержания *общего железа* произошло в ручьях Глебучев (4,1) и Безымянный (6,1 раза).

Нефтепродукты в 60 % случаев не определены в оба периода, в двух пробах фиксировались лишь весной, в двух других – только летом. Вероятно, нефтепродукты не являются постоянным загрязнителем, и их поступление носит спорадический характер.

Сезонная динамика поступления загрязняющих веществ с водосборов

В *Назаровке* нефтепродукты не определены в оба периода. Все прочие показатели летом уменьшили свои значения: от небольшого снижения по общему железу до 10-кратного по цинку.

В *Токмаковском* ручье нефтепродукты фиксировались весной, но отсутствовали летом. Возросли содержания азота аммония (на 17 %) и нитритов (в 54 раза). Концентрации прочих загрязняющих веществ уменьшились от 40 % по сульфатам до 60 % по цинку.

В ручье *Залетаевском* сезонная динамика определяемых компонентов, кроме нитритов, схожа с водотоком Токмаковского оврага. Нефтепродукты фиксировались весной и отсутствовали летом. Увеличилось лишь содержание азота аммония (на 17 %). Прочие компоненты уменьшили свою концентрацию на величины от 34 % (сульфаты) до 81 % (медь).

В водотоке *Мутный ключ* летом, в отличие от весны, появляются нефтепродукты. Увеличивают концентрацию цинк (на 30 %) и общее железо (на 54 %). Остальные компоненты снижают содержание от 34 % (сульфаты) до 91 % (нитриты).

В водах ручья *Крутильского* оврага нефтепродукты не определены. Летом появляется цинк, отсутствовавший весной. Возросло содержание меди (на 4 %) и сульфатов (на 9 %). Уменьшилась концентрация общего железа (на 17 %) и нитритов (на 70 %), но особенно резко по азоту аммония (на 99 %).

Водоток *Белоглинского* оврага не содержал нефтепродуктов в течение обоих сезонов. Все компоненты летом уменьшили свою концентрацию: от 4 % по общему железу до 90 % по нитритам.

В водах ручья *Глебучева* оврага односторонняя тенденция увеличения концентраций загрязняющих веществ летом до весьма высоких значений. Не определенные в весенних пробах нефтепродукты и азот аммония появляются летом. Содержание показателей увеличилось от 35 % (сульфаты) до 155 раз (нитриты).

Нефтепродукты в водах ручья *Сеча* в течение двух сезонов не зафиксированы. Летом увеличивается концентрация сульфатов (на 8 %), меди (на 84 %) и цинка (в 5,2 раза). Уменьшается содержание общего железа (на 42 %), резко – азота аммония (в 37 раз) и нитритов (в 193 раза).

В ручье *Безымянном* в течение двух сезонов не определены нефтепродукты и азот аммония. Нитриты сохраняют постоянство невысокой концентрации. Летом увеличилось содержание сульфатов (в 4,07 раза) и общего железа (в 6,07 раза). Уменьшилась концентрация меди (на 48 %) и цинка (на 55 %).

В водотоке *Алексеевского* оврага нефтепродукты не определены. Все прочие компоненты летом

уменьшили содержание: от снижения на 53 % по общему железу до отсутствия по азоту аммония.

Заключение

Особенности состава водного стока городских овражно-балочных комплексов определяются, в первую очередь, типом техногенной нагрузки и характеристиками городской застройки на водосборе. Аналогичные выводы получены в разных регионах [27–29 и др.]. Исследованием в целом подтверждаются данные, полученные на территории Вильнюса [12], согласно которым для транспортировки загрязняющих веществ решающее значение имеют периоды высокого стока. Анализ химического состава вод десяти овражно-балочных водосборов по семи показателям на территории Саратова показал, что в период летне-осеннего минимума стока по сравнению с весенним максимумом снижение концентраций наблюдается в 58,6 % случаев, повышение – в 30 %, отсутствие изменений – в 11,4 %.

Химический состав стока формируется в результате совместного действия разгрузки подземных вод, поступления талых и дождевых вод, в ряде случаев – притока дренажных и сточных вод с территорий предприятий и даже несанкционированных подключений частного жилого сектора. Значительное повышение содержания загрязняющих веществ летом во время минимума стока фиксируется на водосборах с обилием частного жилого сектора, не подключенного к централизованной системе водоотведения. Показателен сток ручья по коллектору Глебучева оврага, где весной действовал разбавляющий эффект поверхностного и дренажного стока большого водосбора, а уже к августу сток возвращается к привычному составу со значительным содержанием вод техногенного происхождения. Уменьшение концентрации вредных веществ характерно для водосборов с многоэтажной или частной жилой застройкой, обустроенных системами централизованного водоотведения, при отсутствии промышленных источников сбросов вод. В этих условиях максимальное поступление поллютантов в приемный бассейн происходит весной с талым стоком. При наличии источников промышленных сбросов сезонная динамика поступления загрязняющих веществ определяется технологическими особенностями производств.

Содержание приоритетных загрязняющих веществ в стоке эрозионной сети с территории Саратова многократно превышает нормативы для водных объектов рыбохозяйственного значения, к которым относится Волгоградское водохранилище как часть волжского бассейна. В сезонной динамике состава стока не обнаруживается односторонних тенденций, что, вероятно, связано с особенностями функционирующих источников сбросов. Контроль качества стока следует вести исходя из анализа конкретных водосборных бассейнов. Учитывая, что водохранилище служит источником централизованного хозяйствственно-питьевого водоснабжения и объектом рекреационной деятельности, необходима организация систем очистки поверхностного водного стока.

Полученные результаты позволяют установить источники поступления приоритетных загрязняющих веществ для приемного водоема для уровней бассейновых водо-сборов в городской среде. Подобные данные способствуют принятию природоохранных и градопланировочных решений по предотвращению поступления поллютантов в водные экосистемы рек и водохранилищ, в том числе

это касается необходимости удаления снегового покрова, депонирующего зимой значительные объемы загрязнителей в застроенных районах и промышленных зонах.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых (проект МК-5758.2018.5).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Экологическая оценка химического состава талого и дождевого стоков с селитебных территорий города Воронежа / Т.И. Прожорина, И.И. Косинова, М.В. Васильева, И.И. Либина // Гигиена и санитария. – 2018. – № 8. – С. 699–702.
2. Halverson H.G., Dewalle D.R., Sharpe W.E. Contribution of precipitation to quality of urban storm runoff // Water Resources Bulletin. – 1984. – V. 20. – № 6. – P. 859–864.
3. Egodawatta P., Miguntanna N.S., Goonetilleke A. Impact of roof surface runoff on urban water quality // Water Science and Technology. – 2012. – V. 66 (7). – P. 1527–1533.
4. Jartun M., Pettersen, A.J. Contaminants in urban runoff to Norwegian fjords // Journal of Soils and Sediments. – 2010. – V. 10. – P. 155–161.
5. Rădulescu D., Racoviteanu G., Swamikannu X. Comparison of urban residential storm water runoff quality in Bucharest, Romania with international data // EENVIRO 2018 – Sustainable Solutions for Energy and Environment. – 2019. – V. 85. – Art. 07019. – P. 1–9.
6. Al-Badaii F., Shuhaimi-Othman M. The Impact of anthropogenic pollution and urban runoff associated with spatial and seasonal variation on the water quality in the Semenyih river, Malaysia // World Applied Sciences Journal. – 2014. – V. 32. – № 6. – P. 1061–1073.
7. Assessment and management of human health risk from toxic metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in urban stormwater arising from anthropogenic activities and traffic congestion / Y. Ma, A. Liu, P. Egodawatta, J. McGree, A. Goonetilleke // Science of the Total Environment. – 2017. – V. 579. – P. 202–211.
8. Marsalek J. Overview of urban stormwater impacts on receiving waters // Urban Water Management: Science Technology and Service Delivery / Eds. R. Arsov, J. Marsalek, E. Watt, E. Zeman. – Dordrecht: Springer, 2003. – P. 1–10.
9. Sakson G., Brzezinska A., Zawilski M. Emission of heavy metals from an urban catchment into receiving water and possibility of its limitation on the example of Lodz city // Environmental Monitoring and Assessment. – 2018. – V. 190. – Art. 281. – P. 1–15.
10. 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 & Engineering. – 2019. – V. 13. – № 1. – Art. 13. – P. 1–11.
11. Aleksander-Kwaterczak U., Plenzler D. Contamination of small urban watercourses on the example of a stream in Krakow (Poland) // Environmental Earth Sciences. – 2019. – V. 78. – Iss. 16. – Art. 530. – P. 1–13.
12. Heavy metal contamination in surface runoff sediments of the urban area of Vilnius, Lithuania / G. Ignatavičius, V. Valskys, I. Bulskaya, D. Palulis, A. Zigmontienė, J. Satkūnas // Estonian Journal of Earth Sciences. – 2017. – V. 66. – № 1. – P. 13–20.
13. Исследование динамики состава поверхностного стока урбанизированных территорий / Е.Д. Палагин, М.А. Гридинева, П.Г. Быкова, Т.Ю. Набок // Водоснабжение и санитарная техника. – 2018. – № 1. – С. 51–56.
14. Hall K.J., Anderson B.C. The toxicity and chemical composition of urban stormwater runoff // Canadian Journal of Civil Engineering. – 1988. – V. 15. – P. 98–106.
15. Zhou Q., Leng G., Su J., Ren Y. Comparison of urbanization and climate change impacts on urban flood volumes: Importance of urban planning and drainage adaptation // The Science of the total environment. – 2019. – V. 658. – P. 24–33.
16. Dagenais D., Thomas I., Paquette S. Siting green stormwater infrastructure in a neighbourhood to maximise secondary benefits: lessons learned from a pilot project // Landscape Research. – 2017. – V. 42. – № 2. – P. 195–210.
17. Kobojek E. Anthropogenic transformation and the possibility of renaturalising small rivers and their valleys in cities – Łódź and Lviv examples // European Spatial Research and Policy. – 2015. – V. 22. – № 1. – P. 45–60.
18. Ким А.Н., Михайлов А.В. Очистка поверхностного стока с урбанизированных территорий на локальных пассивных системах // Вода и экология: проблемы и решения. – 2017. – № 4. – С. 40–52.
19. Hall M.J., Ellis J.B. Water quality problems of urban areas // GeoJournal. – 1985. – V. 11. – Iss. 3. – P. 265–275.
20. Орлов Б.В., Бойкова И.Г., Волшаник В.В. Управление стоком с территории мегаполиса. – М.: НИУ МГСУ, 2015. – 288 с.
21. Rainwater utilization and storm pollution control based on urban runoff characterization / M. Zhang, H. Chen, J. Wang, G. Pan // Journal of Environmental Sciences. – 2010. – V. 22 (1). – P. 40–46.
22. Черногаева Г.М., Жадановская Е.А. Загрязнение поверхностных пресных вод на урбанизированных территориях субъектов Российской Федерации // Вопросы географии. Сб. 145. Гидрологические изменения. – М.: ИД «Кодекс», 2018. – С. 414–423.
23. Гидрохимические основы биологической продуктивности в замыкающих водохранилищах Волжского каскада / Е.А. Шашуловская, С.А. Мосияш, И.Г. Филимонова, Л.В. Гришина, Е.Г. Кузина // Труды Зоологического института РАН. – 2016. – Т. 320. – № 3. – С. 367–376.
24. Шешнёв А.С. Техногенные оползни в овражно-балочных системах Саратова (на примере Глебучева оврага) // Геоморфология. – 2017. – № 3. – С. 30–37.
25. Приказ Министерства сельского хозяйства РФ № 552 от 13.12.2016 «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения». URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201701160006> (дата обращения 28.06.2019).
26. Шешнёв А.С., Ерёмин В.Н., Решетников М.В. Качество водного стока ливневой дренажной сети на территории Саратова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. – 2018. – № 3. – С. 108–118.
27. Jamwal P., Mittal A.K., Mouchel J.-M. Effects of urbanisation on the quality of the urban runoff for Delhi watershed // Urban Water Journal. – 2008. – V. 5. – № 3. – P. 247–257.
28. Совершенствование рациональных городских инженерных систем очистки поверхностных сточных вод / А.А. Воронов, Е.С. Малышкина, Е.И. Вялкова, С.В. Максимова // Градостроительство и архитектура. – 2018. – Т. 8. – № 3. – С. 43–50.
29. Surface runoff in urban area – case study / M. Zelenáková, Z. Vranayová, A. Repel, D. Kaposztasová // New Trends in Urban Drainage Modelling. – Champ: Springer, 2019. – P. 152–156.

Поступила 29.01.2020 г.

Информация об авторах

Шешнёв А.С., кандидат географических наук, заведующий лабораторией геоэкологии геологического факультета Саратовского национального исследовательского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского.

UDC 504.064:614.7

SEASONAL DYNAMICS OF CHEMICAL COMPOSITION OF WATERS FROM GULLY SYSTEMS IN URBAN AREAS (BY THE EXAMPLE OF SARATOV)

Aleksandr S. Sheshnev,
sheshnev@inbox.ru

National Research Saratov State University,
83, Astrakhanskaya street, Saratov, 410012, Russia.

The relevance of the research is determined by the need to ensure the environmental well-being of water bodies in the zone of impact of large cities. In accordance with modern environmental, nonconsumptive and urban planning requirements, water runoff from urbanized areas should not have a negative impact on the quality of water resources.

The main aim of the research is to determine the seasonal dynamics (spring maximum and summer-autumn minimum flow) of pollutants from the water flow of ravines and gullies from the city of Saratov to the Volgograd reservoir.

Methods: morphometric analysis of catchment basins of gully complexes; mapping of tributaries of natural and technogenic origin; testing of waters in estuaries before the confluence with the Volgograd reservoir; chemical analysis of surface water composition by priority indicators according to generally accepted methods (140 definitions in total); assessment and analysis of water quality in relation to standards for water bodies of fishery importance.

Results. The author characterized the functioning of urban ravines and gullies; determined the features of formation of chemical composition and transport of water through the erosion network of an urbanized area; defined the composition of the waters of the ten largest ravine-gully complexes for priority pollutants for the Volgograd reservoir (nitrites, iron, copper, zinc, sulfates, ammonium nitrogen, oil products); found concentrations of pollutants, many times exceeding the established standards for fisheries reservoirs in the water flow. The quality of water flow does not meet the standards established for water bodies of fishery importance, which include the Volgograd reservoir as part of the Volga basin. In the seasonal dynamics of the chemical composition of water, unidirectional trends are not detected. Out of 70 comparative pairs of samples of spring and summer-autumn runoff, a decrease in summer concentrations was detected in 41 cases (58,6 %), an increase in 21 (30 %), and no changes in 8 (11,4 %). Flow quality control should be based on the analysis of specific watersheds. Given the fact that the reservoir is as a source of centralized drinking water supply and recreational activities, the organization of surface water treatment systems is necessary.

Key words:

Urban surface flow, water pollution, urbanized areas, urban ecology, gully systems, Volgograd reservoir.

This work was supported by the Grant of President of Russian Federation (Grant No. MK-5758.2018.5).

REFERENCES

1. Prozhhorina T.I., Kosinova I.I., Vasilyeva M.V., Libina I.I. Ecological-hygienic evaluation of the influence of thail and rainway on surface water pollution. *Gigiena i Sanitariya*, 2018, vol. 8, pp. 699–702. In Rus.
2. Halverson H.G., Dewalle D.R., Sharpe W.E. Contribution of precipitation to quality of urban storm runoff. *Water Resources Bulletin*, 1984, vol. 20, no. 6, pp. 859–864.
3. Egodawatta P., Migunanna N.S., Goonetilleke A. Impact of roof surface runoff on urban water quality. *Water Science and Technology*, 2012, vol. 66 (7), pp. 1527–1533.
4. Jartun M., Pettersen A.J. Contaminants in urban runoff to Norwegian fjords. *Journal of Soils and Sediments*, 2010, vol. 10, pp. 155–161.
5. Rădulescu D., Racovițeanu G., Swamikannu X. Comparison of urban residential storm water runoff quality in Bucharest, Romania with international data. *EENVIRO 2018 – Sustainable Solutions for Energy and Environment*, 2019, vol. 85, art. 07019, pp. 1–9.
6. Al-Badaui F., Shuhaimi-Othman M. The impact of anthropogenic pollution and urban runoff associated with spatial and seasonal variation on the water quality in the Semenyih river, Malaysia. *World Applied Sciences Journal*, 2014, vol. 32, no. 6, pp. 1061–1073.
7. Ma Y., Liu A., Egodawatta P., McGree J., Goonetilleke A. Assessment and management of human health risk from toxic metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in urban stormwater arising from anthropogenic activities and traffic congestion. *Science of the Total Environment*, 2017, vol. 579, pp. 202–211.
8. Marsalek J. Overview of urban stormwater impacts on receiving waters. *Urban Water Management: Science Technology and Service Delivery*. Eds. R. Arsov, J. Marsalek, E. Watt, E. Zeman. Dordrecht, Springer, 2003. pp. 1–10.
9. Sakson G., Brzezinska A., Zawilski M. Emission of heavy metals from an urban catchment into receiving water and possibility of its limitation on the example of Lodz city. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2018, vol. 190, art. 281, pp. 1–15.
10. 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 & Engineering*, 2019, vol. 13, no. 1, art. 13, pp. 1–11.
11. Aleksander-Kwaterczak U., Plenzer D. Contamination of small urban watercourses on the example of a stream in Krakow (Poland). *Environmental Earth Sciences*, 2019, vol. 78, Iss. 16, art. 530, pp. 1–13.
12. Ignatavičius G., Valskys V., Bulskaya I., Paliulis D., Zigmontienė A., Satkūnas J. Heavy metal contamination in surface runoff sediments of the urban area of Vilnius, Lithuania. *Estonian Journal of Earth Sciences*, 2017, vol. 66, no. 1, pp. 13–20.
13. Palagin E.D., Gridneva M.A., Bykova P.G., Nabok T.Yu. Study of the dynamics of surface runoff composition of the urban lands. *Water Supply and Sanitary Technique*, 2018, no. 1. pp. 51–56. In Rus.
14. Hall K.J., Anderson B.C. The toxicity and chemical composition of urban stormwater runoff. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 1988, vol. 15, pp. 98–106.
15. Zhou Q., Leng G., Su J., Ren Y. Comparison of urbanization and climate change impacts on urban flood volumes: Importance of urban planning and drainage adaptation. *The Science of the total environment*, 2019, vol. 658, pp. 24–33.
16. Dagenais D., Thomas I., Paquette S. Siting green stormwater infrastructure in a neighbourhood to maximise secondary benefits: lessons learned from a pilot project. *Landscape Research*, 2017, vol. 42, no. 2, pp. 195–210.

17. Kobojeck E. Anthropogenic transformation and the possibility of renaturalising small rivers and their valleys in cities – Łódź and Lviv examples. *European Spatial Research and Policy*, 2015, vol. 22, no. 1, pp. 45–60.
18. Kim A.N., Mikhailov A.V. Urban stormwater treatment on local passive systems. *Water and Ecology: problems and solutions*, 2017, no. 4, pp. 40–52. In Rus.
19. Hall M.J., Ellis J.B. Water quality problems of urban areas. *GeoJournal*, 1985, vol. 11, iss. 3, pp. 265–275.
20. Orlov B.V., Boykova I.G., Volshanik V.V. *Upravlenie stokom s territorii megapolisa* [Managing runoff from areas of the metropolis]. Moscow, MGSPU Publ., 2015. 288 p.
21. Zhang M., Chen H., Wang J., Pan G. Rainwater utilization and storm pollution control based on urban runoff characterization. *Journal of Environmental Sciences*, 2010, vol. 22 (1), pp. 40–46.
22. Chernogaeva G.M., Zhadanovskaya E.A. Zagryazneniya poverkhnostnykh vod na urbanizirovannykh territoriyakh subektov Rossiyskoy Federatsii [The pollution of surface runoff in the urban territories of the Russian Federal subjects]. *Voprosy geografii. Sb. 145. Gidrologicheskie izmeneniya* [Problems of geography. Vol. 145. Hydrological changes]. Moscow, Kodeks Publ. House, 2018. pp. 414–423.
23. Shashulovskaya E.A., Mosiyash S.A., Filimonova I.G., Grishina L.V., Cousina E.G. Hydro-chemical basis of biological productivity in the closing reservoirs of the Volga cascade. *Proceedings of the Zoological Institute RAS*, 2016, vol. 320, no. 3, pp. 367–376. In Rus.
24. Sheshnev A.S. Man-caused landslides in gully systems of the Saratov city: the Glebuchev ravine case study. *Geomorfologiya*, 2017, no. 3, pp. 30–37. In Rus.
25. *Prikaz Ministerstva selskogo khozyaystva RF № 552 ot 13.12.2016 «Ob utverzhdenii normativov kachestva vody vodnykh obektov rybohozyaystvennogo znacheniya, v tom chisle normativov predelno dopustimykh kontsentratsiy vrednykh veshchestv v vodakh vodnykh obektov rybohozyaystvennogo znacheniya»* [On the approval of water quality standards for water bodies of fishery importance, including standards for maximum permissible concentrations of harmful substances in the waters of water bodies of fishery importance, order of the ministry of agriculture of the Russian Federation No. 552 of December 13, 2016.]. Available at: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201701160006> (accessed 28 June 2019).
26. Sheshnev A.S., Eremin V.N., Reshetnikov M.V. The quality of urban storm water in drainage system on the territory of Saratov. *PNRPU Bulletin. Applied ecology. Urban development*, 2018, no. 3, pp. 108–118. In Rus.
27. Jamwal P., Mittal A.K., Mouchel J.-M. Effects of urbanisation on the quality of the urban runoff for Delhi watershed. *Urban Water Journal*, 2008, vol. 5, no. 3, pp. 247–257.
28. Voronov A.A., Malyshkina E.S., Vyalkova E.I., Maksimova S.V. Development of the Rational Urban Engineering Systems for the Surface Wastewater Treatment. *Urban Construction and Architecture*, 2018, vol. 8, no. 3, pp. 43–50. In Rus.
29. Zeleňáková M., Vranayová Z., Repel A., Kaposztasová D. Surface runoff in urban area – case study. *New Trends in Urban Drainage Modelling*. Champ, Springer, 2019. pp. 152–156.

Received: 29 January 2020.

Information about the authors

Aleksandr S. Sheshnev, Cand. Sc., head of the Laboratory, National Research Saratov State University.

УДК 622.4

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОВЕТРИВАНИЯ ТУПИКОВЫХ ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫХ ВЫРАБОТОК ПОСЛЕ ВЗРЫВНЫХ РАБОТ

Колесов Евгений Викторович¹,
kolesovev@gmail.com

Казаков Борис Петрович¹,
aero_kaz@mail.ru

¹ Горный институт УрО РАН,
Россия, 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78-А.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью улучшения системы вентиляции тупиковых выработок, сокращения трудозатрат на их вентиляцию и ускорения выполнения основных операций по проходке выработок.

Цель: определение оптимального расстояния от конца трубопровода до груди забоя тупиковой выработки с точки зрения эффективности проветривания тупиковой подготовительной выработки.

Объект: система вентиляции тупиковой подготовительной выработки.

Методы: многопараметрическое трехмерное численное моделирование на основе методов вычислительной гидродинамики. Приведены результаты трехмерного численного моделирования проветривания тупиковой подготовительной выработки от выделившихся в результате взрывных работ ядовитых газов. Варьируемыми параметрами модели являются: начальная концентрация и распределение вредных примесей в тупиковой выработке после проведения взрывных работ, расстояние от конца нагнетательного трубопровода до тупикового забоя, поперечное сечение тупиковой выработки, а также расход свежего воздуха, поступающего через трубопровод. Получена расчетная формула для определения объема зоны смешения. Показано, что время проветривания тупиковой выработки не зависит от длины зоны отброса газов, а зависит от начальной средней концентрации ядовитых газов в зоне смешения. Получены значения безразмерного коэффициента эффективности проветривания K тупиковой выработки, или коэффициента турбулентной диффузии В.Н. Воронина, в зависимости от варьируемых параметров. Показано, что коэффициент K не зависит от величины входящего расхода свежего воздуха, а зависит только от геометрических параметров системы вентиляции тупиковой выработки и принимает постоянное значение для данной конфигурации системы вентиляции. Показано, что существует оптимальное расстояние от конца трубопровода до забоя, при котором происходит наиболее эффективный вынос вредных примесей.

Ключевые слова:

Взрывные работы, CFD-моделирование, тупиковая выработка, эффективность вентиляции, зона смешения, концентрация газов.

Введение

При проходке подземных горных выработок буро-взрывным способом в результате взрыва в области вблизи забоя образуется зона с повышенной концентрацией ядовитых газов (как правило, СО и NO_x) [1]. Допуск людей в забой после взрывных работ разрешается производить только после того, как концентрация ядовитых газов в тупиковой выработке станет меньше предельно допустимой: менее 0,0017 % по объему для СО и менее 0,00026 % по объему для NO_x в пересчете на NO_2 . При этом согласно «Правилам безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых», действующим на территории России, тупиковые горные выработки длиной более 10 м должны проветриваться активной струей воздуха, подаваемой по вентиляционному трубопроводу при помощи вентилятора местного проветривания (ВМП). Дополнительным условием является то, что расстояние от конца нагнетательного трубопровода до тупикового забоя не должно превышать 10 м. Данное требование приводит к дополнительным трудозатратам, связанным с постоянным снятием и установкой трубопровода до и после взрывных работ, поскольку иначе воздействие ударной волны и разлетающихся при взрыве кусков горной породы нарушит целостность трубопровода, что потребует замены его концевой части протя-

женностью до 20–30 м. Увеличение максимального расстояния от конца трубопровода до забоя позволит сократить трудозатраты на монтаж трубопровода и ускорит выполнение основных операций по проходке выработки. Поэтому представляет интерес исследование эффективности выноса вредных газов в зависимости от расстояния от конца трубопровода до забоя и других параметров вентиляции тупиковой горной выработки. Таким образом, цель настоящего исследования – определение оптимального расстояния от конца трубопровода до груди забоя тупиковой выработки с точки зрения эффективности проветривания тупиковой подготовительной выработки.

Благодаря развитию вычислительных технологий в настоящее время возможно исследование характеристик аэродинамических потоков с помощью специализированных пакетов математического моделирования методами вычислительной гидродинамики (CFD – computational fluid dynamics). В современной литературе представлено множество работ, связанных с применением методов CFD для решения задач рудничной вентиляции [2–20]. В работе [2] рассмотрены основные принципы CFD и обсуждены шесть широко используемых моделей турбулентности с некоторыми примерами их применения и рекомендациями по выбору подходящей модели турбулентности. Авторы

работы [3] исследовали эффективность проветривания тупиковых выработок с помощью продольных перегородок на основе CFD-моделирования. В статье [4] строится CFD-модель вентиляции реальной выработки после взрывных работ и производится верификация модели путем сопоставления результатов моделирования и натурных данных. В [5] описывается проведение натурных замеров концентрации ядовитых газов после взрывных работ в тупиковой выработке, оценивается длина зоны отброса газов и время проветривания выработки до ПДК. В [6] исследуется динамика пылевоздушной смеси при проветривании тупиковой выработки в процессе работы комбайново-

го комплекса. В [7] исследуется возможность последовательного проветривания нескольких тупиковых проходческих выработок после взрывных работ.

Постановка задачи

Исследуется тупиковая подготовительная выработка в период после проведения взрывных работ, проветриваемая струей свежего воздуха, подаваемого по вентиляционному трубопроводу, или воздуховоду, с помощью ВМП, расположенного в сквозной выработке на свежей струе воздуха. Схема проветривания тупиковой выработки представлена на рис. 1.

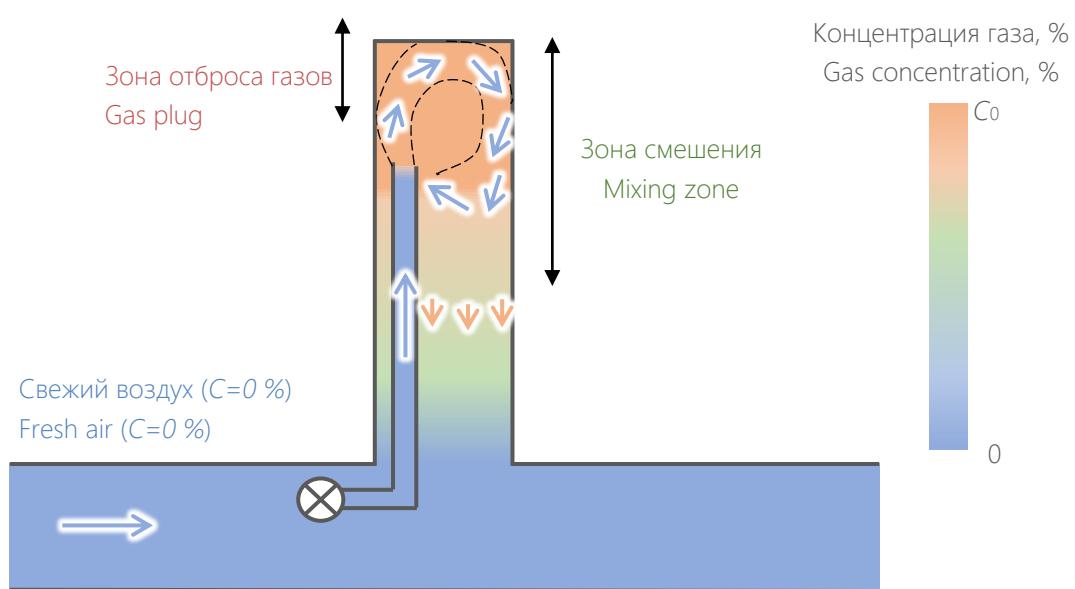


Рис. 1. Схема проветривания тупиковой выработки после взрывных работ
 Fig. 1. Scheme of dead-end heading ventilation after blasting operations

Таблица 1. Формулы для оценки длины зоны отброса газов
 Table 1. Gas plug length estimation formulas

| Автор/Author | Формула/Formula |
|--|---|
| Ксенофонтова А.И. Ksenofontova A.I. | $l = 15 + A/5$ |
| Воронин В.Н. Voronin V.N. | $l = \frac{20 A}{\rho l_{ш} \sqrt{S}}$ |
| Мостепанова Ю.Б., Русак О.Н. Mostepanova Yu.B., Rusak O.N. | $l = \frac{11,5 A}{S}$ |
| Комаров В.Б., Килькеев Ш.Х. Komarov V.B., Kilkeev Sh.Kh. | $l = 10 + 2,4 A$ |
| Сметанин М.М., Барышев А.С., Хохлов Н.А. Smetanin M.M., Barishhev A.S., Khokhlov N.A. | $l = \frac{16,5 \sqrt{A}}{\sqrt[3]{S}}$ |
| Янов А.П., Ващенко В.С. Yanov A.P., Vashchenko V.S. | $l = \frac{N}{l_{ш}} + 0,3 A$ |
| Барышев А.С., Казаков А.П. Barishhev A.S., Kazakov A.P. | $l = 0,5 k_1 \sqrt{S} \left(1 + \frac{1}{2 a}\right) + \frac{A b}{S}$ |

Согласно проведенным исследованиям [1, 8] после взрывных работ в призабойной части тупиковой выработки образуется зона отброса газов с времененным превышением предельно допустимой концентрации (ПДК) вредных газов CO и NO_x. В настоящее время

существует множество эмпирических формул, по которым рассчитывается длина зоны отброса газов. В табл. 1 приведены эмпирические формулы, предложенные разными авторами на основании различных исследований [8].

В приведенных формулах l – длина зоны отброса газов, м; A – масса одновременно взрываемого взрывчатого вещества (ВВ), кг; S – площадь поперечного сечения выработки, м²; ρ – плотность взрываемых горных пород, кг/м³; $l_{ш}$ – длина шпура, м; N – количество одновременно взрываемых шпуров; k_1 – безразмерный коэффициент, учитывающий крепость горных пород и конструкцию заряда ВВ (для крепости пород 2–5 значение коэффициента близко к единице); a – коэффициент турбулентной структуры свободных струй (значение лежит в пределах 0,08–0,14); b – газовость ВВ, м³/кг.

Следует отметить, что значения длины зоны отброса газов для одной и той же выработки, посчитанные по этим формулам, могут отличаться в несколько раз, а в некоторых случаях значения могут иметь отличия в несколько порядков, и поэтому применимость указанных формул нужно определять в каждом конкретном

случае. В связи с этим в настоящей работе был принят другой подход для исследования эволюции средней концентрации примеси в тупиковой выработке.

При нагнетательном способе проветривания тупиковой выработки в объеме вблизи забоя создается вихревая область с разнонаправленным движением воздуха, в которой происходит перемешивание чистого и загазованного воздуха за счет интенсивного перемешивания воздушных потоков, движущихся в режиме развитой турбулентности. В настоящей работе эта область называется зоной смешения и рассчитывается как объем выработки, ограниченный грудью забоя и сечением выработки, после которого движение воздуха всюду направлено к устью выработки. Таким образом, время, необходимое для проветривания тупиковой выработки после взрывных работ, рассчитывается как сумма времени разбавления концентрации вредных газов до ПДК в зоне смешения и времени однократного воздухообмена в оставшемся объеме проветриваемой выработки.

Эволюция средней концентрации газов $C(t)$ в зоне смешения V_{3C} описывается моделью Воронина [1], представляющей уравнение баланса массы примеси в объеме зоны смешения с начальным условием:

$$\begin{cases} \frac{dC(t)}{dt} - K \frac{Q}{V_{3C}} C(t) = 0; \\ C(0) = C_0 = \frac{A \cdot b}{V_{3C}}, \end{cases} \quad (1)$$

где K – коэффициент эффективности проветривания; Q – расход воздуха, выходящий из воздуховода, $\text{м}^3/\text{с}$, задается согласно проекту организации работ или паспорту проветривания; A – масса одновременно взываемого ВВ, кг, задается согласно проекту или паспорту взрывных работ; b – газовость ВВ, $\text{м}^3/\text{кг}$, задается согласно техническим условиям (ТУ) на взрывчатое вещество.

Решением системы уравнений (1) является экспоненциальная функция:

$$C(t) = C_0 \exp\left(-\frac{K \cdot Q}{V_{3C}} t\right). \quad (2)$$

В полученном решении фигурируют два неизвестных параметра: коэффициент эффективности проветривания и объем зоны смешения. Для их оценки была

разработана трехмерная численная модель проветривания тупиковой выработки на основе методов вычислительной гидродинамики.

Численное моделирование процесса проветривания тупиковой выработки после взрывных работ

Параметры исходной модели следующие: сечение тупиковой выработки – арочное, площадь сечения 17 м^2 , длина выработки – 50 м; воздуховод находится вблизи стенки у кровли выработки, диаметр воздуховода – 1 м, скорость воздушной струи на выходе из воздуховода – 10 м/с, расстояние между забоем выработки и концом воздуховода – 10 м (рис. 2).

В модели использовалась модель турбулентности standard $k-\varepsilon$ с масштабируемой пристеночной функцией. После проведения серии тестовых расчетов на независимость решения от плотности сетки было выбрано разбиение расчетной области на сетку, состоящую из 3,8 млн элементов, уплотнением вблизи стенок выработки и воздуховода, шаг по времени 0,5 секунды (рис. 3). Величина безразмерного расстояния от стенки до центра первой ячейки u^+ в среднем составляет около 40, не превышая значения 180.

Полученная модель использовалась в дальнейшем для исследования зависимости времени проветривания тупиковой выработки от трёх параметров: площади сечения выработки S , отставания трубопровода от груди забоя $L_{\text{от}}$, расхода воздуха на выходе из воздуховода Q . Пространство параметров модели представлено на рис. 4. При исследовании влияния каждого параметра два других фиксировались. Фиксируемые параметры обозначены красным цветом. В общей сложности было разработано и рассчитано 27 конфигураций.

На первом этапе исследования были определены объемы зон смешения для различных конфигураций варьируемых параметров. Получена эмпирическая формула для определения объема зоны смешения:

$$\begin{aligned} L_{3C} &= L_{\text{от}} + 4d_{\text{п}}, \\ V_{3C} &= S \cdot L_{3C}, \end{aligned}$$

где L_{3C} – длина зоны смешения, отсчитываемая от забоя выработки, м; $L_{\text{от}}$ – расстояние от груди забоя до конца вентиляционного трубопровода, м; $d_{\text{п}}$ – приведенный диаметр выработки, м; S – сечение выработки, м^2 .

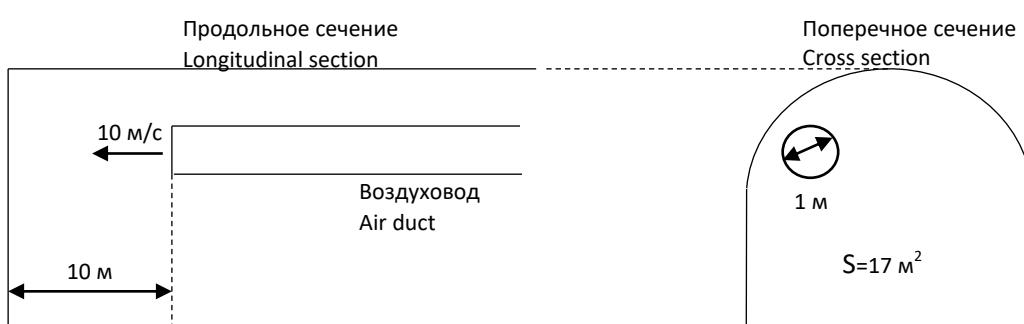


Рис. 2. Схема призабойной части проветриваемой тупиковой выработки
 Fig. 2. Scheme of dead-end heading face

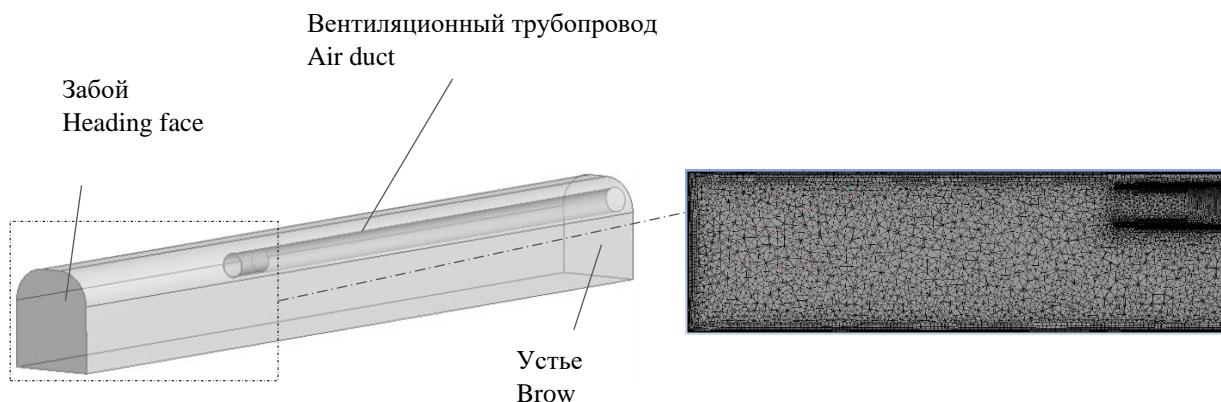


Рис. 3. Геометрия области и расчётная сетка модели тупиковой выработки
 Fig. 3. Geometry and meshing of the dead-end heading model

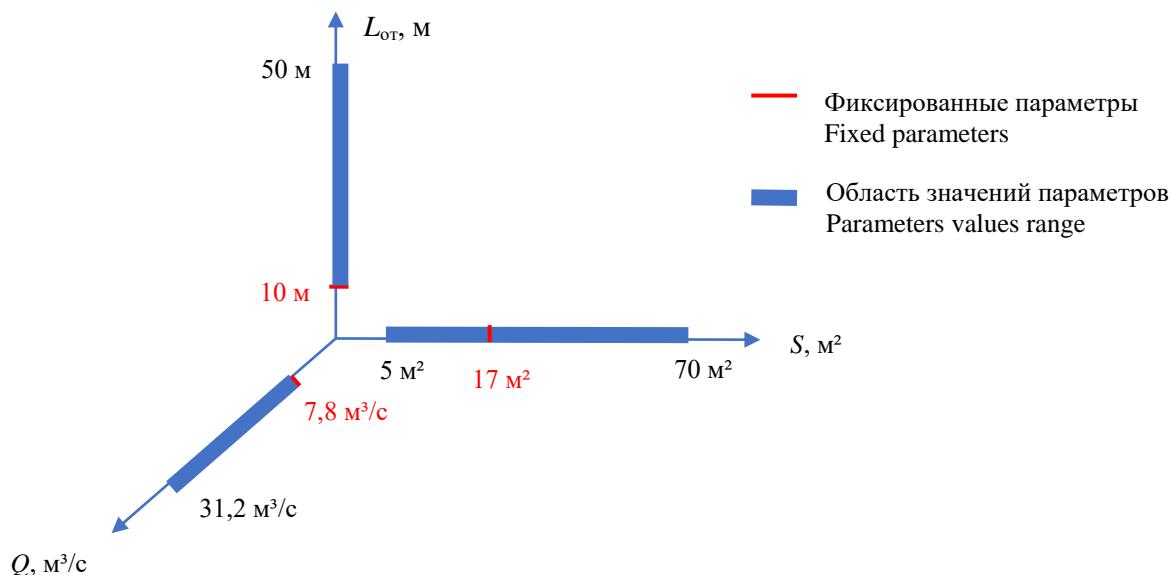


Рис. 4. Пространство параметров модели
 Fig. 4. Model parameters

Приведенный диаметр выработки рассчитывается по следующей формуле:

$$d_p = 4 \frac{S}{P},$$

где P – периметр выработки, м.

В каждой модели в начальный момент времени в зоне смешения задавалась начальная средняя концентрация газовой примеси, образующаяся после взрыва ВВ с газовостью $0,022 \text{ м}^3/\text{кг}$. Удельная масса ВВ составляет $19,4 \text{ кг}/\text{м}^3$.

Ниже представлены результаты моделирования в один из моментов времени: на рис. 5 – поле концентрации газов в продольном срезе через центр воздуховода, на рис. 6 – линии тока воздуха в расчетной области. В призабойной зоне образуется крупномасштабный вихрь, от формы и размеров которого зависит эффективность выноса вредных примесей, и со-

ответственно значение коэффициента эффективности выноса примесей K .

Выводы

1. В результате моделирования во всех исследуемых моделях был подтвержден экспоненциальный закон уменьшения средней концентрации примеси в зоне смешения (2).
2. Для исследования зависимости времени проветривания зоны смешения от длины зоны отброса газов были рассчитаны модели с длиной зоны отброса газов 1 м и длиной, равной длине зоны смешения (при этом массы и газовость ВВ оставались прежние). Времена проветривания зон смешения до ПДК отличались от времён проветривания в исходных моделях в пределах 5 %.

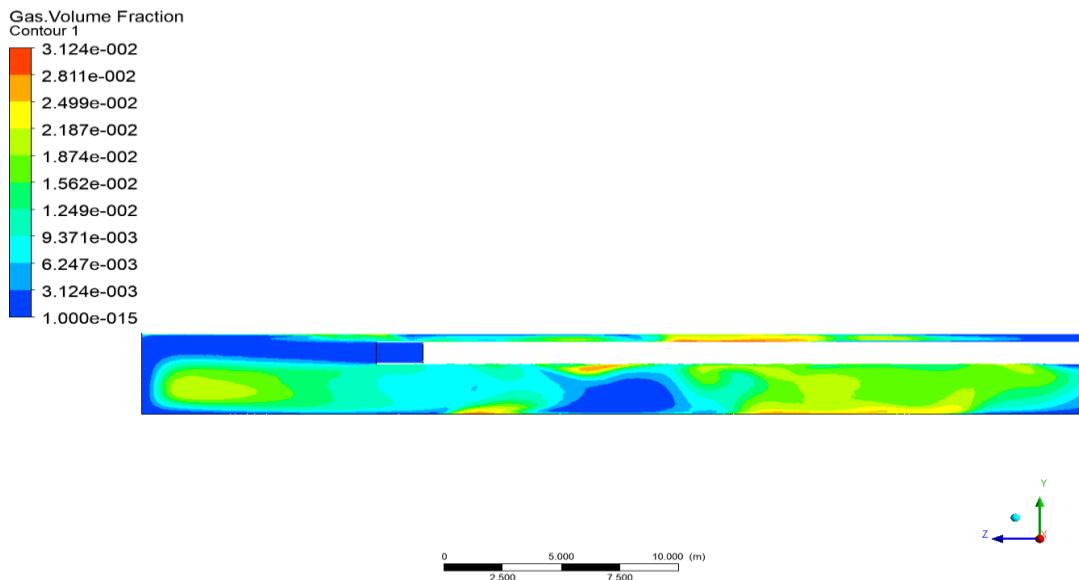


Рис. 5. Поле концентрации газов. Продольное сечение через центр воздуховода
 Fig. 5. Gas concentration field. Longitudinal cross section through the air duct center

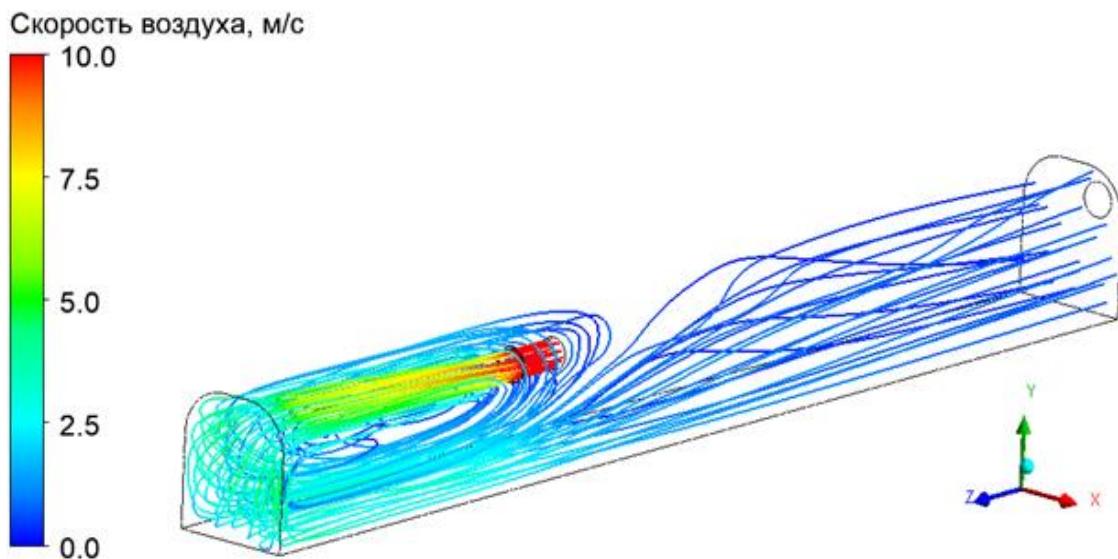


Рис. 6. Линии тока воздуха
 Fig. 6. Air streamlines

Таким образом, нет необходимости оценивать длину зоны отброса газов, достаточно считать только начальную среднюю концентрацию в зоне смещения по формуле:

$$C(0) = \frac{A b}{V_{sc}}.$$

3. Были получены следующие свойства коэффициента эффективности проветривания K :
 - Коэффициент K принимает постоянное значение для данной конфигурации параметров модели.
 - Коэффициент K не зависит ни от расхода входящего свежего воздуха, ни от начальной концентрации вредной примеси, ни от длины зоны отброса газов.
 - Коэффициент K зависит от площади сечения выработки (рис. 7) и расстояния от конца трубопровода до забоя (рис. 8), т. е. только от

геометрических параметров модели. Результаты моделирования указывают на сильно нелинейную зависимость коэффициента эффективности проветривания K как от сечения проветриваемой выработки, так и от отставания трубопровода от груди забоя, что не позволяет привести простую расчетную формулу для вычисления значения коэффициента K от указанных параметров. Любые изменения сечения выработки, расстояния от конца трубопровода до груди забоя, расположения трубопровода (в центре или с краю), а также сечения воздушной струи будут приводить к перестроению структуры крупномасштабных вихрей в большей или меньшей степени, что неизбежно будет отражаться на величине K .

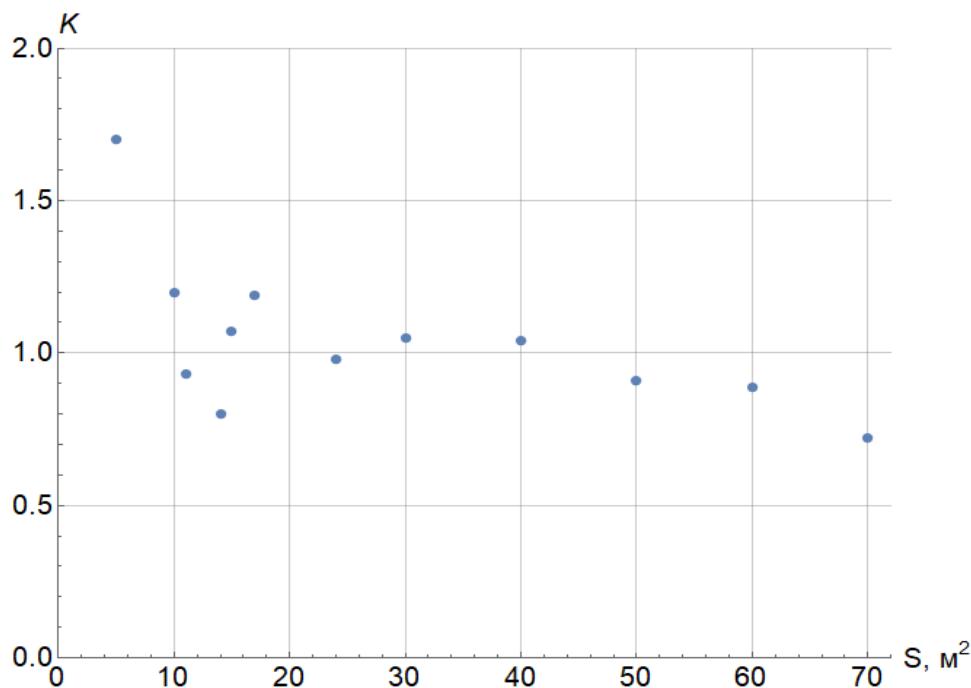


Рис. 7. Зависимость коэффициента эффективности проветривания K от сечения тупиковой выработки при отставании трубопровода 10 м

Fig. 7. Ventilation efficiency coefficient K versus cross section area of the dead-end heading relationship. Distance from heading face to air duct is 10 meters

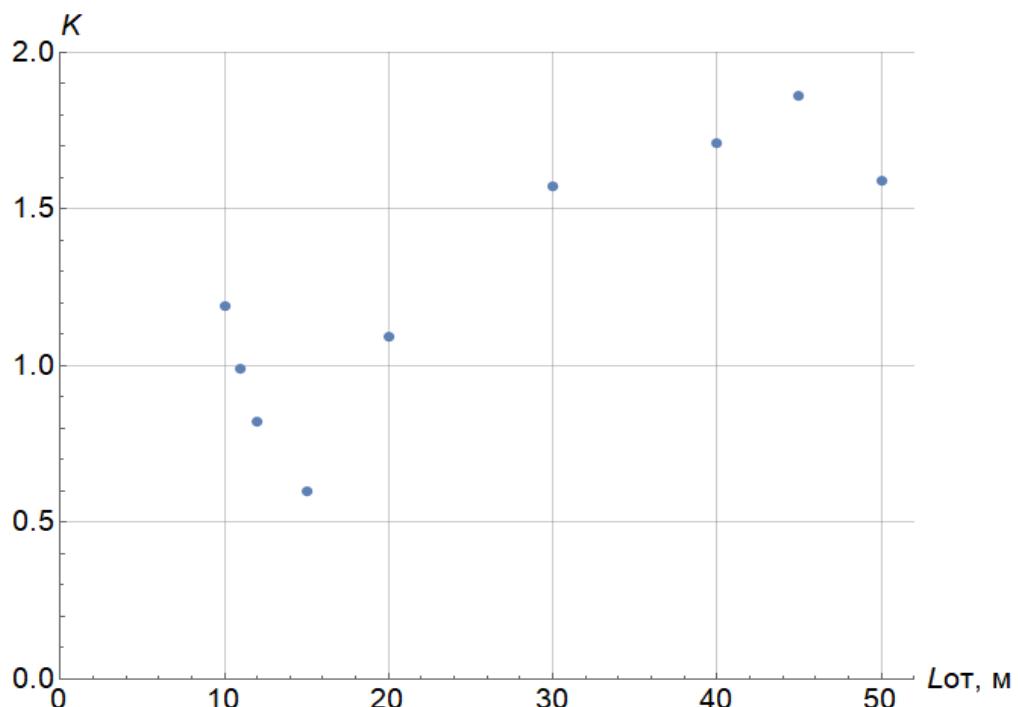


Рис. 8. Зависимость коэффициента эффективности проветривания K от расстояния от конца трубопровода до забоя для выработки сечением 17 m^2

Fig. 8. Ventilation efficiency coefficient K versus distance from the heading face to the air duct relationship. Cross section area of the dead-end heading is 17 m^2

4. Зависимость коэффициента эффективности проветривания K от расстояния от конца трубопровода до забоя, отображенная на рис. 8, указывает на то, что с точки зрения проветривания для выработки сечением 17 m^2 наиболее эффективным яв-

ляется расстояние 45 м. Для выработок с другим сечением, с другим размером и расположением трубопровода эффективное расстояние будет иметь другое значение. В каждом отдельном случае необходимо корректировать модель и делать

расчеты с учетом новой конфигурации. Следует отметить, что увеличение расстояния от конца трубопровода до забоя позволит сократить трудозатраты на монтаж трубопровода и ускорит выполнение основных операций по проходке выработки.

- Поскольку значения коэффициента K для исследуемого пространства параметров лежат в интервале от 0,6 до 1,86, то для инженерных расчетов (например, при оценке времени проветривания выработки после взрывных работ или при расчете количества воздуха, требуемого для проветривания выработки

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Воронин В.Н. Основы рудничной аэро-газодинамики. – М.-Л.: Углехиздат, 1951. – 491 с.
- Computational fluid dynamics applied to mining engineering: a review / G. Xu, K.D. Luxbacher, S. Ragab, J. Xu, X. Ding // International Journal of Mining, Reclamation and Environment. – 2016. – V. 31. – № 4. – P. 251–275.
- Tariq F., Bekir G. Evaluation of line brattice length in an empty heading to improve air flow rate at the face using CFD // International Journal of Mining Science and Technology. – 2017. – V. 27. – P. 253–259.
- Conventional and numerical models of blasting gas behaviour in auxiliary ventilation of mining headings / S. Torno, J. Torano, M. Ulecia, C. Allende // Tunnelling and Underground Space Technology. – 2013. – V. 34. – P. 73–81.
- Studying operational improvements in blast gas clearing using ventilation control / R. Carriere, C. McGuire, E. McLaren, D. Witow // Proceedings of the 16th North American mine ventilation Symposium. – Colorado, USA, 2017. – P. 19.7–19.16.
- Исследование динамики пылевоздушной смеси при проветривании тупиковой выработки в процессе работы комбайновых комплексов / Л.Ю. Левин, А.Г. Исаевич, М.А. Семин, Р.Р. Газизуллин // Горный журнал. – 2015. – № 1. – С. 72–75.
- Колесов Е.В. Обоснование последовательного проветривания рабочих зон нескольких тупиковых выработок // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. – Пермь, 2018. – Вып. 16. – С. 291–295.
- Ушаков К.З. Газовая динамика шахт. – М.: Изд-во МГГУ, 2004. – 481 с.
- Roghanch P., Kocsis K.C. Improving the climatic conditions in development and production workings of hot underground mines by re-designing the auxiliary ventilation system: a case study // International Journal of Mining and Mineral Engineering. – 2017. – V. 8 (4). – P. 280–293.
- Konduri I.M., McPherson M.J., Topuz E. Experimental and numerical modeling of jet fans for auxiliary ventilation in mines // Proceedings of the 6th International Mine Ventilation Symposium. – Pittsburgh, PA, USA, 1997. – P. 505–510.
- Zhang X., Zhang Y., Tien J.C. The efficiency study of the push-pull ventilation system in underground mine // Proceedings of the 2011 Underground Coal Operators' Conference. – Wollongong, NSW, Australia, 2011. – P. 225–230.
- Ray R.E., Gilbey M.J., Kumar P. The application of vertically-mounted jet fans in ventilation shafts for a rail overbuild // Proceedings of the 12th North American mine ventilation Symposium. – Reno, NV, 2008. – P. 415–424.
- Panigrahi D.C., Mishra D.P. CFD simulations for the selection of an appropriate blade profile for improving energy efficiency in axial flow mine ventilation fans // International Journal of Sustainable Future for Human Security. – 2014. – V. 13 (1). – P. 15–21.
- Hargreaves D.M., Lowndes I.S. The computational modeling of the ventilation flows within a rapid development drivage // Tunnelling and Underground Space Technology. – 2007. – V. 22. – P. 150–160.
- Silvester S.A. The integration of CFD and VR methods to assist auxiliary ventilation practice. PhD thesis. – Nottingham, 2002. – 301 p.
- Auxiliary ventilation in mining roadways driven with roadheaders: validated CFD modelling of dust behavior / J. Torano, S. Torno, M. Menendez, M. Gent // Tunnelling and Underground Space Technology. – 2011. – V. 26. – P. 201–210.
- CFD simulation of blasting dust for the design of physical barriers / S. Torno, J. Torano, M. Menendez, M. Gent // Environmental Earth Sciences. – 2010. – V. 64. – P. 73–83.
- Mine face ventilation: a comparison of CFD results against benchmark experiments for the CFD code validation / A.M. Wala, S. Vytlia, C.D. Taylor, G. Huang // Mineral Engineering. – 2007. – V. 59. – P. 49–55.
- A practical use of CFD for ventilation of underground works / I. Diego, S. Torno, J. Torano, M. Menendez, G. Malcolm // Tunnelling and Underground Space Technology. – 2011. – V. 26. – P. 189–200.
- Diego I., Torno S., Toraco J. CFD simulation of aerodynamic resistance in underground spaces ventilation // WIT Transactions on The Built Environment. – 2008. – V. 102. – P. 12–23.

за определенное время) в случае отсутствия исходных данных следует принимать наименьшее значение 0,6, которое соответствует наименее эффективному выносу вредных примесей, что обеспечит дополнительный запас по времени проветривания или по требуемому количеству воздуха для проветривания тупиковой выработки.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-35-90076.

Работа выполнена при поддержке Программы ФНИ, проект № 0422-2019-0145-С-01.

Поступила 29.01.2020 г.

Информация об авторах

Колесов Е.В., младший научный сотрудник лаборатории математического моделирования геотехнических процессов Горного института УрО РАН.

Казаков Б.П., доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник отдела аэрометрии и теплофизики Горного института УрО РАН.

UDC 622.4

EFFICIENCY OF VENTILATION OF DEAD-END DEVELOPMENT HEADINGS AFTER BLASTING OPERATIONS

Evgeniy V. Kolesov¹,
kolesovev@gmail.com

Boris P. Kazakov¹,
aero_kaz@mail.ru

¹ Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
78a, Sibirskaya street, Perm, 614007, Russia.

The relevance of the research is caused by the need to improve the ventilation system of dead-end headings, labor reduction for their ventilation, speeding up basic mining operations.

The main aim of the research is to determine the effective ventilation parameters of a dead-end heading.

Object of the research is the ventilation system of dead-end heading.

Method of the research is multiparameter three-dimensional numerical simulation based on computational fluid dynamics methods.

The paper introduces the results of three-dimensional numerical simulation of gas dilution in a dead-end heading. The variable parameters of the model are the initial concentration and distribution of toxic gases in the dead-end heading after blasting operations, the distance from the dead-end heading to the air duct, the cross section area of the dead-end heading, as well as the flow rate of fresh air entering through the air duct. The calculation formula for determining the volume of the mixing zone is obtained. It was shown that the airing time of the dead-end heading does not depend on the length of the gas plug, but depends on the initial average concentration of toxic gases in the mixing zone. The values of the dimensionless efficiency coefficient K of a dead-end heading ventilation are obtained. It is shown that the coefficient K is independent on the amount of incoming fresh air flow, and depends only on the geometric parameters of the ventilation system of the dead-end heading and takes a constant value for this configuration of the ventilation system. It is shown that there is an optimal distance from the air duct to the heading face, at which the most effective removal of toxic gases occurs.

Key words:

Blasting operations, CFD modelling, dead-end heading, ventilation efficiency, mixing zone, gas concentration.

The reported study was funded by RFBR, project number 19-35-90076.

This study was supported by the The Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation as part of a basic research program No. 0422-2019-0145-C-01.

REFERENCES

1. Voronin V.N. *Osnovy rudnichnoy aero-gazodinamiki* [Fundamentals of mine aero-gas dynamics]. Moscow; Leningrad, Ugletekhnizdat Publ., 1951. 491 p.
2. Xu G., Luxbacher K.D., Ragab S., Xu J., Ding X. Computational fluid dynamics applied to mining engineering: a review. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 2016, vol. 31, no. 4, pp. 251–275.
3. Tariq F., Bekir G. Evaluation of line brattice length in an empty heading to improve air flow rate at the face using CFD. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2017, vol. 27, pp. 253–259.
4. Torno S., Torano J., Ulecia M., Allende C. Conventional and numerical models of blasting gas behaviour in auxiliary ventilation of mining headings. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2013, vol. 34, pp. 73–81.
5. Carriere R., McGuire C., McLaren E., Witow D. Studying operational improvements in blast gas clearing using ventilation control. *Proc. of the 16th North American mine ventilation Symposium*. Colorado, USA, 2017. pp. 19.7–19.16.
6. Levin L.Yu., Isaevich A.G., Semin M.A., Gazizullin R.R. Issledovanie dinamiki pylevozdushnoy smesi pri provertrivaniyu tupikovoy vyrabotki v protsesse raboty kombaynovykh kompleksov [Investigation of the dynamics of the dust-air mixture during ventilation of the dead-end heading during the operation of combine complexes]. *Gorny zhurnal*, 2015, no. 1, pp. 72–75.
7. Kolesov E.V. Obosnovanie posledovatel'nogo provertrivaniya rabochikh zon neskolkikh tupikovykh vyrabotok [Justification of sequential ventilation of several dead-end workings working areas]. *Strategiya i protsessy osvoeniya georesursov. Sbornik nauchnykh trudov*, 2018, vol. 16. pp. 291–295.
8. Ushakov K.Z. *Gazovaya dinamika shakht* [Gas dynamics of mines]. Moscow, MGGU Publ., 2004. 481 p.
9. Roghanch P., Kocsis K.C. Improving the climatic conditions in development and production workings of hot underground mines by re-designing the auxiliary ventilation system: a case study. *International Journal of Mining and Mineral Engineering*, 2017, vol. 8 (4), pp. 280–293.
10. Konduri I.M., McPherson M.J., Topuz E. Experimental and numerical modeling of jet fans for auxiliary ventilation in mines. *Proc. of the 6th International Mine Ventilation Symposium*. Pittsburgh, PA, USA, 1997. pp. 505–510.
11. Zhang X., Zhang Y., Tien J.C. The efficiency study of the push-pull ventilation system in underground mine. *Proc. of the 2011 Underground Coal Operators' Conference*. Wollongong, NSW, Australia, 2011. pp. 225–230.
12. Ray R.E., Gilbey M.J., Kumar P. The application of vertically-mounted jet fans in ventilation shafts for a rail overbuild. *Proc. of the 12th North American mine ventilation Symposium*. Reno, NV, 2008. pp. 415–424.
13. Panigrahi D.C., Mishra D.P. CFD simulations for the selection of an appropriate blade profile for improving energy efficiency in axial flow mine ventilation fans. *International Journal of Sustainable Future for Human Security*, 2014, vol. 13 (1), pp. 15–21.
14. Hargreaves D.M., Lowndes I.S. The computational modeling of the ventilation flows within a rapid development drivage. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2007, vol. 22, pp. 150–160.
15. Sylvester S.A. *The integration of CFD and VR methods to assist auxiliary ventilation practice*. PhD thesis. Nottingham, 2002. 301 p.
16. Torano J., Torno S., Menendez M., Gent M. Auxiliary ventilation in mining roadways driven with roadheaders: Validated CFD

- modelling of dust behavior. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2011, vol. 26, pp. 201–210.
17. Torno S., Torano J., Menendez M., Gent M. CFD simulation of blasting dust for the design of physical barriers. *Environmental Earth Sciences*, 2010, vol. 64, pp. 73–83.
18. Wala A.M., Vyta S., Taylor C.D., Huang G. Mine face ventilation: a comparison of CFD results against benchmark experiments for the CFD code validation. *Mineral Engineering*, 2007, vol. 59, pp. 49–55.
19. Diego I., Torno S., Torano J., Menendez M., Malcolm G. A practical use of CFD for ventilation of underground works. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2011, vol. 26, pp. 189–200.
20. Diego I., Torno S., Toraco J. CFD simulation of aerodynamic resistance in underground spaces ventilation. *WIT Transactions on the Built Environment*, 2008, vol. 102, pp. 12–23.

Received: 29 January 2020.

Information about the authors

Evgeniy V. Kolesov, junior researcher, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

Boris P. Kazakov, Dr. Sc., professor, chief researcher, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

УДК 552.144; 551.35

АУТИГЕННЫЕ МИНЕРАЛЫ В ДОННЫХ ОСАДКАХ СИПОВЫХ ОБЛАСТЕЙ МОРЯ ЛАПТЕВЫХ

Рубан Алексей Сергеевич¹,
ruban@tpu.ru

Рудмин Максим Андреевич¹,
rudminma@tpu.ru

Гершелис Елена Владимировна¹,
elenapanova@tpu.ru

Леонов Андрей Андреевич^{1,2},
laa91@tpu.ru

Мазуров Алексей Карпович¹,
akm@tpu.ru

Дударев Олег Викторович³,
dudarev@poi.dvo.ru

Семилетов Игорь Петрович^{3,1},
ipsemiletov@alaska.edu

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

² Институт сильноточной электроники СО РАН,
Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 2/3.

³ Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН,
Россия, 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43.

Метановые сипы являются широко распространенным явлением, наблюдаемым на шельфах и континентальных склонах внутренних и окраинных морей по всему миру, в том числе и в море Лаптевых. Ключевыми биогеохимическими процессами, протекающими в донных осадках этих районов, являются анаэробное окисление метана в сочетании с бактериальной сульфатредукцией. Оба этих процесса контролируют образование специфической аутигенной минерализации.

Целью настоящей работы является изучение аутигенных минералов донных осадков с аномально высокими концентрациями метана, отобранных на двух сиповых участках в северо-восточной части моря Лаптевых, для определения признаков их идентификации в древних осадочных породах. Приведены результаты литологических и минералогических исследований донных осадков.

Было установлено, что основными аутигенными минералами в исследованных образцах донных осадков, отобранных с двух сиповых участков в северо-восточной части моря Лаптевых, являются магнезиальный кальцит, гипс и пирит. Разная специфика аутигенной минерализации, предположительно, указывает на различия в режимах миграции метан-содержащих флюидов на этих участках. Временное снижение интенсивности просачивания метана в пределах «восточного сипа» способствовало насыщению поровой воды ионами SO_4^{2-} и Ca^{2+} и, как следствие, осаждению гипса. Близповерхностное положение сульфат-метановой транзитной зоны в «западном сипе», обусловленное высокими потоками метана, благоприятствовало осаждению магнезиального кальцита в верхних горизонтах донных осадков. Присутствие пирита в осадках как восточного, так западного сиповых участков является свидетельством активности процесса бактериальной сульфат-редукции при анаэробном окислении метана.

Ключевые слова:

Диагенез, метановые сипы, анаэробное окисление метана, кальцит, гипс, пирит, Арктика, море Лаптевых.

Введение

Метановые сипы являются широко распространенным явлением, которое наблюдается на шельфах и континентальных склонах внутренних и окраинных морей по всему миру [1–8], в том числе и в арктических морях [9–12]. Они представляют собой отдельные участки морского дна, в пределах которых химически неравновесные с морской водой флюиды, обогащенные метаном, просачиваясь через толщу отложений, высвобождаются на границе донные осадки – вода [13–15]. Одним из известных районов метановых сипов на территории Арктики является море Лаптевых [16, 17]. В море Лаптевых зоны массированной разгрузки метана впервые были зарегистрированы в 2011 г. в мелководных частях (глубины около 70 м) к северо-западу от Новосибирских островов [18].

Активность просачивания флюидов носит переменный временной характер, что приводит к значи-

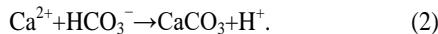
тельным изменениям физико-химических условий диагенеза [19–21], а также к вертикальному смещению биогеохимических зон [22, 23]. Ключевыми биогеохимическими процессами, протекающими в донных осадках сиповых областей, являются анаэробное окисление метана (АОМ) в сочетании с бактериальной сульфатредукцией (БСР) [14, 23, 24–26] (1).



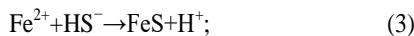
Филогенетический состав консорциума метанотрофных архей (ANME) и сульфат-редуцирующих бактерий (SRB) варьирует в зависимости от концентраций метана и сульфата, температуры, а также доступности кислорода [3]. Известно, что АОМ играет важную роль в глобальном цикле углерода, т. к. является одним из естественных механизмов, ограничивающих поступление метана в атмосферу [10].

Вследствие АОМ возникает избыток продуцируемого растворенного неорганического углерода, а так-

же увеличивается щёлочность поровой воды. Это способствует осаждению аутигенного карбоната, характеризующегося относительно легким изотопным составом [27–33] (2).



Благодаря АОМ сульфат, содержащийся в поровой воде, восстанавливается до сероводорода [24]. Этот процесс приводит к тому, что в сульфат-метановой транзитной зоне, происходит осаждение сульфидов железа, в частности фрамбоидов пирита (3), (4) [30, 34].



Помимо карбонатных и сульфидных минералов в зонах просачивания метана также часто встречается сульфаты (барит, гипс, бассанит). В условиях холодного просачивания метана формирование аутигенных минералов происходит в различных физико-химических условиях, и известно лишь несколько случаев, когда данные минеральные формы встречаются вместе [2].

Понимание специфических дигенетических режимов областей морских метановых дегазаций, влияющих на ассоциацию и состав аутигенных минералов, послужит основой для выработки критериев реконструкции подобных геологических процессов в древних осадочных бассейнах. Целью настоящей работы являлось изучение аутигенной минерализации донных осадков с аномально высокими концентрациями метана, отобранных на двух сиповых участках в северо-восточной части моря Лаптевых, для определения признаков их идентификации в древних осадочных породах.

Фактический материал и методы исследований

В работе представлены результаты литологических и минералогических исследований донных осадков. Фактическим материалом для данного исследования послужили пробы осадков (21 шт.) с горизонта 2–5 см, отобранные с помощью коробчатых бокскореров во время экспедиции в море Лаптевых на НИС «Академик М.А. Лаврентьев» (2016 г., 78 рейс) и «Академик Мстислав Келдыш» (2018 г., 73 рейс; рис. 1).

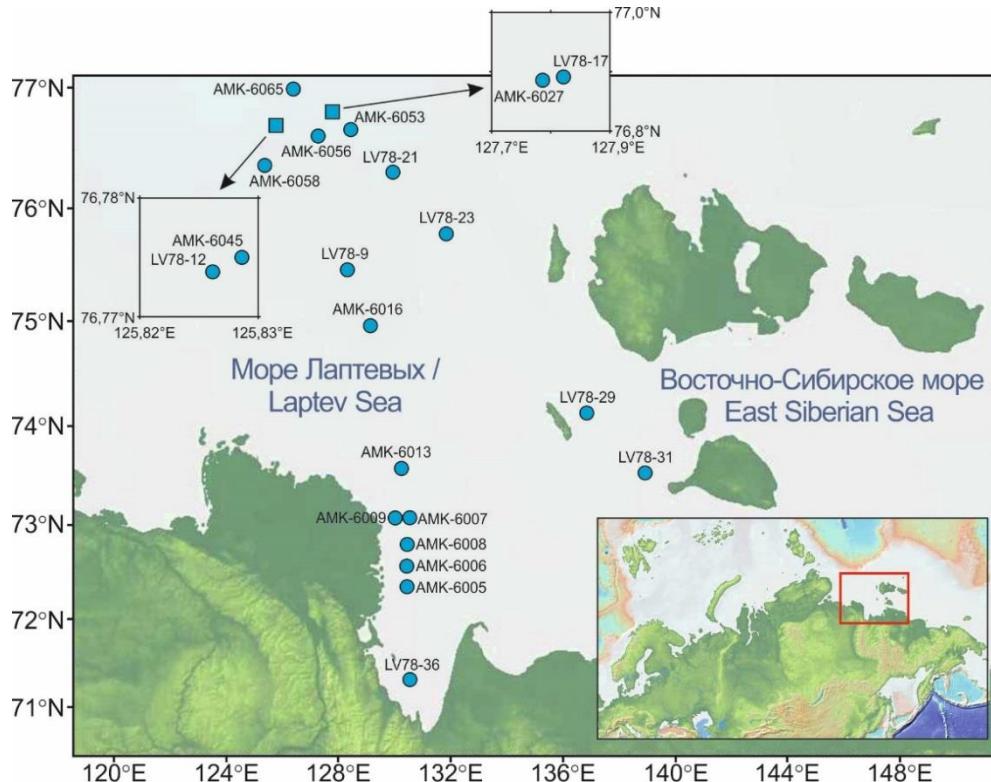


Рис. 1. Карта расположения станций отбора проб донных осадков в море Лаптевых

Fig. 1. Map of location of the stations for sampling bottom sediments in the Laptev Sea

Минералогические исследования выполнялись с использованием метода рентгенодифракционного анализа в сочетании со сканирующей электронной микроскопией. Общий минералогический состав донных осадков определялся с помощью рентгеновского дифрактометра Bruker D2 Phaser с Cu-анодом при напряжении рентгеновской трубки 30 кВ и силе тока 10 мА. Предварительно высушенные пробы истирались в кольцевой мельнице (ROCKLABS Standard

Ring Mill) в течение 2 минут при частоте вращения 700 об/мин. Углы съемки 2-тета при валовом анализе состава пробы составляли от 5 до 70°, вращение 20 об./мин, выдержка 2 секунды в точке, шаг 0,02°. Сканирующая электронная микроскопия проводилась с использованием сканирующего электронного микроскопа TESCAN VEGA 3 SBU, оснащенного детектором для рентгенофлуоресцентного энергодисперсионного анализа (ЭДС) OXFORD X-Max 50. Подго-

товленные образцы (полированные шашки-брекеты и насыпанные тонким слоем на двухсторонний электропроводящий углеродный скотч пробы донных осадков) напылялись углеродом (15 нм) и исследовались при ускоряющем напряжении 20 кВ и интенсивности тока зонда в пределах 5...15 нА.

Для определения гранулометрических характеристик донных осадков использовался лазерный анализатор размеров частиц SALD-7101 (Shimadzu). При проведении анализа навеска исследуемой пробы помещалась в ванну смесителя с дистиллированной водой и диспергировалась при помощи ультразвуковой установки (40 Вт, 40 кГц). Измерения были выполнены в проточной ячейке.

Результаты

Литотипы донных осадков

По результатам гранулометрического анализа донных осадков в их литологическом составе было выделено три размерные фракции – песчаная (0,3–0,063 мм), алевритовая (0,063–0,002 мм) и пелитовая (<0,002). Согласно трехкомпонентной классификации [35] в зависимости от процентного содержания фракций основным литотипом исследуемых осадков является алеврит (таблица). Единственным исключением служит образец алевритового песка, отобранный на станции LV78-31, которая расположена напротив западной оконечности о. Большой Ляховский – м. Кигилях (рис. 1). Батиметрическая отметка на этой станции составляет 16 м. Это указывает на отсутствие четко выраженной зависимости между литологическими типами осадков и глубиной моря, т. к. на станциях AMK-6005 и LV78-36 с подобными глубинами встречаются алевриты, песчаная фракция в которых редуцирована до 0 %. Присутствие песка на станции LV78-31 может являться следствием локального воздействия придонных течений, размывающих донные осадки [36].

Пелитовые осадки (содержание фракции <0,002 мм более 70 %) среди исследуемых образцов отсутствуют. Максимальное содержание пелитовой фракции отмечено в образце, отобранном на станции AMK-6056, и составляет 34,9 %. Следует отметить, что несмотря на относительно большие глубины – 251 м, содержание пелитовой фракции в образце AMK-6065 лимитировано и составляет 9,6 %. Донные осадки, отобранные в пределах сиповых участков (ст. AMK-6027, AMK-6045, LV78-17 и LV78-12), представлены плотным алевритом черного цвета с отчетливо выраженным запахом сероводорода (H_2S). Для станций AMK-6045 и LV78-12 характерно отсутствие окисленного слоя.

Общий минеральный состав

Минеральный состав исследуемых образцов представлен преимущественно кварцем, полевыми шпатами (включая плагиоклаз и КПШ) и глинистыми минералами (иллит+хлорит+монтмориллонит) (рис. 2). В подчиненном количестве присутствуют амфиболы, содержание которых в среднем не превышает 3 % (за

исключением образца LV78-23, где их концентрация увеличивается до 4,5 %). Суммарное содержание кварца и полевых шпатов варьирует в диапазоне 50,6...90,1 %, среднее – 74,2 %. Разброс значений кварц-полевошпатового отношения ($Qz/Fsp=0,6-2,5$) отражает переменное доминирование кварца и полевых шпатов и может указывать на наличие нескольких источников терригенного материала.

Таблица. Гранулометрический состав донных осадков (горизонт 2–5 см) восточной части моря Лаптевых

Table. Granulometric composition of bottom sediments (depth 2–5 cm) from the eastern part of the Laptev Sea

| Станция Station | Глубина, м Depth, m | Песок Sand | Алеврит Silt | Пелит Clay | Литологический типа Lithological type |
|--------------------|---------------------------|---------------|-----------------|---------------|---|
| AMK-6005 | 14,5 | 0,1 | 90,9 | 9,0 | Алеврит/Silt |
| AMK-6006 | 18,5 | 0,0 | 88,8 | 11,2 | |
| AMK-6007 | 24,3 | 0,1 | 86,9 | 13,0 | |
| AMK-6008 | 22,0 | 0,0 | 89,1 | 10,9 | |
| AMK-6009 | 24,0 | 0,0 | 87,6 | 12,4 | |
| AMK-6013 | 23,5 | 0,0 | 81,0 | 19,0 | |
| AMK-6016 | 40,0 | 0,2 | 88,6 | 11,2 | |
| AMK-6027 | 64,0 | 0,1 | 89,1 | 10,8 | |
| AMK-6045 | 72,0 | 0,0 | 86,7 | 13,3 | |
| AMK-6053 | 65,0 | 0,0 | 79,4 | 20,6 | |
| AMK-6056 | 62,0 | 0,0 | 65,1 | 34,9 | Алеврит пелитовый Clayed silt |
| AMK-6058 | 52,0 | 0,0 | 83,2 | 16,8 | Алеврит/Silt |
| AMK-6065 | 251,0 | 21,1 | 69,3 | 9,6 | Алеврит песчаный Sandy silt |
| LV78-9 | 44,0 | 0,0 | 87,3 | 12,7 | Алеврит/Silt |
| LV78-12 | 72,0 | 0,0 | 88,6 | 11,4 | |
| LV78-17 | 64,0 | 0,4 | 80,6 | 19,0 | |
| LV78-21 | 56,0 | 5,3 | 82,1 | 12,6 | |
| LV78-23 | 22,0 | 0,0 | 83,4 | 16,6 | |
| LV78-29 | 20,0 | 33,7 | 58,4 | 7,9 | Алеврит песчаный Sandy silt |
| LV78-31 | 16,0 | 55,3 | 44,7 | 0,0 | Песок алевритовый Silty sand |
| LV78-36 | 16,0 | 0,0 | 88,9 | 11,1 | Алеврит/Silt |

Среди глинистых минералов во всех исследуемых образцах преобладает иллит. Его содержание варьирует от 2,6 до 33,8 %. В целом содержание глинистых минералов изменяется в пределах 5,2–47,9 %: максимальное отмечается в образце AMK-6006, отобранном вблизи дельты р. Лены напротив Трофимовской протоки, минимальное – в образце со станции LV78-23, расположенной в центральной части исследуемого района к западу от о. Бельковский (рис. 1). В образце AMK-6065, отобранном в самой северной и глубоководной части района, содержание глинистых минералов составляет 14,7 %. Как видно из рис. 1 и таблицы, батиметрические отметки на станциях и удаленность последних от береговой линии, в данном случае, не являются главными факторами, контролирующими содержание глинистых минералов. Литологический состав осадков, а именно процентное содержанием пелитовой фракции, также не коррелируют с суммарным содержанием глинистых минералов ($R^2=0,24$).

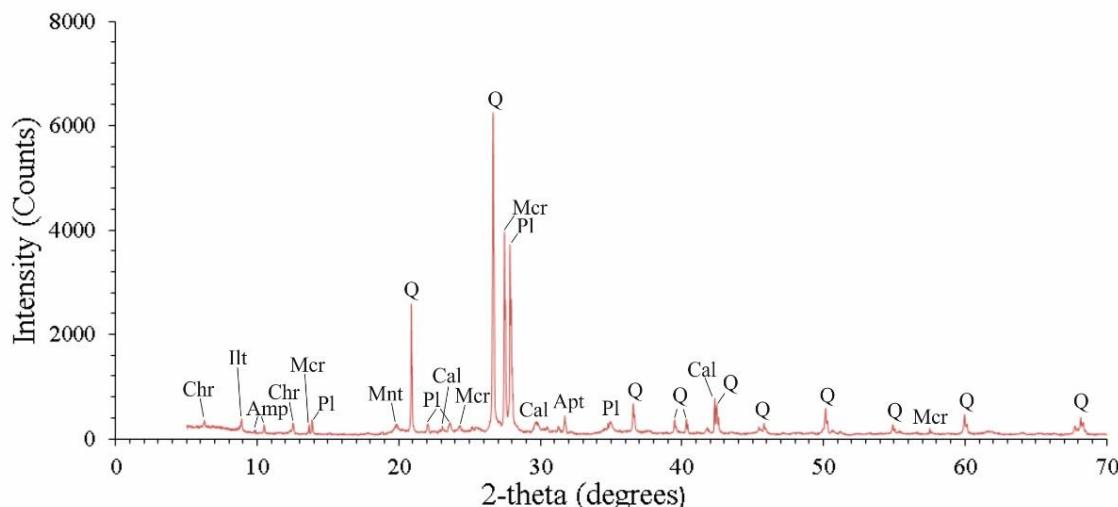


Рис. 2. Рентгенограмма донных осадков моря Лаптевых (образец AMK-6045): *Q* – кварц, *Pl* – плагиоклаз, *Mcr* – микроclin, *Amp* – амфиболы, *Chr* – хлорит, *Ilt* – иллит, *Mnt* – монтмориллонит, *Cal* – Mg-кальцит, *Apt* – апатит

Fig. 2. XRD pattern of the Laptev Sea bottom sediments (sample AMK-6045): *Q* – quartz, *Pl* – plagioclase, *Mcr* – microcline, *Amp* – amphiboles, *Chr* – chlorite, *Ilt* – illite, *Mnt* – montmorillonite, *Cal* – Mg-calcite, *Apt* – apatite

Аутигенные минералы донных осадков сиповых участков

Было установлено, что в донных осадках, отобранных на участках разгрузки метансодержащих флюидов с поверхности дна в восточной части моря Лаптевых, развиты аутигенные пирит-кальцитовая и пирит-гипсовая минерализации.

Аутигенные карбонатные образования обнаружены в двух образцах, отобранных на станциях LV78-12 и AMK-6045 («западный сип»). Донные осадки на этом участке представлены очень плотным алевритом черного цвета с примесью пелитовых частиц (13,28 %). Цвет карбонатных образований от светло-серого до желто-коричневого, текстура плотная, биотурбированная, крепкосцементированная, структура разнозернистая. По морфологии эти образования представлены стяжениями изометричной формы с

размерами в поперечнике до 2 см (рис. 3), а также конкрециями диаметром 2–3 мм (рис. 4, *a*).

В стяжениях отмечаются пустоты в виде каверн диаметром до 4 мм и полых каналов диаметром 1–2 мм. Происхождение подобных поровых пространств может быть связано с жизнедеятельностью трубчатых червей, вокруг которых осаждается карбонатный материал [5, 37, 38]. Во внутреннем строении карбонатных стяжений отмечаются полукатанные обломки терригенного материала – кварца и полевых шпатов, размеры которых в среднем составляют 0,1 мм (рис. 4, *d*). Рентгенодифракционным анализом и сканирующей электронной микроскопией было установлено, что по составу данные карбонаты являются магнезиальным кальцитом (Mg-кальцит; рис. 2). Содержание магния в них варьирует в пределах 2–10 %.



Рис. 3. Карбонатные стяжения из донных осадков станции AMK-6045

Fig. 3. Carbonate nodules from bottom sediments of AMK-6045 station

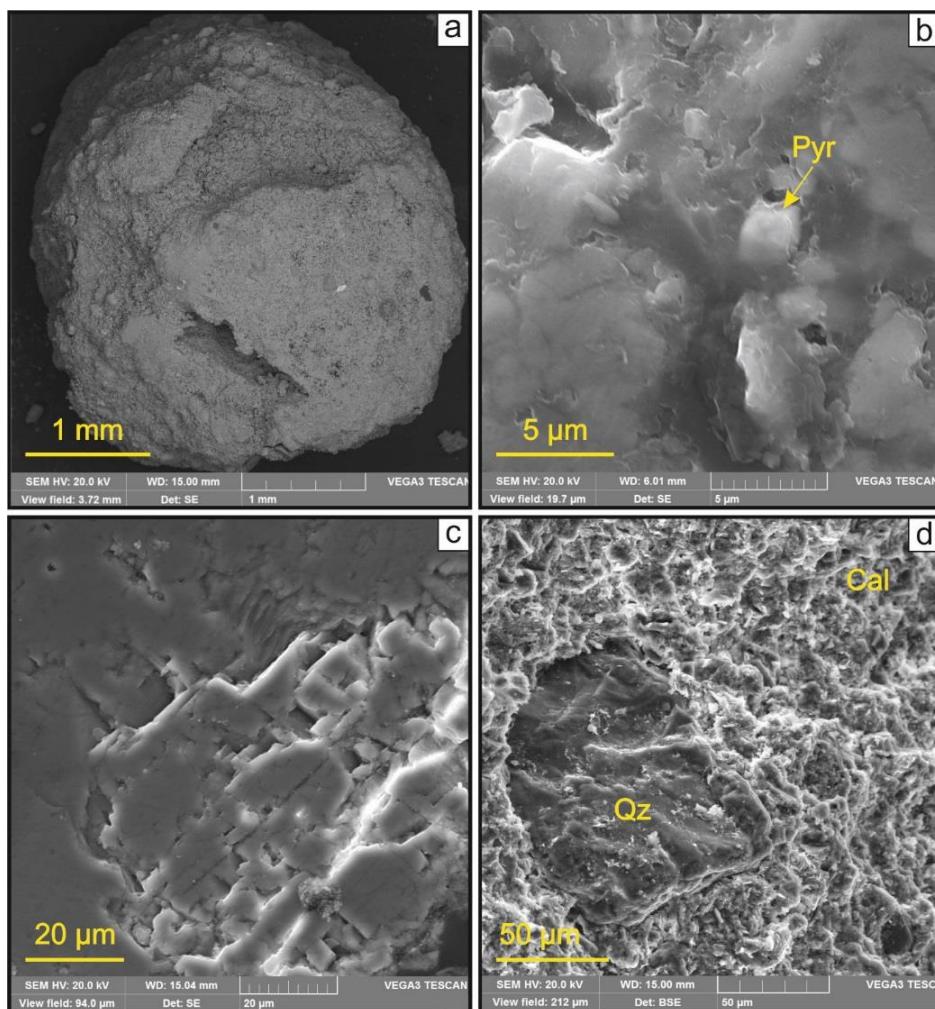


Рис. 4. СЭМ-фотографии, иллюстрирующие морфологию и внутреннюю структуру аутигенных карбонатных стяжений: а) конкреция Mg-кальцита (образец AMK-6045); б) идиоморфный пирит в Mg-кальцитовом цементе (образец LV78-12); в) микрокристаллическая структура Mg-кальцита (образец LV78-12); г) обломки кварца в Mg-кальцитовом цементе (образец AMK-6045). Q – кварц, Cal – Mg-кальцит, Pyr – пирит

Fig. 4. SEM-photographs showing morphology and internal structure of authigenic carbonates: a) nodule of Mg-calcite (sample AMK-6045); b) euhedral pyrite in Mg-calcite matrix (sample LV78-12); c) microcrystalline structure of Mg-calcite (sample LV78-12); d) quartz fragments in Mg-calcite matrix (sample AMK-6045). Q – quartz, Cal – Mg-calcite, Pyr – pyrite

Гипс присутствует в образцах LV78-17 и AMK-6027 («восточный сип»), представленных алевритом черного цвета. Большинство гипсовых агрегатов имеют форму идиоморфных ромбовидных (рис. 5, с) и удлиненных призматических кристаллов (рис. 5, а, б) с четко развитыми гранями. Различия в морфологии кристаллов могут быть связаны со скоростью роста либо с изменением химического состава поровой воды [39–41]. Отсутствие на гранях кристаллов следов механического воздействия указывает на аутигенное происхождение гипса [42]. Размер кристаллов независимо от их формы изменяется в диапазоне от 0,05 до 0,15 мм. По данным рентгеноdifракционного анализа установлено, что гипс является основной минеральной сульфатной формой в образцах LV78-17 и AMK-6027, его суммарное содержание составляет около 1 %.

Аутигенный пирит, обнаруженный, в образцах LV78-12 и AMK-6045, находится в парагенезисе с кальцитом (рис. 5, б) и является основной формой

дисульфида железа в карбонатных стяжениях. В морфологическом отношении пирит представлен отдельными кристаллами кубической, реже октаэдрической, форм, вросшимися в зерна Mg-кальцита. Размер кристаллов пирита изменяется в пределах 2–10 мкм. В образце LV78-12 наблюдаются единичные фрамбоиды пирита, сорбированные на поверхности глинистых минералов. Их размеры не превышают 5 мкм. Аутигенный пирит в образцах LV78-17 и AMK-6027 присутствует в виде фрамбоидов, а также рассеянных единичных кристаллов кубической формы. Размер фрамбоидов варьирует в диапазоне от 2 до 121 мкм, в среднем составляя 10 мкм, а размер слагающих их микрокристаллов от 0,2 до 5 мкм. Микрокристаллы имеют как сфероидальную, так и кубическую и октаэдрическую формы. Кристаллизуется пирит главным образом на поверхностях глинистых агрегатов, обломков кварца и полевых шпатов (рис. 6), иногда заполняет трещины в последних.

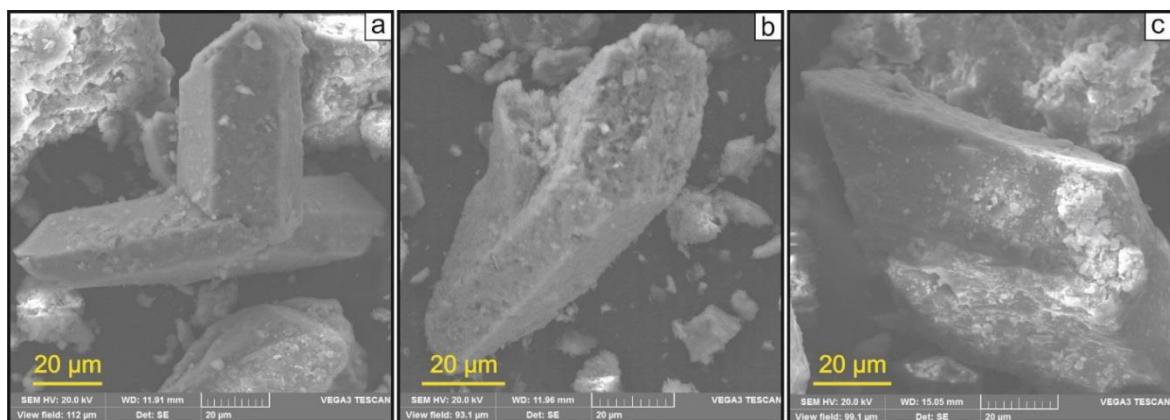


Рис. 5. СЭМ-фотографии разновидностей кристаллов аутигенного гипса (образец AMK-6027): а, б) сросшиеся призматические кристаллы гипса; в) ромбические кристаллы гипса

Fig. 5. SEM-photographs of authigenic gypsum crystals varieties (sample AMK-6027): a, b) intergrowths prismatic gypsum crystals; c) rhombic gypsum crystals

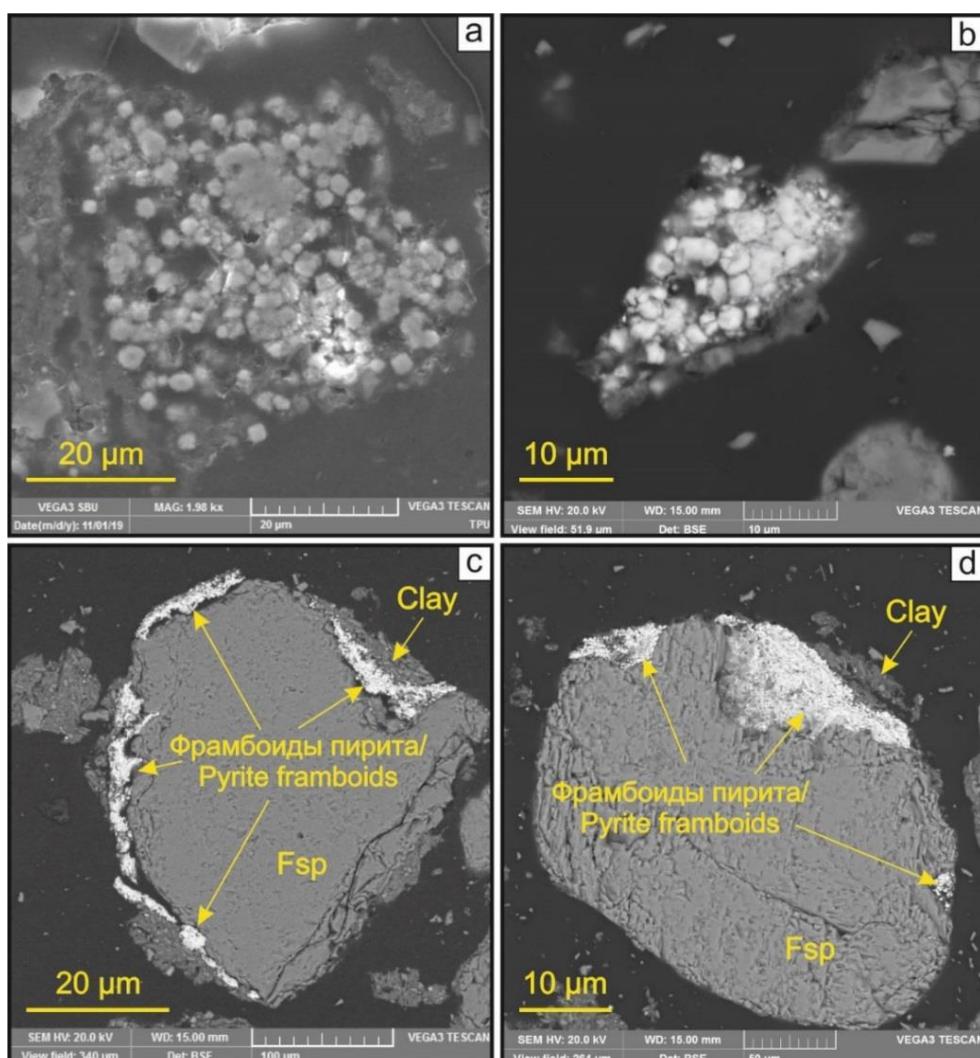


Рис. 6. СЭМ-фотографии аутигенного пирита: а, в) фрамбоиды пирита, сорбированные органическим веществом, покрывающим обломок полевых шпатов (образец LV78-17); б) фрамбоиды пирита на поверхности кварца (образец AMK-6027); г) фрамбоиды пирита на поверхности полевого шпата (образец LV78-17). Clay – глинистые минералы; Fsp – полевые шпаты

Fig. 6. SEM photographs of authigenic pyrite: a, c) pyrite frambooids sorbed by an organic substance covering a fragment of feldspars (sample LV78-17); b) pyrite frambooids of pyrite on the surface of quartz (sample AMK-6027); d) pyrite frambooids on the surface of feldspar (sample LV78-17). Clay – clay minerals; Fsp – feldspar

Обсуждение результатов

Образование аутигенного Mg-кальцита

Отличительной особенностью современных донных осадков арктических морей, относительно осадков морей гумидных и аридных зон, является практически полное отсутствие в их составе карбонатных минералов. Причиной этого является повышенная растворимость CO_2 , объясняемая низкими температурами водной толщи [9].

Среди исследованных образцов аутигенный карбонат, представленный Mg-кальцитом, был обнаружен только в пробах LV78-12 и АМК-6045. Связанный с кальцитом пирит свидетельствует об активности процесса бактериальной сульфат-редукции (БСР) во время осаждения карбонатов в бескислородной среде [37, 43, 44]. Его формирование, предположительно, происходило при взаимодействии сероводорода, продукцируемого в процессе БСР, с ионами железа, источником которых служат дегритовые (привнесенные) минералы [45]. В результате этой реакции образовывались метастабильные моносульфиды железа (макинавит, грейгит), которые в последующем перекристаллизовывались в пирит [45].

Приуроченность карбонатных и сульфидных аутигенных минеральных форм к горизонту осадков 2–5 см свидетельствует о близповерхностном положении сульфат-метановой транзитной зоны [46, 47], на что также указывает отсутствие окисленного слоя в совокупности с запахом сероводорода в осадках этих станций [30]. При высоких флюидных потоках АОМ часто протекает в верхних горизонтах или даже непосредственно на границе донных осадков и воды [1, 28, 48]. В таком случае поровые воды должны характеризоваться высокими концентрациями сульфат-ионов, что способствовала бы осаждению арагонита [37, 49]. Однако в исследованных образцах единственной формой карбоната кальция, как и в целом карбонатов, является Mg-кальцит. В данном случае осаждение Mg-кальцита происходило в восстановительной обстановке в условиях дефицита сульфат-ионов в поровой воде при участии растворенного сульфида, как это было показано на примере карбонатов других районов [3].

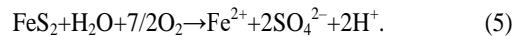
Наличие аутигенной минеральной ассоциации в виде магнезиального кальцита с тонкими включениями пирита в древних терригенных осадках может свидетельствовать о функционировании консорциума метанотрофных архей и сульфатредуцирующих бактерий, как следствие процесса холодных метановых просачиваний, в том числе в условиях арктических морей. Этую минеральную специфику можно использовать для поиска подобных геологических процессов в других осадочных бассейнах как предпосылку для обнаружения в нижележащих осадочных толщах газово-конденсатных месторождений или залежей метановых гидратов [50–52].

Образование аутигенного гипса

Морская вода в целом характеризуется значительно низким уровнем насыщения растворенным суль-

фатом кальция [7]. Как правило, насыщение последним происходит при испарении морской воды до 30 % от своего первоначального объема либо при увеличении концентрации ионов SO_4^{2-} и/или Ca^{2+} в поровой воде [53]. Ввиду низких температур водной толщи в морях Северного ледовитого океана [54–56], гипс, являясь классическим эвапоритовым минералом, может формироваться только вследствие насыщения поровой воды ионами SO_4^{2-} и/или Ca^{2+} [57].

Временное изменение режима миграции метан-содержащих флюидов, выраженное в снижении интенсивности просачивания, могло способствовать перемещению сульфат-метановой транзитной зоны вниз по разрезу [58]. Уменьшение активности процесса бактериальной сульфатредукции повлекло за собой насыщение поровой воды сульфат ионом. Помимо этого, нисходящая диффузия морской воды привела к смене восстановительных условий окислительными. Кислородная обстановка благоприятствовала окислению сульфидных минералов, сформировавшихся ранее в условиях близповерхностного положения сульфат-метановой транзитной зоны, что в свою очередь служило дополнительным источником SO_4^{2-} (5) [22, 57].



Таким образом, наиболее вероятным источником сульфат-ионов в поровой воде донных осадков исследуемого района, помимо морской воды, служило окисление ранее образованных сульфидных минералов, в данном случае аутигенного пирита. Согласно [59, 60] диспропорционирование промежуточных продуктов окисления сульфидов могло также вносить существенный вклад в концентрацию SO_4^{2-} .

Окисление сульфидных минералов, независимо от контролирующих этот процесс факторов, сопровождается повышением кислотности поровой воды, что в данном случае могло способствовать растворению карбонатных минералов и высвобождению ионов Ca^{2+} [61, 62].



Стоит отметить, что в образцах LV78-17 и АМК-6027 не было обнаружено карбонатных образований. Данный факт, вероятно, объясняется их полным растворением [4], что привело и к насыщению порового раствора ионами Ca^{2+} , и, как следствие, к осаждению аутигенного гипса (6).

Заключение

Проведенные исследования минералогического и литологического составов современных донных осадков сиповых областей моря Лаптевых позволили сделать следующие основные выводы:

1. Mg-кальцит, гипс и пирит являются основными аутигенными минералами в исследованных образцах донных осадков, отобранных с двух сиповых участков в северо-восточной части моря Лаптевых. Для осадков «восточного сипа» характерна пирит-гипсовая минерализация, в то время как для осадков «западного сипа» – пирит-кальцитовая.

2. Разная специфика аутигенной минерализации, предположительно, указывает на различия в режимах миграции метан-содержащих флюидов на этих участках. Временное снижение интенсивности просачивания метана в пределах «восточного сипа» привело к смене восстановительных условий окислительными, в которых за счет нисходящей диффузии морской воды и окисления сульфидов происходило насыщение поровой воды ионами SO_4^{2-} и Ca^{2+} и, как следствие, осаждению гипса. Напротив, близповерхностное положение сульфат-метановой транзитной зоны в «западном сипе», обусловленное высокими потоками обогащенных метаном флюидов, благоприятствовало осаждению Mg-кальцита в верхних горизонтах донных осадков. Формирование карбонатов, вероятно, происходило в условиях дефицита сульфат-ионов в поровой воде при участии растворенного сульфида.
3. Присутствие пирита в осадках как восточного, так западного сиповых участков является свидетельством активности процесса бактериальной сульфат-редукции при анаэробном окислении метана. Продуцируемый при этом сероводород, взаимо-

действуя с содержащимися в поровой воде ионами железа, способствовал осаждению моносульфидов железа, которые затем перекристаллизовывались в пирит.

4. Наличие аутигенной минеральной ассоциации в виде магнезиального кальцита с тонкими включениями пирита является косвенным признаком условий холодных метановых просачиваний. Подобная минеральная специфика может быть использована как предпосылка для обнаружения газоконденсатных месторождений или залежей газовых гидратов метана в нижележащих осадочных толщах.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (аналитические исследования проведены в рамках реализации проекта № 19-77-00016). Фактический материал для проведения исследований был получен в ходе экспедиций на НИС «Академик М.А. Лаврентьев» (рейс 78, 2016 г.) и НИС «Академик Мстислав Келдович» (рейс 73, 2018 г.), организованных при поддержке Правительства Российской Федерации (грант № 14.Z.50.31.0012) и Российского научного фонда (грант № 15-17-20032).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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. – P. 193.
2. Authigenic minerals from the Paola Ridge (southern Tyrrhenian Sea): evidences of episodic methane seepage / F. Franchi, M. Rovere, F. Gamberi, H. Rashed, O. Vaselli, F. Tassi // Marine and Petroleum Geology. – 2017. – V. 86. – P. 228–247.
3. Formation of seep carbonates along the Makran convergent margin, northern Arabian Sea and a molecular and isotopic approach to constrain the carbon isotopic composition of parent methane / T. Himmler, D. Birgel, G. Bayon, T. Pape, L. Ge, G. Bohrmann, J. Peckmann // Chemical Geology. – 2015. – V. 415. – P. 102–117.
4. Formation mechanism of authigenic gypsum in marine methane hydrate settings: Evidence from the northern South China Sea / Q. Lin, J. Wang, T. J. Algeo, P. Su, G. Hug // Deep-Sea Research I. – 2016. – V. 115. – P. 210–220.
5. Mansour A.S., Sassen R. Mineralogical and stable isotopic characterization of authigenic carbonate from a hydrocarbon seep site, Gulf of Mexico slope: Possible relation to crude oil degradation // Marine Geology. – 2011. – V. 281. – P. 59–69.
6. Methane-derived carbonates and authigenic pyrite from the northwestern Black Sea / J. Peckmann, A. Reimer, U. Lüth, C. Lüth, B.T. Hansen, C. Heinicke, J. Hoefs, J. Reitner // Marine Geology. – 2001. – V. 177. – P. 129–150.
7. Pierre C. Origin of the authigenic gypsum and pyrite from active methane seeps of the southwest African Margin // Chemical Geology. – 2017. – V. 449. – P. 158–164.
8. 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.
9. Аутигенный Mg-кальцит на метановом полигоне в море Лаптевых / М.Д. Кравчишина, А.Ю. Лайн, А.С. Савичев, Л.Е. Рейхард, О.М. Дара, М.В. Флинт // Океанология. – 2017. – Т. 57. – № 1. – С. 194–213.
10. Икаит ($\text{CaCO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) в донных отложениях моря Лаптевых и роль анаэробного окисления метана в процессе его формирования / А.А. Крылов, Е.А. Логвина, Т.В. Матвеева, Э.М. Праволов, В.Ф. Сапега, А.Л. Демидова, М.С. Радченко // Записки Российской минералогического общества. – 2015. – Т. 144. – № 4. – С. 61–75.
11. The origin of methane in the East Siberian Arctic Shelf unraveled with triple isotope analysis / C.J. Sapart, N. Shakhova, I. Semiletov, J. Jansen, S. Szidat, D. Kosmach, O. Dudarev, C. Van Der Veen, M. Egger, V. Sergienko, A. Salyuk, V. Tumskoy, J. Tison, T. Röckmann // Biogeosciences. – 2017. – V. 14. – Iss. 9. – P. 2283–2292.
12. Evidence of atmospheric response to methane emissions from the east Siberian arctic shelf / N. Pankratova, A. Skorokhod, I. Belikov, N. Elansky, V. Rakitin, Y. Shtabkin, E. Berezina // Geography, Environment, Sustainability. – 2018. – V. 11. – Iss. 1. – P. 85–92.
13. Barnes R.O., Goldberg E.D. Methane production and consumption in anoxic marine sediments // Geology. – 1976. – V. 4. – Iss. 5. – P. 1977–1984.
14. Field and laboratory studies of methane oxidation in an anoxic marine sediment: evidence for a methanogen–sulfate reducer consortium / T.M. Hoehler, M.J. Alperin, D.B. Albert, C.S. Martens // Global Biogeochemical Cycles. – 1994. – V. 8. – P. 451–463.
15. Authigenic carbonate formation at hydrocarbon seeps in continental margin sediments: A comparative study / T.H. Naehr, P. Eichhubl, V.J. Orphanc, M. Hovland, C.K. Paille, W. Ussler III, T.D. Lorenson, H.G. Greeneg // Deep-Sea Research II. – 2007. – V. 54. – P. 1268–1291.
16. Extensive methane venting to the atmosphere from sediments of the East Siberian Arctic Shelf / N. Shakhova, I. Semiletov, A. Salyuk, V. Yusupov, D. Kosmach, Ö. Gustafsson // Science. – 2010. – V. 327. – P. 1246–1249.
17. Ebullition and storm-induced methane release from the East Siberian Arctic Shelf / N.E. Shakhova, I.P. Semiletov, I. Leifer, V. Sergienko, A. Salyuk, D. Kosmach, D. Chernykh, C. Stubbs, D. Nicolsky, V. Tumskoy, Ö. Gustafsson // Nature Geoscience. – 2014. – № 7. – P. 64–70.
18. 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. Дмитревский, Н.Е. Шахова, Н.Н. Романовский, Д.А. Космач, Д.Н. Никольский, С.Л. Никифоров, А.С. Саломатин, Р.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. Чувилин, Б.А. Буханов // Доклады Академии наук. – 2012. – Т. 446. – № 3. – С. 330–335.
19. U/Th systematics and ages of authigenic carbonates from Hydrate Ridge, Cascadia Margin: recorders of fluid flow variations / B.M.A. Teichert, A. Eisenhauer, G. Bohrmann, A. Haase-

- Schramm, B. Bock, P. Linke // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2003. – V. 67. – P. 3845–3857.
20. Tryon M.D., Brown K.M. Fluid and chemical cycling at Bush Hill: implications for gas- and hydrate-rich environments // *Geochemistry Geophysics Geosystems*. – 2004. – V. 5. – P. 1–7.
21. Changing redox conditions at cold seeps as revealed by authigenic carbonates from Alaminos Canyon, northern Gulf of Mexico / D. Birgel, D. Feng, H.H. Roberts, J. Peckmann // *Chemical Geology*. – 2011. – V. 285. – P. 82–96.
22. Bottrell S.H., Newton R.J. Reconstruction of changes in sulphur cycling from marine sulphate isotopes // *Earth-Science Reviews*. – 2006. – V. 75. – P. 59–83.
23. A marine microbial consortium apparently mediating anaerobic oxidation of methane / A. Boetius, K. Ravenschlag, C.J. Schubert, D. Rickert, F. Widdel, A. Gieseke, R. Amann, B.B. Jørgensen, O. Witte, O. Pfannkuche // *Nature*. – 2000. – V. 407. – P. 623–626.
24. 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.
25. Zero-valent sulphur is a key intermediate in marine methane oxidation / J. Milucka, T.G. Ferdelman, L. Polerecky, D. Franzke, G. Wegener, M. Schmid, I. Lieberwirth, M. Wagner, F. Widdel, M.M.M. Kuypers // *Nature*. – 2012. – V. 491. – P. 541–546.
26. Boetius A., Wenzhöfer F. Seafloor oxygen consumption fuelled by methane from cold seeps // *Nature Geoscience*. – 2013. – V. 6. – P. 725–734.
27. Berner R.A. Early diagenesis – a theoretical approach. – Princeton: Princeton University Press, 1980. – 241 p.
28. 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.
29. Peckmann J., Thiel V. Carbon cycling at ancient methane-seeps // *Chemical Geology*. – 2004. – V. 205. – Iss. 3–4. – P. 443–467.
30. Methane-derived carbonates and authigenic pyrite from the northwestern Black Sea / J. Peckmann, A. Reimer, U. Lüth, C. Lüth, B.T. Hansen, C. Heinicke, J. Hoefs, J. Reitner // *Marine Geology*. – 2001. – V. 177 (1–2). – P. 129–150.
31. Ussler III W., Paull C.K. Rates of anaerobic oxidation of methane and authigenic carbonate mineralization in methane-rich deep-sea sediments inferred from models and geochemical profiles // *Earth and Planetary Science Letters*. – 2008. – V. 266. – P. 271–287.
32. Suess E. Marine cold seeps and their manifestations: geological control, biogeochemical criteria and environmental conditions // *International Journal of Earth Sciences*. – 2014. – V. 103 (7). – P. 1889–1916.
33. Characteristics of authigenic minerals around the sulfate-methane transition zone in the methane-rich sediments of the northern South China Sea: inorganic geochemical evidence / D. Wu, T. Sun, R. Xie, M. Pan, X. Chen, Y. Ye, L. Liu, N. Wu // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. – 2019. – V. 16 (13). – E2299.
34. Rickard D., Luther III G.W. Chemistry of iron sulfides // *Chemical Reviews*. – 2007. – V. 107. – P. 514–562.
35. Структура осадков и фации Японского моря / Ф.Р. Лихт, И.В. Уткин, А.С. Астахов, Ю.Д. Марков, А.И. Бонул, А.Н. Деркачёв. – Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1983. – 286 с.
36. Литолого-geoхимическая типизация поверхностного слоя донных осадков Карского моря / В.Ю. Русаков, Т.Г. Кузьмина, М.А. Левитан, Е.С. Торопченова, А.В. Жилкина // *Океанология*. – 2017. – Т. 57. – № 1. – С. 214–226.
37. Biogeochemical processes controlling authigenic carbonate formation within the sediment column from the Okinawa Trough / J. Li, X. Peng, S. Bai, Z. Chen, J.D. van Nostrand // *Geochimica et cosmochimica acta*. – 2018. – V. 222. – P. 363–382.
38. Fluid venting activity on the Costa Rica margin: new results from authigenic carbonates / X. Han, E. Suess, H. Sahling, K. Wallmann // *International Journal of Earth Science*. – 2004. – V. 93 (4). – P. 596–611.
39. Fluid evolution and authigenic mineral paragenesis related to salt diapirism – the Mercator mud volcano in the Gulf of Cadiz / L. Haffert, M. Haeckel, V. Liebetrau, C. Berndt, C. Hensen, M. Nuzzo, A. Reitz, F. Scholz, J. Schönenfeld, C. Perez-Garcia, S.M. Weise // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2013. – V. 106. – P. 261–286.
40. Harouka K., Eisenhauer A., Fantle M.S. Experimental investigation of Ca isotopic fractionation during abiotic gypsum precipitation // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2014. – V. 129. – P. 157–176.
41. Biological influences on modern sulfates: textures and composition of gypsum deposits from Guerrero Negro, Baja California Sur, Mexico / M.B. Vogel, D.J. Des Marais, M.N. Parenteau, L.L. Jahnke, K.A. Turk, M.D.Y. Kubo // *Sedimentary Geology*. – 2010. – V. 223 (3–4). – P. 265–280.
42. Briskin M., Schreiber B.C. Authigenic gypsum in marine sediments // *Marine Geology*. – 1978. – V. 28 (1–2). – P. 37–49.
43. Greinert J., Derkachev A. Glendonites and methane-derived Mg-calcites in the Sea of Okhotsk, Eastern Siberia: Implications of a venting-related ikaite/glendonite formation // *Marine Geology*. – 2004. – V. 204 (1–2). – P. 129–144.
44. Biogeochemical controls on authigenic carbonate formation at the Chapopote «asphalt volcano», Bay of Campeche / T.N. Naehr, D. Birgel, G. Bohrmann, K.S. MacDonald // *Chemical Geology*. – 2009. – V. 266. – P. 390–402.
45. Berner R.A. Sedimentary pyrite formation: an update // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1984. – V. 48. – P. 605–615.
46. Anaerobic oxidation of methane above gas hydrates at Hydrate Ridge, NE Pacific Ocean / T. Treude, A. Boetius, K. Knittel, K. Wallmann, B.B. Jørgensen // *Marine Ecology Progress Series*. – 2003. – V. 264. – P. 1–14.
47. Simulation of long-term feedbacks from authigenic carbonate crust formation at cold vent sites / R. Luff, J. Greinert, K. Wallmann, L. Klaucke, E. Suess // *Chemical Geology*. – 2005. – V. 216. – P. 157–174.
48. Teichert B.M.A., Bohrmann G., Suess E. Chemoherms on Hydrate Ridge – unique microbially-mediated carbonate build-ups growing into the water column // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. – 2005. – V. 227 (1–3). – P. 67–85.
49. Authigenic carbonates from newly discovered active cold seeps on the northwestern slope of the South China Sea: Constraints on fluid sources, formation environments, and seepage dynamics / Q. Liang, Y. Hu, D. Feng, J. Peckmann, L. Chen, S. Yang, J. Liang, J. Tao, D. Chen // *Deep-Sea Research Part I*. – 2017. – V. 124. – P. 31–41.
50. Milkov A.V., Sassen R. Economic geology of offshore gas hydrate accumulations and provinces // *Marine and Petroleum Geology*. – 2002. – V. 19. – P. 1–11.
51. Free hydrocarbon gas, gas hydrate, and authigenic minerals in chemosynthetic communities of the northern Gulf of Mexico continental slope: relation to microbial processes / R. Sassen, H.H. Roberts, R. Carney, A.V. Milkov, D.A. DeFreitas, B. Lanoil, C. Zhang // *Chemical Geology*. – 2004. – V. 205. – P. 195–217.
52. Chen D.F., Cathles III L.M., Roberts H.H. The geochemical signatures of variable gas venting at gas hydrate sites // *Marine and Petroleum Geology*. – 2004. – V. 21 (3). – P. 317–326.
53. Hoareau G., Monnin C., Odonne F. The stability of gypsum in marine sediments using the entire ODP/IODP porewater composition database // *Marine Geology*. – 2011. – V. 279 (1–4). – P. 87–97.
54. Janout M.A., Holemann J., Krumpen T. Cross-shelf transport of warm and saline water in response to sea ice drift on the Laptev Sea shelf // *Journal of geophysical research: oceans*. – 2013. – V. 118. – P. 563–576.
55. Ivanov V.V., Golovin P.N. Observations and modeling of dense water cascading from the northwestern Laptev Sea shelf // *Journal of geophysical research*. – 2007. – V. 112. – C09003.
56. Upwelling on the continental slope of the Alaskan Beaufort Sea: storms, ice, and oceanographic response / R.S. Pickart, G.W.K. Moore, D.J. Torres, P.S. Fratantoni, R.A. Goldsmith, J. Yang // *Journal of geophysical research*. – 2009. – V. 114. – C00A13.
57. Oxygen and sulfur isotope systematics of sulfate produced by bacterial and abiotic oxidation of pyrite / N. Balci, W.C. Shanks III, B. Mayer, K.W. Mandernack // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2007. – V. 71 (15). – P. 3796–3811.
58. Borowski W.S., Paull C.K., Ussler III W. Marine pore-water sulfate profiles indicate in situ methane flux from underlying gas hydrate // *Geology*. – 1996. – V. 24. – P. 655–658.

59. Influence of diagenesis on the stable isotopic composition of biogenic carbonates from the Gulf of Tehuantepec oxygen minimum zone / C.L. Blanchem, S. Kasten, L. Vidal, S.W. Poulton, R. Ganeshram, N. Thouveny // *Geochemistry Geophysics Geosystems*. – 2012. – V. 13 (4). URL: <http://dx.doi.org/10.1029/2011GC003800> (дата обращения 10.03.2020).
60. Oxidative sulfur cycling in the deep biosphere of the Nankai Trough, Japan / N.B. Riedinger, B. Brunner, M.J. Formolo, E. Solomon, S. Kasten, M. Strasser, T.G. Ferkelman // *Geology*. – 2010. – V. 38. – P. 851–854.
61. Methane-derived authigenic carbonates along the North Anatolian fault system in the Sea of Marmara (Turkey) / A. Crémère, C. Pierre, M.-M. Blanc-Valleron, T. Zitter, M.N. Çağatay, P. Henry // *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. – 2012. – V. 66. – P. 114–130.
62. Pierre C. The isotopic record of gypsum diagenesis in diluted solutions: Observations in natural salinas and experiments // *Chemical Geology*. – 2018. – V. 493. – P. 451–457.

Поступила 11.03.2020 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.

Гершелис Е.В., кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Леонов А.А., инженер отделения материаловедения инженерной школы новых производственных технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета; младший научный сотрудник лаборатории пучково-плазменной инженерии поверхности Института сильноточной электроники СО РАН.

Мазуров А.К., доктор геолого-минералогических наук, профессор 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. Ильчева ДВО РАН.

Семилетов И.П., член-корреспондент РАН доктор географических наук, заведующий лабораторией арктических исследований Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильчева ДВО РАН; профессор отделения геологии инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 552.144; 551.35

AUTHIGENIC MINERALS IN THE BOTTOM SEDIMENTS FROM SEEPS OF THE LAPTEV SEA

Alexey S. Ruban¹,
ruban@tpu.ru

Maxim A. Rudmin¹,
rudminma@tpu.ru

Elena V. Gershelis¹,
elenapanova@tpu.ru

Andrey A. Leonov^{1,2},
laa91@tpu.ru

Alexey K. Mazurov¹,
akm@tpu.ru

Oleg V. Dudarev³,
dudarev@poi.dvo.ru

Igor P. Semiletov^{3,1},
ipsemiletov@alaska.edu

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

² Institute of High Current Electronics SB RAS,
2/3, Academicesky avenue, Tomsk, 634055, Russia.

³ Pacific Oceanological Institute FEB RAS,
43, Baltiyskaya street, Vladivostok, 690041, Russia.

Methane seeps is a widespread phenomenon observed on the shelves and continental slopes of inland and border seas around the world, including the Laptev Sea. Key biogeochemical processes occurring in the bottom sediments of these areas are the anaerobic oxidation of methane in combination with bacterial sulfate reduction. Both of these processes control the formation of specific authigenic mineralization. The aim of this work was to study authigenic minerals of bottom sediments with abnormally high concentrations of methane taken from two seeps in the north-eastern part of the Laptev Sea to determine the signs of their identification in ancient sedimentary rocks. The paper presents the results of lithological and mineralogical studies of bottom sediments.

It was found that magnesium calcite, gypsum and pyrite are the main authigenic minerals in the studied samples of bottom sediments taken from two seeps in the north-eastern part of the Laptev Sea. The different specifics of authigenic mineralization indicate differences in conditions of migration of methane-containing fluids in these areas, presumably. Temporary decrease in the rate of methane seepage within the «eastern seep» contributed to the saturation of pore water with SO_4^{2-} and Ca^{2+} and, as a consequence, gypsum deposition. The near-surface position of the sulfate-methane transition zone in the «western seep» due to high methane flows favored the precipitation of magnesian calcite in the upper horizons of bottom sediments. The presence of pyrite in sediments of eastern and western seep is evidence of the activity of the bacterial sulfate reduction during anaerobic methane oxidation.

Key words:

Diagenesis, methane seeps, anaerobic methane oxidation, calcite, gypsum, pyrite, Arctic, Laptev Sea.

The research was supported by the Russian Science Foundation (laboratory investigations were carried out as part of the project No. 19-77-00016). Material for research was obtained during expeditions to the R/V «Academician M.A. Lavrentiev» (cruise No 78, 2016) and the R/V «Academician Mstislav Keldysh» (cruise No 73, 2018), organized with the support of the Russian Federation Government (grant No. 14.Z50.31.0012) and the Russian Science Foundation (grant No. 15-17-20032).

REFERENCES

1. 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, pp. 193.
2. Franchi F., Rovere M., Gamberi F., Rashed H., Vaselli O., Tassi F. Authigenic minerals from the Paola Ridge (southern Tyrrhenian Sea): Evidences of episodic methane seepage. *Marine and Petroleum Geology*, 2017, vol. 86, pp. 228–247.
3. Himmller T., Birgel D., Bayon G., Pape T., Ge L., Bohrmann G., Peckmann J. Formation of seep carbonates along the Makran convergent margin, northern Arabian Sea and a molecular and isotopic approach to constrain the carbon isotopic composition of parent methane. *Chemical Geology*, 2015, vol. 415, pp. 102–117.
4. Lin Q., Wang J., Algeo T.J., Su P., Hug G. Formation mechanism of authigenic gypsum in marine methane hydrate settings: Evidence from the northern South China Sea. *Deep-Sea Research I*, 2016, vol. 115, pp. 210–220.
5. Mansour A.S., Sassen R. Mineralogical and stable isotopic characterization of authigenic carbonate from a hydrocarbon seep site, Gulf of Mexico slope: possible relation to crude oil degradation. *Marine Geology*, 2011, vol. 281, pp. 59–69.
6. Peckmann J., Reimer A., Lüth U., Lüth C., Hansen B.T., Heinicke C., Hoefs J., Reitner J. Methane-derived carbonates and authigenic pyrite from the northwestern Black Sea. *Marine Geology*, 2001, vol. 177, pp. 129–150.
7. Pierre C. Origin of the authigenic gypsum and pyrite from active methane seeps of the southwest African Margin. *Chemical Geology*, 2017, vol. 449, pp. 158–164.
8. 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.
9. Kravchishina M.D., Lein A.Yu., Savvichev A.S., Reykhard L.E., Dara O.M., Flint M.V. Authigenic Mg-calcite on methane cold vent area in the Laptev Sea. *Oceanology*, 2017, vol. 57, no. 1, pp. 194–213.
10. Krylov A.A., Logvina E.A., Matveeva T.M., Prasolov E.M., Sapega V.F., Demidova A.L., Radchenko M.S. Ikaite ($\text{CaCO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) in bottom sediments of the Laptev Sea and the role of anaerobic methane oxidation in this mineral-forming process.

- Proceedings of the Russian Mineralogical Society*, 2015, vol. 144, no. 4, pp. 61–75. In Rus.
11. Sapart C.J., Shakhova N., Semiletov I., Jansen J., Szidat S., Kosmach D., Dudarev O., Van Der Veen C., Egger M., Sergienko V., Salyuk A., Tumskoy V., Tison J., Röckmann T. The origin of methane in the East Siberian Arctic Shelf unraveled with triple isotope analysis. *Biogeosciences*, 2017, vol. 14, no. 9, pp. 2283–2292.
 12. Pankratova N., Skorokhod A., Belikov I., Elansky N., Rakitin V., Shtabkin Y., Berezina E. Evidence of atmospheric response to methane emissions from the east Siberian arctic shelf. *Geography, Environment, Sustainability*, 2018, vol. 11, no. 1, pp. 85–92.
 13. Barnes R.O., Goldberg E.D. Methane production and consumption in anoxic marine sediments. *Geology*, 1976, vol. 4, Iss. 5, pp. 1977–1984.
 14. Hoehler T.M., Alperin M.J., Albert D.B., Martens C.S. Field and laboratory studies of methane oxidation in an anoxic marine sediment: evidence for a methanogen–sulfate reducer consortium. *Global Biogeochemical Cycles*, 1994, vol. 8, pp. 451–463.
 15. Naehr T.H., Eichhubl P., Orphanc V.J., Hovland M., Pauille C.K., Ussler III W., Lorenson T.D., Greeneg H.G. Authigenic carbonate formation at hydrocarbon seeps in continental margin sediments: A comparative study. *Deep-Sea Research II*, 2007, vol. 54, pp. 1268–1291.
 16. Shakhova N., Semiletov I., Salyuk A., Yusupov V., Kosmach D., Gustafsson Ö. Extensive Methane Venting to the Atmosphere from Sediments of the East Siberian Arctic Shelf. *Science*, 2010, vol. 327, pp. 1246–1249.
 17. Shakhova N.E., Semiletov I.P., Leifer I., Sergienko V., Salyuk A., Kosmach D., Chernykh D., Stubbs C., Nicolsky D., Tumskoy V., Gustafsson Ö. Ebullition and storm-induced methane release from the East Siberian Arctic Shelf. *Nature Geoscience*, 2014, no. 7, pp. 64–70.
 18. Sergienko V.I., Lobkovskii, L.I., Semiletov I.P., Dudarev O.V., Dmitrievskii N.N., Shakhova N.E., Romanovskii N.N., Kosmach D.A., Nikolskii D.N., Nikiforov S.L., Salomatina A.S., Ananiev R.A., Roslyakov A.G., Salyuk A.N., Karnaukh V.V., Chernykh D.B., Tumskoi 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, no. 1, pp. 1132–1137.
 19. Teichert B.M.A., Eisenhauer A., Bohrmann G., Haase-Schramm A., Bock B., Linke P. U/Th systematics and ages of authigenic carbonates from Hydrate Ridge, Cascadia Margin: recorders of fluid flow variations. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2003, vol. 67, pp. 3845–3857.
 20. Tryon M.D., Brown K.M. Fluid and chemical cycling at Bush Hill: implications for gas- and hydrate-rich environments. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2004, vol. 5, pp. 1–7.
 21. Birgel D., Feng D., Roberts H.H., Peckmann J. Changing redox conditions at cold seeps as revealed by authigenic carbonates from Alaminos Canyon, northern Gulf of Mexico. *Chemical Geology*, 2011, vol. 285, pp. 82–96.
 22. Bottrell S.H., Newton R.J. Reconstruction of changes in sulphur cycling from marine sulphate isotopes. *Earth-Science Reviews*, 2006, vol. 75, pp. 59–83.
 23. Boetius A., Ravenschlag K., Schubert C.J., Rickert D., Widdel F., Gieseke A., Amann R., Jørgensen B.B., Witte O., Pfannkuche O. A marine microbial consortium apparently mediating anaerobic oxidation of methane. *Nature*, 2000, vol. 407, pp. 623–626.
 24. 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.
 25. Milucka J., Ferdelman T.G., Polerecky L., Franzke D., Wegener G., Schmid M., Lieberwirth I., Wagner M., Widdel F., Kuypers M.M.M. Zero-valent sulphur is a key intermediate in marine methane oxidation. *Nature*, 2012, vol. 491, pp. 541–546.
 26. Boetius A., Wenzhöfer F. Seafloor oxygen consumption fuelled by methane from cold seeps. *Nature Geoscience*, 2013, vol. 6, pp. 725–734.
 27. Berner R.A. *Early diagenesis – a theoretical approach*. Princeton, Princeton University Press, 1980. 241 p.
 28. 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.
 29. Peckmann J., Thiel V. Carbon cycling at ancient methane-seeps. *Chemical Geology*, 2004, vol. 205, Is. 3–4, pp. 443–467.
 30. Peckmann J., Reimer A., Lüth U., Lüth C., Hansen B.T., Heinicke C., Hoefs J., Reitner J. Methane-derived carbonates and authigenic pyrite from the northwestern Black Sea. *Marine Geology*, 2001, vol. 177, no. 1–2, pp. 129–150.
 31. Ussler III W., Paull C.K. Rates of anaerobic oxidation of methane and authigenic carbonate mineralization in methane-rich deep-sea sediments inferred from models and geochemical profiles. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, vol. 266, pp. 271–287.
 32. Suess E. Marine cold seeps and their manifestations: geological control, biogeochemical criteria and environmental conditions. *International Journal of Earth Sciences*, 2014, vol. 103, no. 7, pp. 1889–1916.
 33. Wu D., Sun T., Xie R., Pan M., Chen X., Ye Y., Liu L., Wu N. Characteristics of authigenic minerals around the sulfate–methane transition zone in the methane-rich sediments of the northern South China Sea: inorganic geochemical evidence. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, vol. 16, no. 13, E2299.
 34. Rickard D., Luther III G.W. Chemistry of iron sulfides. *Chemical Reviews*, 2007, vol. 107, pp. 514–562.
 35. Likht F.R., Astakhov A.S., Botsul A.I. *Struktura osadkov i fatsii Yaponskogo morya* [Bottom structure and facies of Japan Sea]. Vladivostok, DVNTS AN SSSR Publ., 1983. 283 p.
 36. Rusakov V.Yu., Kuzhmina T.G., Levitan M.A., Toropchenova E.S., Zhylkina A.V. Lithology and geochemistry typification of surface see-bottom sediment at the Kara Sea. *Oceanology*, 2017, vol. 57, no. 1, pp. 192–203.
 37. Li J., Peng X., Bai S., Chen Z., Van Nostrand J.D. Biogeochemical processes controlling authigenic carbonate formation within the sediment column from the Okinawa Trough. *Geochimica et cosmochimica acta*, 2018, vol. 222, pp. 363–382.
 38. Han X., Suess E., Sahling H., Wallmann K. Fluid venting activity on the Costa Rica margin: new results from authigenic carbonates. *International Journal of Earth Science*, 2004, vol. 93, no. 4, pp. 596–611.
 39. Haffert L., Haeckel M., Liebetrau V., Berndt C., Hensen C., Nuzzo M., Reitz A., Scholz F., Schönfeld J., Perez-Garcia C., Weise S.M. Fluid evolution and authigenic mineral paragenesis related to salt diapirism – the Mercator mud volcano in the Gulf of Cadiz. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2013, vol. 106, pp. 261–286.
 40. Harouka K., Eisenhauer A., Fantele M.S. Experimental investigation of Ca isotopic fractionation during abiotic gypsum precipitation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2014, vol. 129, pp. 157–176.
 41. Vogel M.B., Des Marais D.J., Parenteau M.N., Jahnke L.L., Turk K.A., Kubo M.D.Y. Biological influences on modern sulfates: Textures and composition of gypsum deposits from Guerrero Negro, Baja California Sur, Mexico. *Sedimentary Geology*, 2010, vol. 223, no. 3–4, pp. 265–280.
 42. Briskin M., Schreiber B.C. Authigenic gypsum in marine sediments. *Marine Geology*, 1978, vol. 28, no. 1–2, pp. 37–49.
 43. Greinert J., Derkachev A. Glendonites and methane-derived Mg-calcites in the Sea of Okhotsk, Eastern Siberia: Implications of a venting-related ikaite/glendonite formation. *Marine Geology*, 2004, vol. 204, no. 1–2, pp. 129–144.
 44. Naehr T.N., Birgel D., Bohrmann G., MacDonald K.S. Biogeochemical controls on authigenic carbonate formation at the Chapopote «asphalt volcano», Bay of Campeche. *Chemical Geology*, 2009, vol. 266, pp. 390–402.
 45. Berner R.A. Sedimentary pyrite formation: an update. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1984, vol. 48, pp. 605–615.
 46. Treude T., Boetius A., Knittel K., Wallmann K., Jørgensen B.B. Anaerobic oxidation of methane above gas hydrates at Hydrate Ridge, NE Pacific Ocean. *Marine Ecology Progress Series*, 2003, vol. 264, pp. 1–14.
 47. Luff R., Greinert J., Wallmann K., Klaucke L., Suess E. Simulation of long- term feedbacks from authigenic carbonate

- crust formation at cold vent sites. *Chemical Geology*, 2005, vol. 216, pp. 157–174.
48. Teichert B.M.A., Bohrmann G., Suess E. Chemoherms on Hydrate Ridge – unique microbially-mediated carbonate build-ups growing into the water column. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2005, vol. 227, no. 1–3, pp. 67–85.
49. Liang Q., Hu Y., Feng D., Peckmann J., Chen L., Yang S., Liang J., Tao J., Chen D. Authigenic carbonates from newly discovered active cold seeps on the northwestern slope of the South China Sea: Constraints on fluid sources, formation environments, and seepage dynamics. *Deep-Sea Research Part I*, 2017, vol. 124, pp. 31–41.
50. Milkov A.V., Sassen R. Economic geology of offshore gas hydrate accumulations and provinces. *Marine and Petroleum Geology*, 2002, vol. 19, pp. 1–11.
51. Sassen R., Roberts H.H., Carney R., Milkov A.V., De Freitas D.A., Lanoil B., Zhang C. Free hydrocarbon gas, gas hydrate, and authigenic minerals in chemosynthetic communities of the northern Gulf of Mexico continental slope: relation to microbial processes. *Chemical Geology*, 2004, vol. 205, pp. 195–217.
52. Chen D.F., Cathles L.M. III, Roberts H.H. The geochemical signatures of variable gas venting at gas hydrate sites. *Marine and Petroleum Geology*, 2004, vol. 21, no. 3, pp. 317–326.
53. Hoareau G., Monnin C., Odonne F. The stability of gypsum in marine sediments using the entire ODP/IODP porewater composition database. *Marine Geology*, 2011, vol. 279 (1–4), pp. 87–97.
54. Janout M.A., Holemann J., Krumpen T. Cross-shelf transport of warm and saline water in response to sea ice drift on the Laptev Sea shelf. *Journal of geophysical research: oceans*, 2013, vol. 118, pp. 563–576.
55. Ivanov V.V., Golovin P.N. Observations and modeling of dense water cascading from the northwestern Laptev Sea shelf. *Journal of geophysical research*, 2007, vol. 112, C09003.
56. Pickart R.S., Moore G.W.K., Torres D.J., Fratantoni P.S., Goldsmith R.A., Yang J. Upwelling on the continental slope of the Alaskan Beaufort Sea: Storms, ice, and oceanographic response. *Journal of geophysical research*, 2009, vol. 114, C00A13.
57. Balcı N., Shanks W.C. III, Mayer B., Mandernack K.W. Oxygen and sulfur isotope systematics of sulfate produced by bacterial and abiotic oxidation of pyrite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2007, vol. 71, no. 15, pp. 3796–3811.
58. Borowski W.S., Paull C.K., Ussler III W. Marine pore-water sulfate profiles indicate in situ methane flux from underlying gas hydrate. *Geology*, 1996, vol. 24, pp. 655–658.
59. Blanchet C.L., Kasten S., Vidal L., Poulton S.W., Ganeshram R., Thouveny N. Influence of diagenesis on the stable isotopic composition of biogenic carbonates from the Gulf of Tehuantepec oxygen minimum zone. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2012, vol. 13, no. 4. Available at: <http://dx.doi.org/10.1029/2011GC003800> (accessed 10 march 2020).
60. Riedinger N.B., Brunner B., Formolo M.J., Solomon E., Kasten S., Strasser M., Ferdelman T.G. Oxidative sulfur cycling in the deep biosphere of the Nankai Trough, Japan. *Geology*, 2010, vol. 38, pp. 851–854.
61. Crémère A., Pierre C., Blanc-Valleron M.-M., Zitter T., Çağatay M.N., Henry P. Methane-derived authigenic carbonates along the North Anatolian fault system in the Sea of Marmara (Turkey). *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2012, vol. 66, pp. 114–130.
62. Pierre C. The isotopic record of gypsum diagenesis in diluted solutions: Observations in natural salinas and experiments. *Chemical Geology*, 2018, vol. 493, pp. 451–457.

Received: 11 March 2020.

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.
- Elena V. Gershelis**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.
- Andrey A. Leonov**, engineer, National Research Tomsk Polytechnic University; junior researcher, Institute of High Current Electronics SB RAS.
- Alexey K. Mazurov**, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.
- Oleg V. Dudarev**, Dr. Sc., chief researcher, Pacific Oceanological Institute FEB RAS.
- 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.

УДК 622.276

ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ И ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАЗРЫВА ПЛАСТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕОЛОГО-ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ, УЧИТЫВАЮЩАЯ ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ КАРБОНАТНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ

Менгалиев Александр Генрихович¹,

mengaliev.alexandr@gmail.com

Мартюшев Дмитрий Александрович²,

martyushev@inbox.ru

¹ Филиал ООО «ЛУКОЙЛ-Инженеринг» «ПермНИПИнефть» в г. Перми, Россия, 614000, г. Пермь, ул. Советской Армии, 29.

² Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Россия, 614990, г. Пермь, пр. Комсомольский, 29.

Актуальность работы. В настоящее время одним из эффективных методов интенсификации добычи нефти на территории Пермского края и во всем мире является гидравлический разрыв пласта. Проведенные мероприятия гидравлического разрыва пласта часто сопровождаются увеличением обводненности добываемой продукции в виду того, что в процессе проведения мероприятия трещина гидравлического разрыва пласта распространялась в вертикальном направлении и тем самым увеличила каналы, соединяющие водонасыщенную и нефтяную зоны. Данного негативного последствия вполне можно было избежать, если бы перед проведением работ на скважине данное мероприятие было смоделировано на геолого-гидродинамической модели, которая учитывает особенности геологического строения данной залежи. Знание особенностей строения карбонатных залежей позволяет значительно уточнить и улучшить действующие геолого-гидродинамические модели. Соответственно использование геолого-гидродинамической модели, которые учитывают особенности строения карбонатных объектов, позволит подобрать рациональную систему разработки и обеспечить оптимальные геолого-технологические мероприятия и как следствие приведет к снижению экономических рисков.

Цель: оценка технологической и экономической эффективности гидравлического разрыва пласта с использованием гидродинамической модели, которая учитывает геологические особенности строения карбонатной залежи.

Объект: фаменская карбонатная залежь Гагаринского месторождения.

Методы: использование гидродинамического симулятора *Tetraest* версии 8.3.1 компании *Roxar*.

Результаты. Полученные в ходе моделирования технологии гидравлического разрыва пласта на шести скважинах-кандидатах результаты показали, что использование стандартной модели (применяется на сегодняшний момент) по сравнению с модифицированной геолого-гидродинамической моделью (учитывает анизотропию проницаемости и трещиноватость) приводит к завышению одних технологических показателей (прирост дебита нефти и накопленная добыча нефти) и к занижению других (обводненность добываемой продукции), что соответственно в последующем может привести к искажению картины экономической составляющей мероприятий. Проведенный экономический анализ позволил установить, что чистый дисконтированный доход, рассчитанный на модифицированной геолого-гидродинамической модели, оказались в 3,7 раз меньше по сравнению со стандартной, что является несомненно важными показателями при подборе скважин-кандидатов для планирования геолого-технологических мероприятий.

Ключевые слова:

Вертикальная и горизонтальная проницаемости, трещиноватость, увеличение обводненности, прирост дебита нефти, экономическая целесообразность, дополнительная добыча нефти.

Введение

В последнее время доля нефтяных активов Пермского края, которые относятся к карбонатным объектам, заметно возросла. Данные залежи обычно представлены различными типами пустотности – поровая матрица, трещины и каверны, значительной фильтрационно-емкостной неоднородности (различие, в некоторых случаях значительное, между вертикальной и горизонтальной проницаемостью), все это в различной мере влияет на производительность добывающих скважин, коэффициент извлечения нефти, а также на эффективность проводимых геолого-технологических мероприятий (ГТМ). Знание описанных особенностей строения карбонатных залежей позволяет значительно уточнить и улучшить действующие геолого-гидродинамические модели (ГГДМ). Соответственно использование ГГДМ, которые учитывают особенно-

сти строения карбонатных объектов, позволит подобрать рациональную систему разработки и обеспечить оптимальные ГТМ, и как следствие приведет к увеличению экономической составляющей проектов.

На сегодняшний момент при создании ГГДМ карбонатных объектов нефтяных месторождений Пермского края зачастую не учитывают описанные выше особенности их строения, особенно стоит отметить, что зачастую вертикальную проницаемость принимают равной нулю, хотя это далеко не так и об этом говорится в работах [1, 2]. Вертикальная проницаемость в карбонатных коллекторах играет особую роль в условиях активной роли пластовых вод [3–7]. Конус подошвенной воды часто образуется при нерациональной выработке запасов и необоснованных технологических режимах скважин. В карбонатных коллекторах, имеющих вертикальные трещины, процесс

конусообразования проявляется намного интенсивнее, чем, например, в терригенных коллекторах, так как именно они простираются далеко вниз и образуют пути для создания конусов воды.

Подводя итог вышесказанному, использование вертикальной проницаемости в ГГДМ является актуальной задачей, позволяющей повысить качество и достоверность прогнозирования процессов добычи и планируемых ГТМ. В Пермском крае около 40 % проводимых ГТМ не достигают своего планируемого эффекта, хотя предварительные расчеты на ГГДМ, которые не учитывают особенности геологического строения, показали и технологическую, и экономическую эффективность их реализации [8, 9].

В настоящее время одним из часто применяемых и эффективных методов интенсификации добычи нефти на территории Пермского края и во всем мире является гидравлический разрыв пласта (ГРП), однако именно с этим методом интенсификации добычи нефти связан риск со значительным увеличением обводненности [9, 10]. На территории Пермского края применяются самые разнообразные технологии проведения ГРП, такие как классический проппантный в терригенных коллекторах, кислотный – в карбонатных, кислотный ГРП с закреплением трещин проппантом, азотно-пенный ГРП и др. [10–19]. Проведенные мероприятия ГРП часто сопровождаются увеличением обводненности добываемой продукции ввиду того, что в процессе проведения мероприятия трещина ГРП распространилась в вертикальном направле-

нии и тем самым увеличила каналы, соединяющие водонасыщенную и нефтяную зоны [20–28]. Данное негативное последствие было отмечено после проведения кислотного гидроразрыва пласта (КГРП) на скважине 412 Гагаринского месторождения (объект Фм). Показатели эксплуатации и результаты обработки гидродинамических исследований скважин (ГДИ) представлены на рис. 1 и в табл. 1. Проведение КГРП в мае 2011 г. не привело к увеличению дебита нефти, зато значительно увеличилась обводненность добываемой продукции (с 1 до 99 %). Интерпретация данных ГДИ позволила установить, что горизонтальная проницаемость увеличилась незначительно (с 10,1 до 55,7 мД) по сравнению с вертикальной (с 70,8 до 2007,9 мД), что указывает на то, что трещина ГРП распространилась в большей мере в вертикальном направлении и тем самым соединила и увеличила трещины (каналы), связывающие водонасыщенную и нефтяную зоны. И только последующее проведение ремонтно-изоляционных работ позволило снизить обводненность добываемой продукции с 99 до 4–5 %.

Данного негативного последствия вполне можно было избежать, если бы перед проведением работ на скважине данное мероприятие было смоделировано на ГГДМ, которая учитывает особенности геологического строения данной залежи. Одним из основных параметров, на который необходимо обращать внимание при подборе скважин для проведения ГРП, является показатель анизотропии проницаемости пласта.

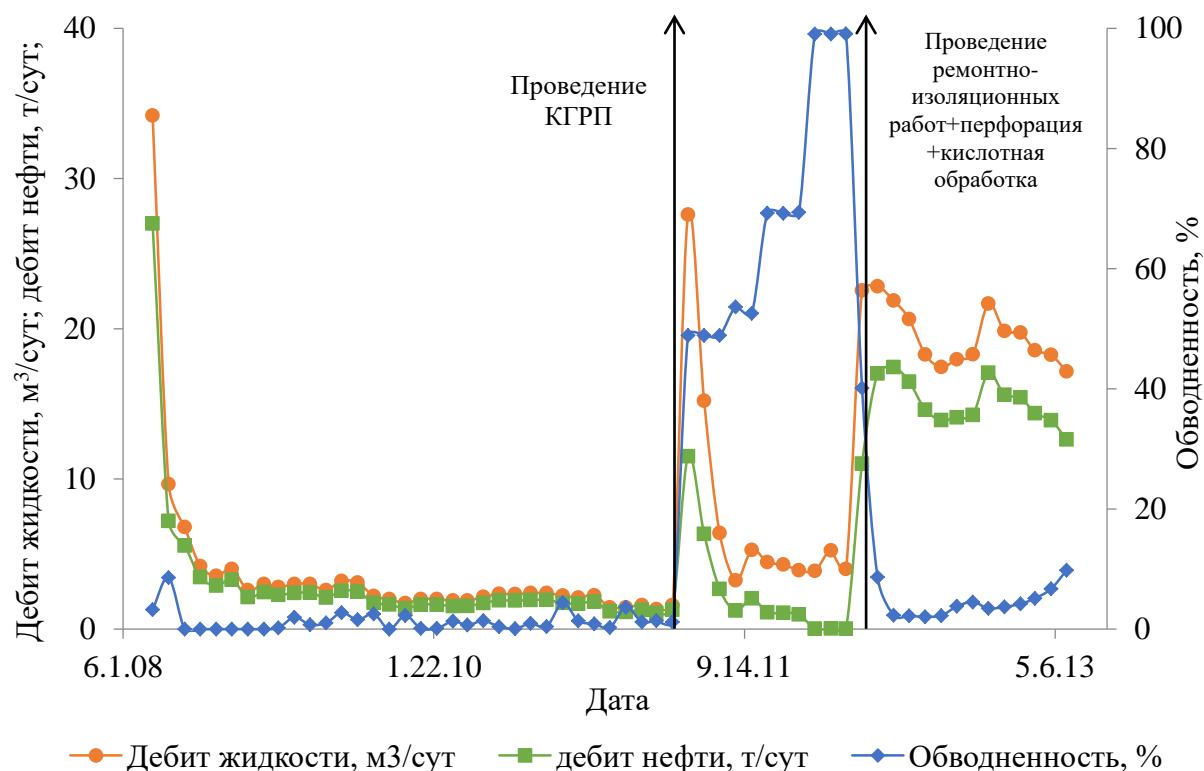


Рис. 1. Эксплуатация скважины № 412 Гагаринского месторождения (Фм залежь) до и после проведения кислотного ГРП

Fig. 1. Operation of well no. 412 of the Gagarinsky field (FM reservoir) before and after acid fracturing

Таблица 1. Технологические показатели эксплуатации скважины 412 Гагаринского месторождения до и после проведения кислотного ГРП

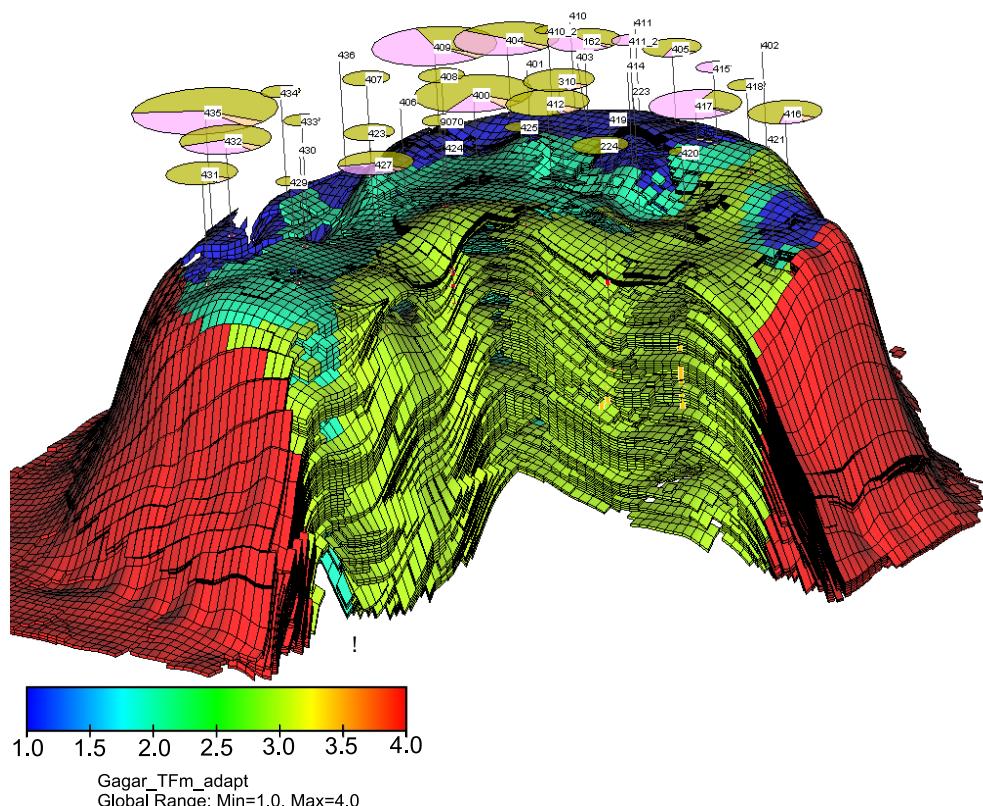
Table 1. Technological indicators of well operation 412 of the Gagarinsky field before and after acid fracturing

| Показатель Indicator | Дата проведения КГРП – 09.05.2011 Date of acid fracturing – 09.05.2011 | |
|---|--|--|
| | ГДИ до КГРП – 08.02.2011 Hydrodynamic studies before acid fracturing – 08.07.2011 | ГДИ после КГРП – 13.05.2011 Hydrodynamic studies after acid fracturing – 13.05.2011 |
| Пластовое давление, МПа Reservoir pressure, MPa | 6,7 | 6,9 |
| Забойное давление, МПа Bottom pressure, MPa | 3,7 | 4,4 |
| Толщина пласта, м Reservoir thickness, m | 8,5 | 8,5 |
| Кпрод, м ³ /(сут*МПа) Productivity coefficient, m ³ /(day·MPa) | 0,45 | 3,33 |
| Обводненность, % Watering, % | 0,25 | 48,8 |
| Вертикальная проницаемость, мД Vertical permeability, md | 70,8 | 2007,9 |
| Горизонтальная проницаемость, мД Horizontal permeability, md | 10,1 | 55,7 |

Создание ГГДМ, учитывая геологические особенности строения карбонатного коллектора

В работе [29] говорится о возможности качественной оценки вертикальной проницаемости карбонатных коллекторов и использования ее в ГГДМ. Авторами статьи была определена анизотропия проницаемости и получены зависимости ее динамики от изменения забойного и пластового давлений. С учетом полученных зависимостей и особенностей геологического строения

модифицирована ГГДМ карбонатная фаменская залежь Гагаринского месторождения. Внешний вид модифицированной геолого-гидродинамической модели фаменской залежи Гагаринского месторождения представлен на рис. 2 на примере куба измененных регионов (т. е. регионы фациальных зон с индивидуальными зависимостями множителей проницаемости от пластового давления, красным выделена зона без задания множителей, то есть там проницаемость нединамична).



Горизонтально ориентированные овалы – это текущие отборы скважин с указанием в центре номера скважины
Рис. 2. Внешний вид модифицированной ГГДМ фаменской залежи Гагаринского месторождения

Fig. 2. Appearance of a modified geological and hydrodynamic model of the Famennian deposit of the Gagarinsky field

Прогнозные расчеты технологической эффективности ГРП

С целью сравнения модифицированной ГГДМ со стандартной (без учета анизотропии проницаемости и наличия естественной трещиноватости и ее динамики в процессе разработки) были проведены расчеты ше-

сти ГРП на скважинах, утвержденных в качестве кандидатов для проведения ГРП в соответствии с актуальным планом ГТМ (предложения по проведению геолого-технических мероприятий на 2020–2022 гг. по месторождениям ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ») (рис. 3).

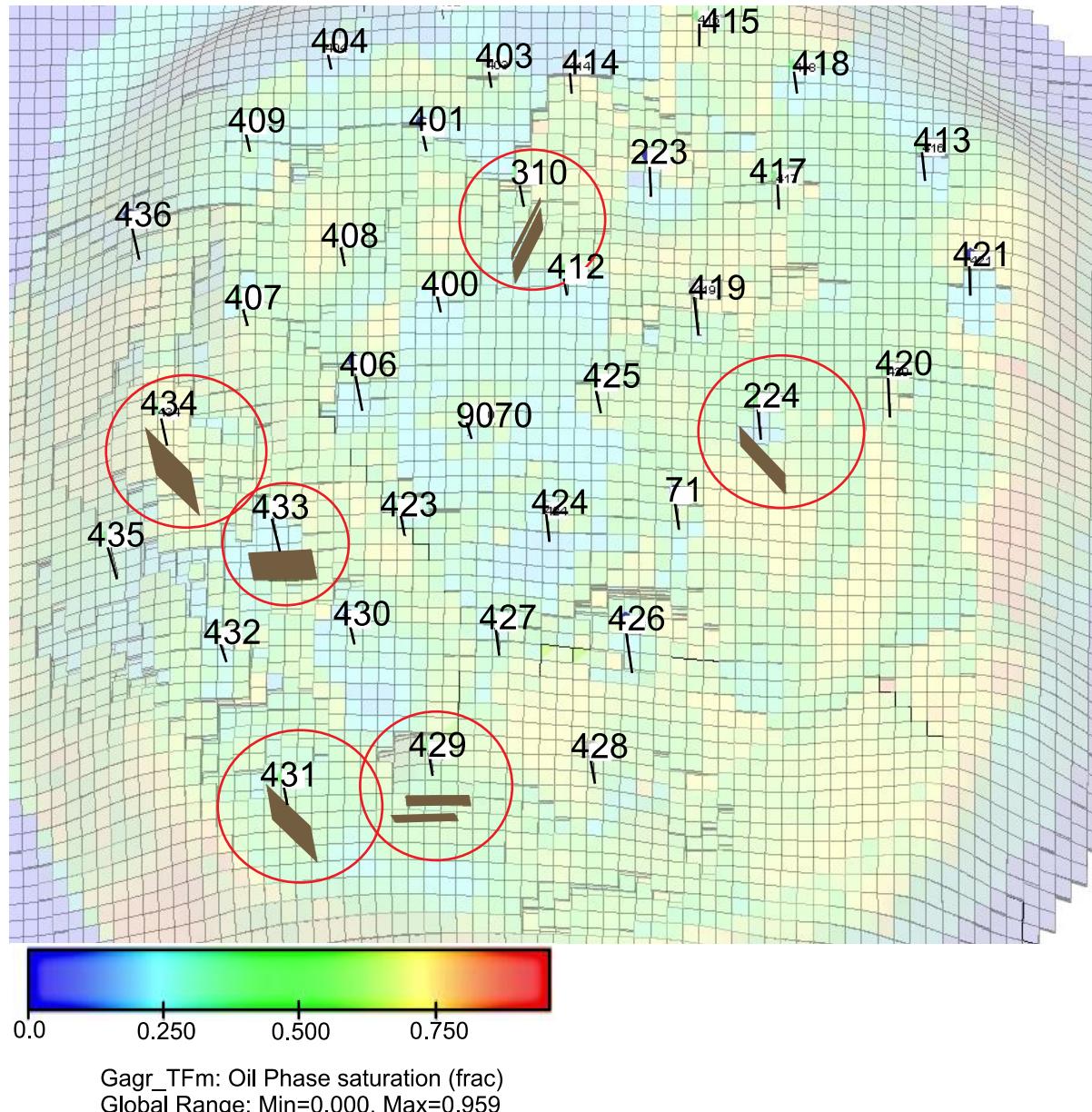


Рис. 3. Расположение скважин-кандидатов для проведения гидравлического разрыва пласта

Fig. 3. Location of candidate wells for hydraulic fracturing

Параметры трещины ГРП (полудлина, проводимость) задавались как средние по объекту по фактически проведенным мероприятиям, их значения составляют 100 м и 1000 мД²м соответственно. Запланированный прирост дебита нефти по каждой из шести скважин в соответствии с программой составляет 6 т/сут. Расположение скважины 434 с визуализированной трещиной ГРП представлено на рис. 4. Моделирование ГРП проводилось с помощью ключевого

слова *VFRA*, которое появилось в симуляторе Tempest с версии 8.0. Особенностью нового подхода к моделированию ГРП является то, что полностью поменялась визуальная составляющая трещины и возможность проведения трещины через неколлектор, что позволяет воспроизводить прорыв через тонкую перемычку.

Расчеты на стандартной ГГДМ (базовый вариант (БАЗ)) показали оптимистичные результаты, суммар-

ная дополнительная накопленная добыча нефти за время действия эффекта по залежи оценивается в 104,7 тыс. т нефти, таким образом на одну скважину приходится в среднем 17,5 тыс. т. Результаты расчета эффективности ГРП на стандартной ГГДМ представлены на рис. 5.

Гидродинамическая модель, использующая полученные и внедренные зависимости по коэффициенту анизотропии проницаемости, ожидаемо показала рас-

четы несколько хуже, суммарная дополнительная накопленная добыча нефти за время действия эффекта по залежи оценивается в 25,4 тыс. т нефти, таким образом на одну скважину приходится в среднем 4,2 тыс. т. Результаты расчета эффективности ГРП на модифицированной ГГДМ показаны на рис. 6.

Сравнение результатов технологической эффективности ГРП на скважинах-кандидатах представлены в табл. 2.

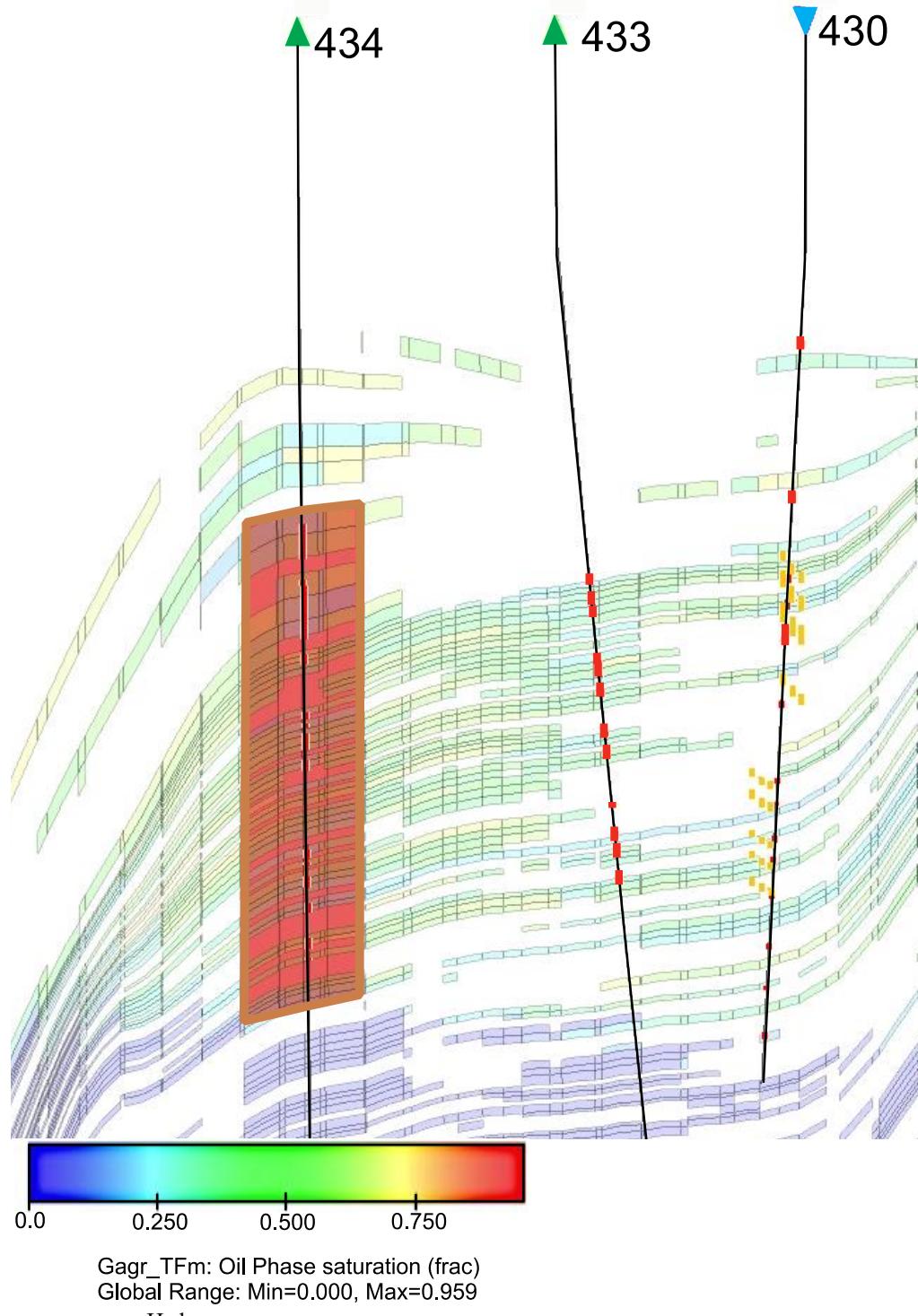


Рис. 4. Визуализация трещины гидравлического разрыва пласта на скважине-кандидате № 434

Fig. 4. Visualization of hydraulic fracture at candidate well 434

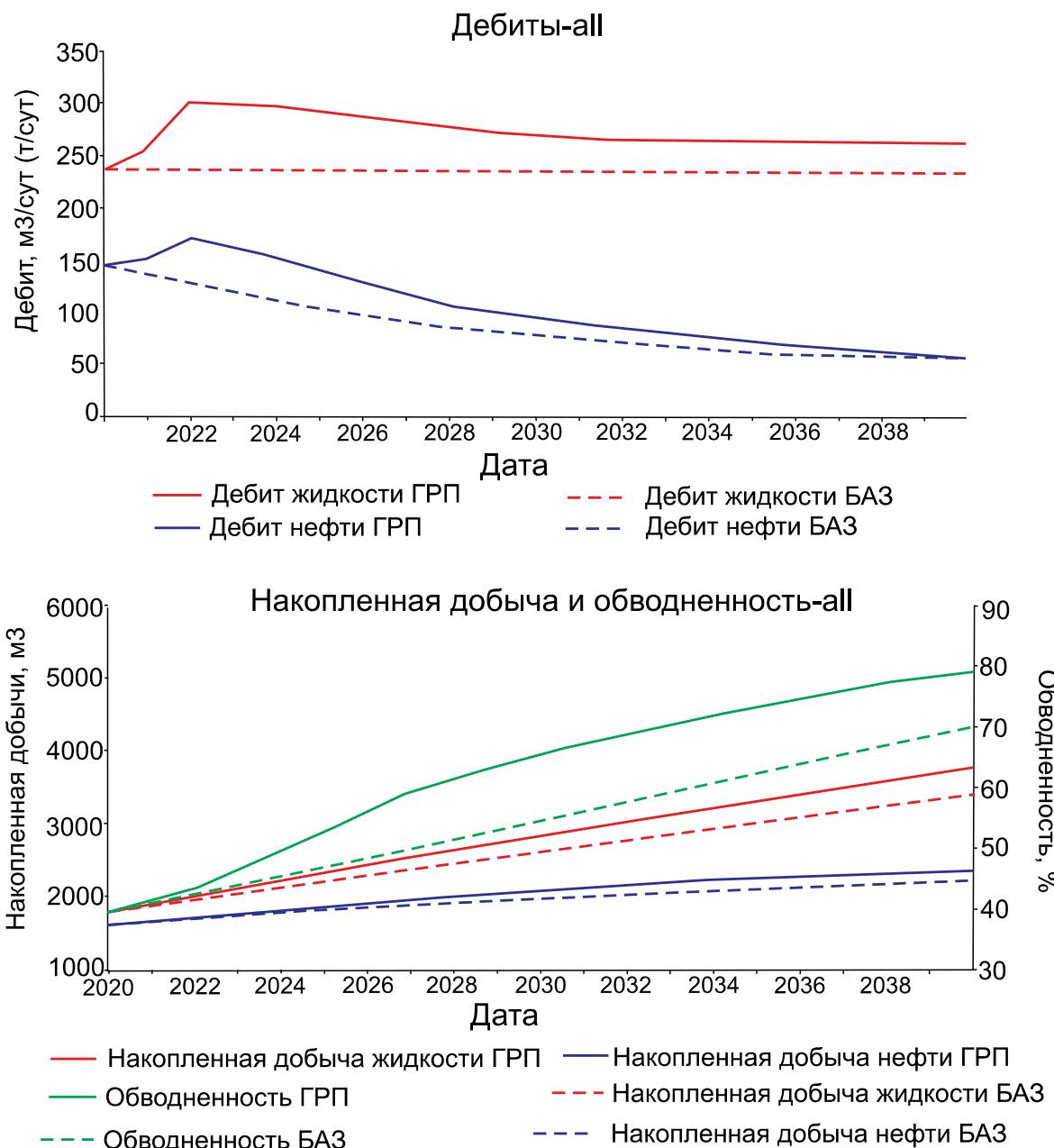


Рис. 5. Результаты расчета гидравлического разрыва пласта на стандартной ГГДМ

Fig. 5. Results of calculation of hydraulic fracturing on a standard geological and hydrodynamic model

Таблица 2. Сравнение результатов эффективности гидравлического разрыва пласта, полученные на стандартной и модифицированной геолого-гидродинамической моделях

Table 2. Comparison of results of hydraulic fracturing efficiency obtained on standard and modified geological and hydrodynamic models

| Параметр Parameter | Скважина/Well | | | | | | | | | | | |
|--|---------------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 224 | 310 | 429 | 431 | 433 | 434 | 2021 | 2021 | 2020 | 2021 | 2020 | 2021 |
| Год проведения ГРП Year of hydraulic fracturing | | | | | | | | | | | | |
| Мгновенный прирост дебита нефти, т/сут Instant increase in oil production rate, t/day | 6,0* | 3,1** | 4,9 | -1,8 | 5,7 | 1,5 | 6,2 | 6,2 | 5,9 | 5,0 | 5,7 | 4,9 |
| Мгновенный прирост обводненности, % Instant increase in watercut, % | 19,3 | 27,7 | 32,2 | 37,2 | 24,2 | 30,4 | 0,7 | 0,7 | 6,9 | 18,4 | -5,3 | 17,7 |

Примечание: слева показан результат на стандартной модели (*), справа – на модифицированной (**).

Note: result on the standard model is on the left (*), result on the modified one is on the right (**).

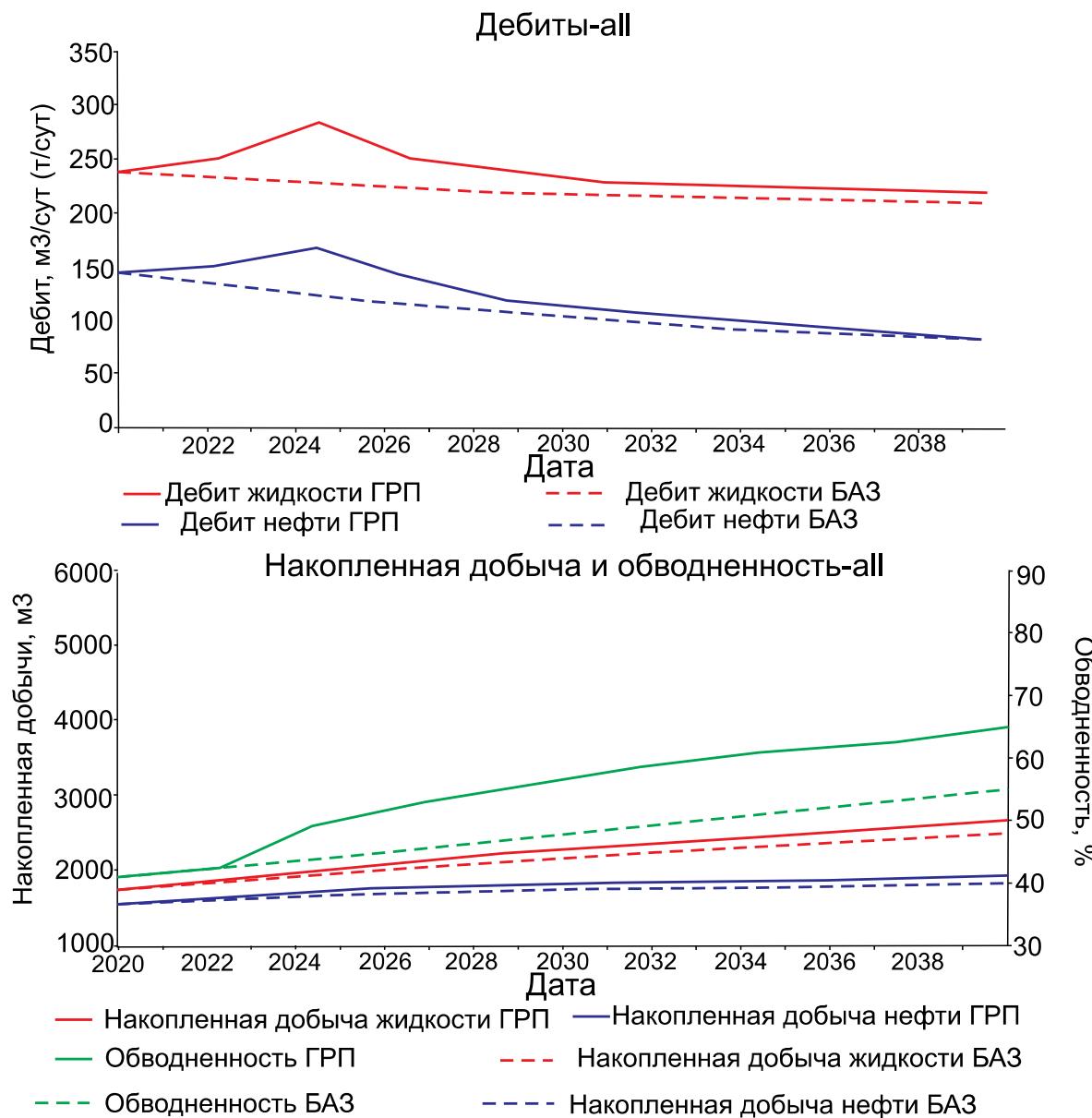


Рис. 6. Результаты расчета гидравлического разрыва пласта на модифицированной ГГДМ
Fig. 6. Results of calculation of hydraulic fracturing on a modified geological and hydrodynamic model

Таким образом, единственной рекомендуемой скважиной-кандидатом является скважина № 431, которая имеет одинаковый мгновенный прирост дебита нефти и обводненности, однако эффект закончился в три раза быстрее, и суммарная накопленная дополнительная добыча нефти от ГРП составила 7 тыс. т. Из табл. 2 видно, что при прогнозных расчетах ГРП на стандартной ГГДМ без учета особенностей геологического строения карбонатных массивных залежей существует риск недостижения плановых приростов дебитов, по некоторым скважинам значительно возрастает обводненность добываемой продукции и, как следствие, все это может привести к отрицательному экономическому эффекту.

Дополнительная добыча нефти, рассчитанная в ГГДМ (стандартная (базовая) и модифицированная) по результатам проведения ГРП на утвержденных скважинах-кандидатах, представлена на рис. 7.

Оценка экономической эффективности запланированных ГРП

По результатам моделирования ГРП на шести скважинах-кандидатах с использованием стандартной и модифицированной ГГДМ рассчитана экономическая составляющая этих мероприятий, представленная в табл. 3. Также на рис. 8 представлен график, отражающий чувствительность мероприятий к тем или иным изменениям. Данный тип графика позволяет визуально оценивать риски и определить критические точки планируемых мероприятий.

Анализируя полученные результаты расчета, стоит выделить основные моменты: ЧДД и индекс доходности, рассчитанные на модифицированной ГГДМ оказались в 3,7 и 2,8 раз меньше по сравнению со стандартной, что является, несомненно, важным показателем при подборе скважин-кандидатов для

планирования ГТМ. В целом стоить отметить, что предлагаемые ГРП на скважинах являются экономически эффективными, но со значительной разницей в экономических показателях между моделями. Наиболее чувствительным параметром является цена нефти, при снижении цены более чем на 26 % проект становится нерентабельным (рис. 8).

Таким образом, расчеты на модифицированной модели показывают, что, вероятнее всего, экономический эффект будет не таким оптимистичным, как при стандартной модели, так как учитываются риски при реализации технологии ГРП. Соответственно с помощью модифицированной цифровой модели можно более обоснованно подбирать скважины-кандидаты под проведения ГРП.

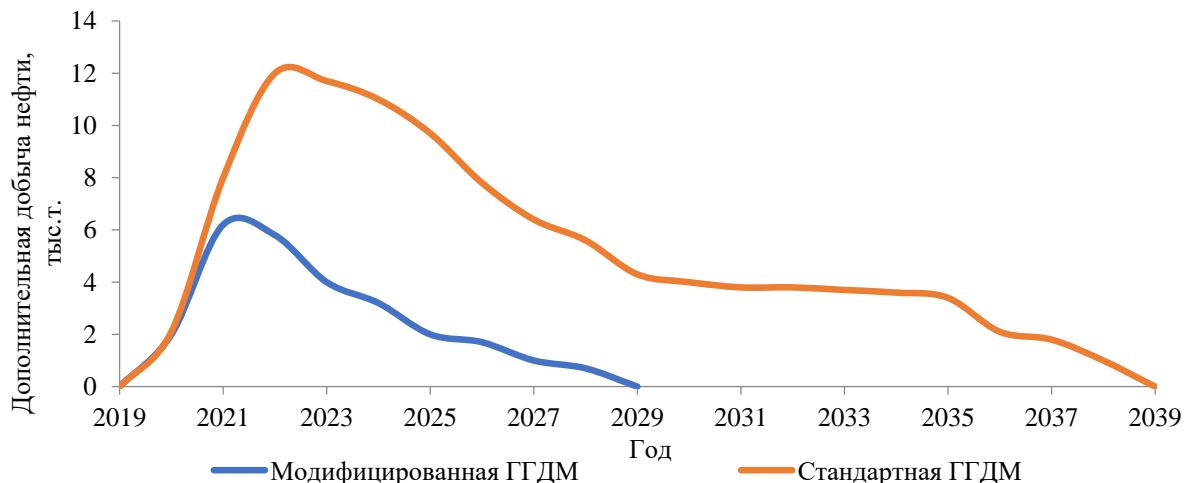


Рис. 7. Дополнительная добыча нефти в динамике, рассчитанная в геолого-гидродинамической модели (стандартная и модифицированная) по результатам проведения гидравлического разрыва пласта на утвержденных скважинах-кандидатах

Fig. 7. Additional oil production in dynamics, calculated in a geological and hydrodynamic model (standard and modified) based on the results of hydraulic fracturing at approved candidate wells

Таблица 3. Экономические показатели планируемых мероприятий по гидравлическому разрыву пласта

Table 3. Economic indicators of the planned hydraulic fracturing

| Показатели экономической эффективности Indicators of economic efficiency | Стандартная ГГДМ Standard geological and hydrodynamic model | Модифицированная ГГДМ Modified geological and hydrodynamic model |
|--|--|---|
| Чистый дисконтированный доход (ЧДД), млн р. Net present value (NPV), million rubles | 364,59 | 97,60 |
| Индекс доходности Yield index | 8,18 | 2,92 |
| Срок окупаемости, мес. Payback period, months | 6 | 10 |
| Норма доходности Rate of return | 2,16 | 1,25 |

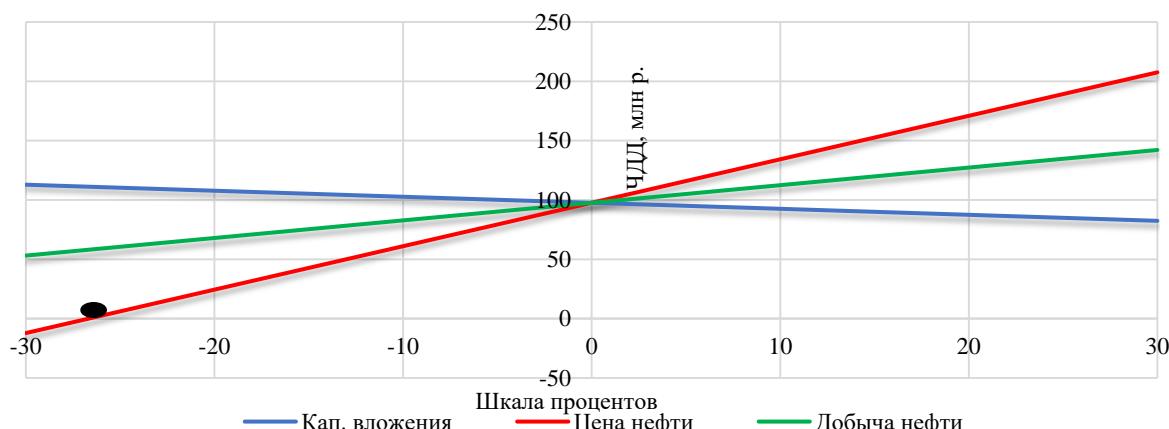


Рис. 8. Диаграмма результатов анализа чувствительности, полученная по результатам расчета в модифицированной ГГДМ

Fig. 8. Diagram of sensitivity analysis results, obtained from the calculation results in a modified geological and hydrodynamic model

Заключение

Полученные в ходе моделирования технологии ГРП на шести скважинах-кандидатах результаты показали, что использование стандартной (применяется на сегодняшний момент) по сравнению с модифицированной ГГДМ (учитывает анизотропию проницаемости и трещиноватость) приводит к завышению одних технологических показателей (прирост дебита нефти и накапленная добыча нефти) и к занижению других (обводненность добываемой продукции), что соответственно в последующем может привести к незначительной или отрицательной экономической составляющей мероприятий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Henderson N., Pena L. Simulating effects of the permeability anisotropy on formation of viscous fingers during waterflood operations // Journal of petroleum science and engineering. – 2017. – V. 153. – P. 178–186.
2. Jackson R.R., Banerjee R. Application of reservoir simulation and history matching methods to MDT vertical interference testing and determination of permeability anisotropy // 8th European Conference on the mathematics of oil recovery. – Freiberg, Germany, 3–6 September 2002.
3. 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. Инженеринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 8. – С. 30–36.
4. Причины увеличения обводненности в скважинах после проведения гидравлического разрыва в неоднородных пластах / А.С. Валеев, М.Р. Дулкарнаев, Ю.А. Котенев, Ш.Х. Султанов, Л.С. Бриллиант // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 6. – С. 140–147.
5. Modeling fracture propagation and cleanup for dry nanoparticle-stabilized-foam fracturing fluids / A. Qajar, Z. Xue, A.J. Worthen, K.P. Johnston, M. Prodanovic // Journal of Petroleum Science and Engineering. – October 2016. – V. 146. – P. 210–221.
6. On the use of high aspect ratio finite elements to model hydraulic fracturing in deformable porous media / O.L. Manzoli, P.R. Cleto, M. Sanchez, L.J.N. Guimaraes, M.A. Maedo // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. – June 2019. – V. 350. – P. 57–80.
7. Impact of the distance between pre-existing fracture and wellbore on hydraulic fracture propagation / Bo Zhang, Jiyang Liu, S.G. Wang, Shucai Li, Weimin Yang // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – September 2018. – V. 57. – P. 155–165.
8. Восстановление и повышение продуктивности добывающих скважин каширского и подольского объектов на одном из нефтяных месторождений Пермского края / А.С. Вотинов, С.А. Дроздов, В.Л. Малышева, В.А. Мордвинов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2018. – Т. 18. – № 2. – С. 140–148.
9. Экономидес М., Олини Р., Валько П. Унифицированный дизайн гидроразрыва пласта: от теории к практике. – М.; Ижевск: Институт компьютерных технологий, 2007. – 237 с.
10. Развитие технологий гидравлического разрыва пласта на месторождениях Пермского края / В.Л. Воеводкин, А.А. Алероев, Т.Р. Балдина, А.В. Распопов, А.С. Казанцев, С.А. Кондратьев // Нефтяное хозяйство. – 2018. – № 11. – С. 108–113.
11. Черепанов С.С., Чумаков Г.Н., Пономарева И.Н. Результаты проведения кислотного гидроразрыва пласта с проппантом на турнейско-фаменской залежи Озерного месторождения // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2015. – Т. 14. – № 16. – С. 70–76.
12. Галкин В.И., Пономарева И.Н., Колтырин А.Н. Разработка вероятностно-статистическими моделями для оценки эффективности применения проппантного гидравлического разрыва пласта (на примере объекта Тл-Бб Батырбайского месторождения) // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2018. – Т. 17. – № 1. – С. 37–49.
13. Бархатов Э.А., Яркеева Н.Р. Эффективность применения многозонного гидроразрыва пласта в горизонтальных скважинах // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 10. – С. 50–58.
14. Проведение проппантных гидроразрывов низкопроницаемых пластов на нефтяных месторождениях Немецкого автономного округа / А.А. Алероев, С.А. Кондратьев, Р.Р. Шарафаев, Д.В. Новокрещеных, В.А. Жигалов // Нефтяное хозяйство. – 2017. – № 9. – С. 108–111.
15. Мухаметшин В.В. Обоснование трендов повышения степени выработки запасов нефти нижнемеловых отложений Западной Сибири на основе идентификации объектов // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 5. – С. 117–124.
16. Морозов П.Е. Псевдоскин-фактор и оптимальная проводимость трещины гидроразрыва в круговом пласте // Нефтяное хозяйство. – 2019. – № 3. – С. 74–77.
17. Boahua Liu, Yan Jin, Mian Chen. Influence of vugs in fractured-vuggy carbonate reservoirs on hydraulic fracture propagation based on laboratory experiments // Journal of Structural Geology. – July 2019. – V. 124. – P. 143–150.
18. HanYi Wang, Sharma M.M. Modeling of hydraulic fracture closure on proppants with proppant settling // Journal of Petroleum Science and Engineering. – December 2018. – V. 171. – P. 636–645.
19. Modeling fate and transport of hydraulic fracturing fluid in the presence of abandoned wells / R. Taherdangkoo, A. Tatomir, T. Anighoro, M. Sauter // Journal of Contaminant Hydrology. – February 2019. – V. 221. – P. 58–68.
20. Garagash I.A., Osipov A.A., Boronin S.A. Dynamic dredging of proppant particles in a hydraulic fracture // International Journal of Engineering Science. – February 2019. – V. 135. – P. 86–101.
21. Livio Santos, Arash Dahi Taleghani, Guoqiang Li. Expandable proppants to moderate production drop in hydraulically fractured wells // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – July 2018. – V. 55. – P. 182–190.
22. Computer simulation of hydraulic fractures / J. Adachi, E. Siebrits, A. Peirce, J. Desroches // International Journal of Rock Mechanics and Mining Science. – July 2007. – V. 44. – Iss. 5. – P. 739–757.
23. HanYi Wang. Hydraulic fracture propagation in naturally fractured reservoir: complex fracture of fracture networks // Journal of Natural Gas Science and Engineering. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1875510019301556> (дата обращения 15.04.2020).
24. Hydro-mechanical modeling of hydraulic fracture propagation and its interactions with frictional natural fractures / J.A.R. Cordero, E.M. Sanchez, D. Roehl, L.C. Pereira // Computers and Geotechnics. – July 2019. – V. 111. – P. 290–300.
25. Yaghoubi A. Hydraulic fracturing modeling using a discrete fracture network in the Barnett Shale // International Journal of

В виду того что в нефтяных компаниях вводятся все больше объектов с трудноизвлекаемыми и нетрадиционными запасами углеводородного сырья перед компаниями ставятся все новые актуальные задачи, заключающиеся в подборе и развитии новых технологий. В этой связи предопределяются направления развития технологий геолого-гидродинамического моделирования: акцент делается на более полные и совершенные модели, описывающие сложные процессы, происходящие в пласте. Предлагаемые подходы и приемы, описанные в статье, показали свою эффективность и могут быть использованы для дальнейшего расширения на другие карбонатные объекты.

- Rock Mechanics and Mining Science. – July 2019. – V. 119. – P. 98–108.
26. An experimental investigation into the characteristics of hydraulic fracturing and fracture permeability after hydraulic fracturing in granite / Yanjun Zhang, Yueqiang Ma, Zhongjun Hu, Honglei Lei, Qian Zhang // Renewable Energy. – September 2019. – V. 140. – P. 615–624.
27. Patel S.M., Sondergeld C.H., Rai C.S. Hydraulic fracture permeability estimation using stimulation pressure data // International Journal of Rock Mechanics and Mining Science. – January 2018. – V. 101. – P. 50–53.
28. Zhang Simulation of proppant distribution in hydraulically fractured shale network during shut-in period / Fei Wang, Baoman Li, Qiaoyn Chen, Shicheng // Journal of Petroleum Science and Engineering. – July 2019. – V. 178. – P. 467–474.
29. Менгалиев А.Г., Мартюшев Д.А. Определение и изменение показателя анизотропии проницаемости в процессе разработки карбонатной залежи нефтяного месторождения // Инженер-нефтяник. – 2019. – № 1 (46). – С. 27–33.

Поступила 03.06.2020 г.

Информация об авторах

Менгалиев А.Г., инженер 2-й категории отдела создания и мониторинга гидродинамических моделей приоритетных месторождений филиала ООО «ЛУКОЙЛ-Инженеринг» «ПермНИПИнефть» в г. Перми.

Мартюшев Д.А., кандидат технических наук, доцент кафедры Нефтегазовые технологии Пермского национального исследовательского политехнического университета.

UDC 622.276

ASSESSMENT OF TECHNOLOGICAL AND ECONOMIC EFFICIENCY OF FRACTURING FORMATIONS USING GEOLOGICAL AND HYDRODYNAMIC MODELS, CONSIDERING FEATURES OF CARBONATE RESERVOIR STRUCTURE

Alexander G. Mengaliev¹,
mengaliev.alexandr@gmail.com

Dmitriy A. Martyushev²,
martyushev@inbox.ru

¹ Branch of LLC «LUKOIL-Engineering» «PermNIPIneft» in Perm,
29, Sovetskoy Armii street, Perm, 614000, Russia.

² Perm National Research Polytechnic University,
29, Komsomolskiy avenue, Perm, 614990, Russia.

The relevance of the discussed issue. Currently, one of the most effective methods to intensify oil production in the Perm Territory and throughout the world is hydraulic fracturing. The conducted hydraulic fracturing measures are often accompanied by an increase in water cut of the produced products due to the fact that during the event the hydraulic fracturing spread in vertical direction and thereby increased the channels connecting the water-saturated and oil zones. This negative effect could be avoided if before the work on the well the event was modeled on a geological and hydrodynamic model that takes into account the specific geological structure of this deposit. Knowledge of the structural features of carbonate deposits allows us to significantly clarify and improve the existing geological and hydrodynamic models. Accordingly, the use of geological and hydrodynamic models that take into account the structural features of carbonate objects will allow choosing a rational system of development and ensuring optimal geological and technological measures and, as a result, will lead to a decrease in economic risks.

The main aim of the study is to evaluate the technological and economic efficiency of hydraulic fracturing using a hydrodynamic model that takes into account the geological features of the carbonate reservoir structure.

Object: Famenian carbonate reservoir of the Gagarinsky field.

Methods: processing of geological research data; use of the Tempest hydrodynamic simulator version 8.3.1 from Roxar.

The results obtained during the simulation of hydraulic fracturing at six candidate wells showed that the use of the standard model (currently used) compared to the modified geological and hydrodynamic model (takes into account the permeability anisotropy and fracturing) leads to overestimation of some technological indicators (increase in oil production and cumulative oil production) and to underestimation of others (the water content of the extracted products), which subsequently can lead to a distortion in economic component of events. The economic analysis made it possible to establish that the net discounted income calculated on the modified geological and hydrodynamic model turned out to be 3.7 times less than the standard one, which is undoubtedly the important indicators in selecting candidates for planning geological and technological measures.

Key words:

Vertical and horizontal permeability, fracturing, increase in water cut, increase in oil production rate, economic feasibility, additional oil production.

REFERENCES

1. Henderson N., Pena L. Simulating effects of the permeability anisotropy on formation of viscous fingers during waterflood operations. *Journal of petroleum science and engineering*, 2017, vol. 153, pp. 178–186.
2. Jackson R.R., Banerjee R. Application of reservoir simulation and history matching methods to MDT vertical interference testing and determination of permeability anisotropy. *8th European Conference on the mathematics of oil recovery*. Freiberg, Germany, 3–6 September, 2002.
3. Mukhametshin V.V., Andreev V.E. Improving the efficiency of assessing the effectiveness of technologies aimed at expanding the use of the resource base of deposits with hard-to-recover reserves. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets engineering*, 2018, vol. 329, no. 8, pp. 30–36. In Rus.
4. Valeev A.S., Dulkarnaev M.R., Kotenev Yu.A., Sultanov Sh.H., Brilliant L.S. The reasons for the increase in water cut in wells after the hydraulic fracturing in heterogeneous reservoirs. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets engineering*, 2018, vol. 329, no. 6, pp. 140–147. In Rus.
5. Qajar A., Xue Z., Worthen A.J., Johnston K.P., Prodanovic M. Modeling fracture propagation and cleanup for dry nanoparticle-stabilized-foam fracturing fluids. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, October 2016, vol.146, pp. 210–221.
6. Manzoli O.L., Cleto P.R., Sanchez M., Guimaraes L.J.N., Maedo M.A. On the use of high aspect ratio finite elements to model hydraulic fracturing in deformable porous media. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, June 2019, vol. 350, pp. 57–80.
7. Bo Zhang, Jiyang Liu, Wang S.G., Shucai Li, Weimin Yang. Impact of the distance between pre-existing fracture and wellbore on hydraulic fracture propagation. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, September 2018, vol. 57, pp. 155–165.
8. Votinov A.S., Drozdov S.A., Malysheva V.L., Mordvinov V.A. Restoration and increase of productivity of producing wells of Kashirsky and Podolsk facilities at one of the oil fields of the Perm Territory. *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Geology. Oil and gas and mining*, 2018, vol. 18, no. 2, pp. 140–148. In Rus.
9. Economides M., Olini R., Valko P. *Unificirovanny dizayn gidrorazryva plasta: ot teorii k praktike* [Unified reservoir fracture design: from theory to practice]. Moscow, Izhevsk, Institute of Computer Technologies Publ., 2007. 237 p.
10. Voevodkin V.L., Aleroov A.A., Baldina T.R., Raspovov A.V., Kazantsev A.S., Kondratiev S.A. Development of hydraulic fracturing technologies in the fields of the Perm Krai. *Oil industry*, 2018, no. 11, pp. 108–113. In Rus.
11. Cherepanov S.S., Chumakov G.N., Ponomareva I.N. Results of acid fracturing with proppant at the Tournaisian-Famenian

- deposit of the Ozernoye field. *Perm National Research Polytechnic University. Geology. Oil and gas and mining*, 2015, vol. 14, no. 16, pp. 70–76. In Rus.
12. Galkin V.I., Ponomareva I.N., Koltyrin A.N. Development of probabilistic-statistical models for evaluating the effectiveness of the use of proppant hydraulic fracturing (on the example of the T-Bb facility of the Batyrbai field). *Perm National Research Polytechnic University. Geology. Oil and gas and mining*, 2018, vol. 17, no. 1, pp. 37–49. In Rus.
 13. Barkhatov E.A., Yarkeeva N.R. The effectiveness of multi-zone hydraulic fracturing in horizontal wells. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets engineering*, 2017, vol. 328, no. 10, pp. 50–58. In Rus.
 14. Aleroov A.A., Kondratiev S.A., Sharafayev R.R., Novokreshchennykh D.V., Zhigalov V.A. Carrying proppant fracturing low permeability reservoirs in the oil fields of the German autonomous region. *Oil Industry*, 2017, no. 9, pp. 108–111. In Rus.
 15. Mukhametshin V.V. Justification of trends in increasing the degree of oil reserves in the Lower Cretaceous deposits of Western Siberia based on the identification of objects. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets engineering*, 2018, vol. 329, no. 5, pp. 117–124. In Rus.
 16. Morozov P.E. Pseudoskin factor and optimum fracture conductivity of a fracture in a circular reservoir. *Oil industry*, 2019, no. 3, pp. 74–77. In Rus.
 17. Boahua Liu, Yan Jin, Mian Chen. Influence of vugs in fractured-vuggy carbonate reservoirs on hydraulic fracture propagation based on laboratory experiments. *Journal of Structural Geology*, July 2019, vol. 124, pp. 143–150.
 18. HanYi Wang, Sharma M.M. Modeling of hydraulic fracture closure on proppants with proppant settling. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, December 2018, vol. 171, pp. 636–645.
 19. Taherdangkoo R., Tatomir A., Anighoro T., Sauter M. Modeling fate and transport of hydraulic fracturing fluid in the presence of abandoned wells. *Journal of Contaminant Hydrology*, February 2019, vol. 221, pp. 58–68.
 20. Garagash I.A., Osipov A.A., Boronin S.A. Dynamic dredging of proppant particles in a hydraulic fracture. *International Journal of Engineering Science*, February 2019, vol. 135, pp. 86–101.
 21. Livio Santos, Arash Dahi Taleghani, Guoqiang Li. Expandable proppants to moderate production drop in hydraulically fractured wells. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, July 2018, vol. 55, pp. 182–190.
 22. Adachi J., Siebrits E., Peirce A., J. Desroches. Computer simulation of hydraulic fractures. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, July 2007, vol. 44, Iss. 5, pp. 739–757.
 23. HanYi Wang. Hydraulic fracture propagation in naturally fractured reservoir: complex fracture of fracture networks. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1875510019301556> (accessed 15 April 2020).
 24. Cordero J.A.R., Sanchez E.M., Roehl D., Pereira L.C. Hydro-mechanical modeling of hydraulic fracture propagation and its interactions with frictional natural fractures. *Computers and Geotechnics*, July 2019, vol. 111, pp. 290–300.
 25. Ali Yaghoubi. Hydraulic fracturing modeling using a discrete fracture network in the Barnett Shale. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, July 2019, vol. 119, pp. 98–108.
 26. Yanjun Zhang, Yueqiang Ma, Zhongjun Hu, Honglei Lei, Qian Zhang. An experimental investigation into the characteristics of hydraulic fracturing and fracture permeability after hydraulic fracturing in granite. *Renewable Energy*, September 2019, vol. 140, pp. 615–624.
 27. Patel S.M., Sondergeld C.H., Rai C.S. Hydraulic fracture permeability estimation using stimulation pressure data. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, January 2018, vol. 101, pp. 50–53.
 28. Fei Wang, Baoman Li, Qiaoyin Chen, Shicheng Zhang. Simulation of proppant distribution in hydraulically fractured shale network during shut-in period. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, July 2019, vol. 178, pp. 467–474.
 29. Mengaliev A.G., Martyushev D.A. Determination and change of permeability anisotropy in the development of a carbonate reservoir of an oil field. *Petroleum engineer*, 2019, no. 1 (46), pp. 27–33. In Rus.

Received: 3 June 2020.

Information about the authors

- Alexander G. Mengaliev**, 2nd category engineer, branch of LLC «LUKOIL-Engineering» «PermNIPIneft» in Perm.
Dmitriy A. Martyushev, Cand. Sc., assistant professor, Perm National Research Polytechnic University.

УДК 553.493:550.42

МИНЕРАЛОГИЯ, ГЕОХИМИЯ И ГЕНЕЗИС РЕДКОМЕТАЛЛЬНОГО Zr-Nb-Hf-Ta-P3Э-Ga ОРУДЕНЕНИЯ В ПЛАСТЕ XXX МИНУСИНСКОГО БАССЕЙНА

Вергунов Алексей Викторович¹,
alexeivergunov@rambler.ru

Арбузов Сергей Иванович¹,
siarbuzov@mail.ru

Еремеева Влада Владиславовна¹,
vlada.ere meeva1996@yandex.ru

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

Актуальность исследования обусловлена необходимостью оценки влияния вулканогенного пирокластического материала на формирование геохимического фона редких элементов в угле.

Цель: изучить минералогические и геохимические особенности углей и пород пласта XXX Минусинского угольного бассейна.

Объекты: угли и породы пласта XXX Минусинского бассейна.

Методы: опробование угольного пласта XXX Минусинского бассейна; химический состав определен методами масс-спектрометрии с индуктивно связанный плазмой (ICP-MS), атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанный плазмой (ICP-AES), инструментальным нейтронно-активационным анализом (ИНАА); минеральный состав изучен методами оптической микроскопии, петрографического анализа, сканирующей электронной микроскопии, рентгеновской дифрактометрии.

Результаты. Выполнены комплексные минералого-геохимические исследования редкометалльного Zr-Nb-Hf-Ta-P3Э-Ga оруденения в пласте XXX-XXXa Изыхского месторождения Минусинского бассейна. В золе угля максимальное содержание Zr составляет 1,4 %, Nb – 0,26 %, Hf – 164 г/т, Ta – 21,2 г/т, суммы P3Э – 0,8 %, Ga – 226 г/т. Рудное вещество главным образом сконцентрировано в тонкодисперсной минеральной фазе, представленной преимущественно Zr-Nb-Ti-Fe оксидами, сложными Nb-Zr-P силикатами, редкоземельными фосфатами (моанцит, ксенотит). Установлена связь аномальных концентраций редких металлов с внутривыработкой породным прослой. В минеральном составе породного прослоя преобладает каолинит (68,9 %), меньшие распространены кварц (11,0 %), калиевые полевые шпаты (7,0 %) и альбит (5,6 %). Установлена вулканогенно-пирокластическая природа породного прослоя и определен его первичный состав как пантеллерит-комендитовый. Подобный по составу породный прослой, с которым связано редкометалльное оруденение в углях, известен в углях кемеровской свиты Кузбасса того же возраста. Комплексное Zr-Nb-Hf-Ta-P3Э-Ga оруденение в углях Кузнецкого и Минусинского бассейна, связанное с вулканогенной пирокластикой, свидетельствует о возможном проявлении активного кислого и щелочного вулканизма планетарного масштаба в период формирования углей и о возможности выявления подобного оруденения в углях пермского возраста других бассейнов.

Ключевые слова:

Уголь, угольный бассейн, редкометалльное оруденение, вулканогенная пироклазтика, Минусинский бассейн.

Введение

В конце XX в. в Минусинском бассейне в пласте XXX изыхской свиты Изыхского месторождения было выявлено специфическое комплексное редкометалльное Zr-Nb-Hf-Ta-P3Э оруденение [1]. Согласно опубликованным данным, угли в нижней пачке пласта XXX содержат до 0,25 % P3Э, до 1 % Zr, до 46 г/т Та. Высказано предположение о возможной связи этих аномалий с вулканогенной пироклазтикой и о сходстве их с проявлением близкой по составу редкометалльной минерализации в углях пласта XI в кемеровской свите Кузбасса.

В настоящее время выявлено и изучено несколько комплексных редкометалльных месторождений в углях мира, состав которых схож с рудами Минусинского бассейна. Таковыми являются несколько месторождений в Китае [2–5] и России (Кузбасс) [6–8].

Для выяснения источника редких металлов в углях, а также возможной связи этого проявления с аналогичным месторождением в Кузбассе, были детально

опробованы и изучены угли и породы пласта XXX Минусинского угольного бассейна.

Геологическая характеристика объекта исследований

Минусинский угольный бассейн располагается на юге Центрально-Сибирского региона. В геологическом плане он приурочен к одноименному прогибу, представляющему синклинальную структуру, вытянутую субмеридионально и ограниченную с запада, востока и юга структурами Кузнецкого Алатау, Восточного и Западного Саян [9]. Продуктивная толща сложена нижнекаменноугольными – верхнепермскими отложениями. Основными промышленными месторождениями для бассейна являются Черногорское, Изыхское и Бейское.

Изыхское месторождение расположено в центральной части угольного бассейна. В структурном плане месторождение выполняет коробчатую мульду с пологим дном, вытянутую в северо-западном направлении (рис. 1).

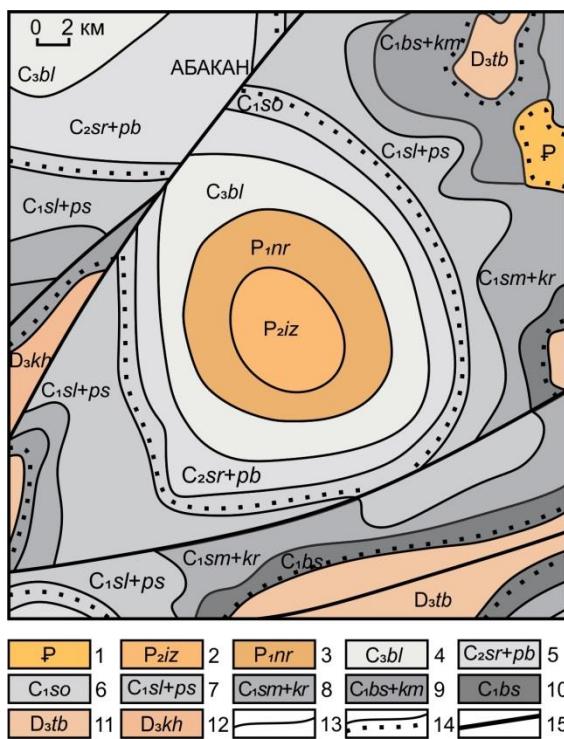


Рис. 1. Геологическая карта Изыхского месторождения [10]: 1 – палеогеновые образования; 2, 3 – пермские отложения: 2 – изыхская свита – алевролиты, аргиллиты, песчаники, пласти каменного угля (до 270 м), 3 – нарылковская свита – песчаники, алевролиты, аргиллиты, углистые аргиллиты, пласти каменного угля (до 360 м); 4–10 – отложения карбонового возраста: 4 – белоярская свита, 5 – сарская, черногорская и побережная свиты объединенные, 6 – серпуховский ярус, соленоозерская свита, 7 – визеийский ярус, соломенская ямкинская, байуновская свиты объединенные, 8 – турнейский ярус, самохвальская и кривинская свиты объединенные, 9 – быстрыанская, алтайская и камыштинская свиты объединенные, 10 – быстрыанская свита; 11, 12 – отложения девонского возраста: 11 – фаменский ярус, тубинская свита, 12 – франский ярус, кокхайская свита; 13, 14 – геологические границы: 13 – согласного залегания, 14 – несогласного залегания; 15 – разрывные нарушения

Fig. 1. Geological map of the Izykh deposit [10]: 1 – Paleogene sediments; 2, 3 – Permian sediments: 2 – Izykhskaya suite – siltstones, mudstones, sandstones, coal seams (up to 270 m), 3 – Narylkovskaya suite – sandstones, siltstones, mudstones, carboniferous mudstones, coal seams (up to 360 m); 4–10 – Carboniferous sediments: 4 – Belyovarskaya suite, 5 – Sarskaya, Chernogorskaya and Poberezhnaya combined suites, 6 – Serpukhovian stage, Solenoozerskaya suite, 7 – Vizean stage, Solomenskaya, Yamkinskaya, Bayunovskaya combined suites, 8 – Tournaisian stage, Samokhvalskaya and Krivinskaya combined suites, 9 – Bystryanskaya, Altayskaya and Kamyshtinskaya combined suites, 10 – Bystryanskaya suite; 11, 12 – Devonian sediments: 11 – Famennian stage, Tubinskaya suite, 12 – Frasnian stage, Kokhayskaya suite; 13, 14 – geological boundaries: 13 – concordant bedding, 14 – discordant bedding; 15 – fracture zones

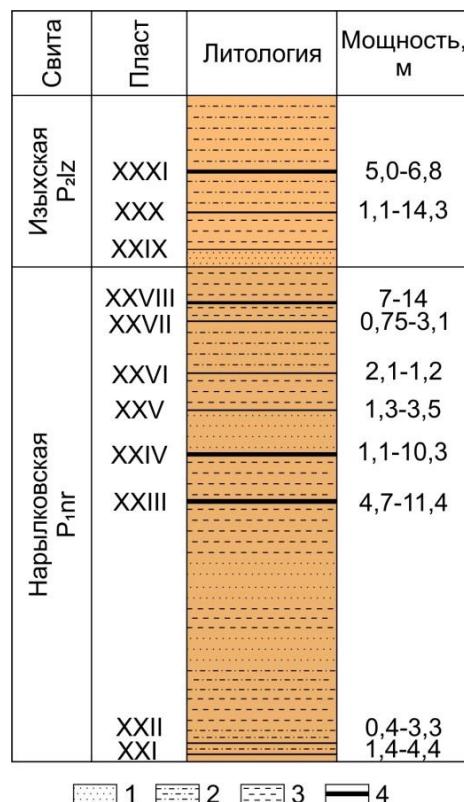


Рис. 2. Стратиграфический разрез пермских отложений Изыхского месторождения и положение в нём угольных пластов: 1 – песчаники, 2 – алевролито-песчаники, 3 – алевролиты, аргиллиты, 4 – уголь

Fig. 2. Stratigraphic column of Permian sediments at Izykh deposit and coal-bearing layers location: 1 – sandstones, 2 – silt-sandstones, 3 – siltstones, mudstones, 4 – coal

В Изыхской мульде вскрывается полный (1800 м) разрез продуктивной толщи от соленоозерской до изыхской свит. Больше половины разреза сложено алевролитами, в меньшей степени аргиллитами и песчаниками. Встречаются линзы сидеритов и конгломератов.

Нижняя граница Изыхской свиты (P₂iz) проводится в основании между пластами XXVIII и XXIX. Нижняя подсвита сложена мощной (150 м) безугольной пачкой, в которой отмечаются только единичные тонкие угольные пласти (XXIX) и пропластики, распространенные на ограниченной площади (рис. 2). Безугольная пачка залегает трансгрессивно на отложениях верхненарылковской подсвиты и сложена алевролитами и песчаниками. В 30–35 м от ее основания отмечается перерыв в объеме двух биостратиграфических горизонтов. Вверх по разрезу количество и мощность песчаниковых пачек увеличиваются. Верхняя подсвита (100–110 м) сложена алевролитами с прослойками аргиллитов, мелко-зернистых песчаников и мощными пластами углей (XXX и XXXI). Общая мощность отложений 250–260 м.

Изыхская свита содержит два мощных угольных пласта XXX и XXXI. Пласт XXX сложного строения состоит из 5–7 угольных пачек мощностью от 0,1 до

6,5 м суммарной мощностью 4,0–9,3 м, разделяемых породными прослойками общей мощностью от 0,35 до 2,95 м; на отдельных участках от него отщепляются угольные пачки, образуя самостоятельные пласти (XXXa, XXXb).

В угольном пласте XXXa диагностировано три тонштейна. Они имеют небольшую мощность 1–2 см и равно удалены друг от друга (~30 см). Угольный пласт XXX содержит два тонштейна. Мощность каждого из прослоев составляет 1 см. Тонштейны находятся на расстоянии 35 см друг от друга (рис. 3).

Особый интерес представляет между пласте XXXa и XXX пластов. Это мощный (45 см) прослой алевролита. Прослой имеет повышенную радиоактивность (25 мкР/ч).



Рис. 3. Положение породных прослоев в угольных пластах XXXa и XXX Изыхского месторождения

Fig. 3. Location of intraformational seams in the coal beds XXXa and XXX, Izykh deposit

Методика исследований

Пробы отбирались в горных выработках на Изыхском угольном разрезе летом 2016 и 2018 гг. Опробование проводилось бороздовым методом, при сечении борозды 15×5 см. Длина секции опробования составила 1–45 см в зависимости от степени однородности пластов. Также были опробованы кровля, почва пластов и внутрипластовые породные прослои. Всего было отобрано 36 проб.

При выполнении исследования применялся комплекс современных методов нейтронно-активационного анализа (ИНАА), масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS) и атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанный плазмой (ICP-AES).

ИНАА осуществлялся в ядерно-геохимической лаборатории на исследовательском ядерном реакторе ИРТ-Т ТПУ (аналитик А.Ф. Судыко). Определение содержания химических элементов в пробах осуществлялось без предварительного концентрирования для исключения возможности уменьшения концентрации элементов при озолении.

Исследования методами ИСП-МС и ИСП-АЭС проведены в аналитическом центре Дальневосточного геологического института ДВО РАН (исполнитель Н.В. Зарубина). Определение содержания малых элементов выполнено с использованием разложения сплавлением с метаборатом лития и кислотного разложения ($\text{HClO}_4 + \text{HNO}_3 + \text{HF}$). Анализ углевмещающих пород проведен с использованием двух схем разложения. Для проб угля применялся метод вскрытия без предварительного озоления с использованием кислотного разложения.

В табл. 1 показана сравнительная оценка результатов элементного анализа, полученного методами ИСП-МС и ИНАА. Анализ данных таблицы подтвердил удовлетворительную сходимость результатов.

Главные породообразующие элементы (Al, Ti, Fe, Ca, Mg, K, Na, P) определены с помощью ИСП-АЭС. Определение содержания H_2O , ППП, SiO_2 осуществлялось методом гравиметрии.

Таблица 1. Сравнение результатов определения содержания химических элементов методами ИСП-МС и ИНАА, г/т

Table 1. Comparison of chemical elements measurement by ICP-MS and INAA, ppm

| Элементы Elements | И-21 | | И-22 | | INAA | |
|----------------------|---|------|---|------|------|--|
| | ICP-MS кислотное разложение acid digestion | INAA | ICP-MS кислотное разложение acid digestion | | | |
| | | | ICP-MS разложение сплавлением fusion digestion | | | |
| Sc | 5,28 | 5,32 | 6,92 | 6,90 | 8,10 | |
| Cr | 55,1 | 63,7 | 16,1 | 53,7 | 36,2 | |
| Co | 20,7 | 26,1 | 10,2 | 12,1 | 10,5 | |
| Zn | 358 | 425 | 203 | 216 | 311 | |
| Rb | 3,95 | 4,65 | 18,8 | 12,5 | 17,9 | |
| Sr | 83,6 | <40 | 128 | 116 | <40 | |
| Ba | 72,4 | 60,9 | 289 | 262 | 348 | |
| La | 137 | 141 | 110 | 100 | 115 | |
| Ce | 282 | 243 | 243 | 223 | 214 | |
| Nd | 126 | 93,1 | 101 | 109 | 90,6 | |
| Sm | 24,2 | 30,6 | 23,4 | 22,5 | 36,5 | |
| Eu | 2,45 | 2,64 | 2,23 | 2,19 | 2,56 | |
| Tb | 3,93 | 5,08 | 3,49 | 3,39 | 3,99 | |
| Yb | 24,7 | 25,4 | 8,78 | 9,18 | 10,3 | |
| Lu | 3,72 | 3,79 | 1,24 | 1,28 | 1,44 | |
| Hf | 25,6 | 26,9 | 26,6 | 27,6 | 35,5 | |
| Ta | 2,20 | 2,37 | 6,98 | 5,97 | 8,26 | |
| Th | 7,49 | 6,08 | 21,7 | 18,8 | 25,9 | |
| U | 3,10 | 2,47 | 5,99 | 5,89 | 8,04 | |

Определение содержания Hg в образцах выполнено методом беспламенной абсорбции на приборе РА-915+ с пиролитической приставкой ПИРО-915 (метод пиролиза). Диапазон измерений для массовой доли ртути в образцах колеблется от 10^{-3} до 10 г/т.

Для изучения структурно-текстурных особенностей, минерального состава, характера органических

остатков неугольных прослоев применялся петрографический анализ.

Исследование состава минерального вещества породных прослоев, в том числе глинистых минералов, произведено методом рентгенофазового анализа (РФА). РФА был проведен на дифрактометре Bruker D2 Phaser в МИНОЦ «Урановая геология» в отделении геологии ТПУ (исполнитель А.В. Вергунов).

Изучение микроминеральных форм элементов в углях и золах углей производилось на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) Hitachi S-3400N в МИНОЦ «Урановая геология» в отделении геологии ТПУ. Состав включений устанавливался с помощью энерго-дисперсионного спектрометра Bruker XFlash 4010/5010 для проведения рентгеноспектрального анализа. Исследование проб выполнялось в режиме низкого вакуума с детектором обратно-рассеянных электронов.

Результаты исследований и их обсуждение

Химический состав угля и золы угля

Среднее содержание химических элементов в углях и золе угля XXXa и XXX пластов приведено в табл. 2. От кларка [11] угли, а также золы углей обоих пластов отличаются высоким содержанием РЗЭ, Be, Ni, Zn, Ga, Se, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Cd, Sn, Ba, Hf, Ta, W, Pb, Th.

В отдельных пробах угля содержание некоторых из указанных химических элементов может достигать аномально высоких значений. Например, концентрация циркония в угле достигает 0,2 %, а ниобия – 293 г/т. Содержание берилия достигает 9,6 г/т, галлия – 44 г/т, иттрия – 212 г/т, олова – 21 г/т, РЗЭ – 730 г/т, гафния – 27 г/т, тантала – 14 г/т, тория – 35 г/т. Все аномалии обнаружены в угле, находящемся непосредственно над или под породным прослойем, разделяющим угольные пласти XXXa и XXX. Прослой имеет повышенную радиоактивность – 25 мкР/ч и отличается аномальным содержанием литофильтральных элементов, таких как Li, Be, Ga, Y, Zr, Nb, Sn, РЗЭ, Hf, Ta, Th и U (табл. 5).

Приведенные данные позволяют установить Nb-Ta-Zr-Hf-Y-РЗЭ-Ga оруденение с группой попутных литофильтральных металлов, таких как галлий, литий, олово и др., в пластах XXXa и XXX. Руды схожего состава выявлены и изучены в Кузбассе [8]. Также подобное оруденение известно в углях Китая [2, 3].

Концентрация ниобия в среднем для золы угля изученных пластов составляет 320 г/т. Для золы угля пласти XXXa этот показатель составил 262 г/т, а для XXX – 411 г/т. Распределение ниобия в разрезе неравномерно. Наблюдаются явная приуроченность высоких концентраций в углях к границе с породным прослойем (рис. 4). Зона обогащения над прослойем больше по мощности нежели под ним. Однако содержание Nb под прослойем достигает 2625 г/т, против 1786 г/т для золы угля над ним. В самом же породном прослое концентрация ниобия составила 114 г/т.

Таблица 2. Содержание химических элементов в углях и золах углей, г/т

Table 2. Trace element concentrations in coals and coal ashes, ppm

| Элементы Elements | Пласт/Coal bed | | | | Оба пласти Both coal beds | | Кларк ¹ Clark ¹ | КК ² CC ² |
|----------------------|----------------|-------------|---------------|-------------|---------------------------------|-------------|--|------------------------------------|
| | XXXa | | XXX | | уголь coal | зола ash | | |
| | уголь coal | зола ash | уголь coal | зола ash | уголь coal | зола ash | | |
| Li | 4,6 | 46,3 | 8,2 | 39,9 | 6,0 | 43,8 | 12 | 66 |
| Be | 3,4 | 40,3 | 4,2 | 37,7 | 3,7 | 39,3 | 1,6 | 9,4 |
| Sc | 2,2 | 23,4 | 1,6 | 12,3 | 2,0 | 19,0 | 3,9 | 23 |
| V | 28,1 | 276 | 11,5 | 73,6 | 21,6 | 196 | 25 | 155 |
| Cr | 16,5 | 170 | 14,1 | 98,7 | 15,5 | 142 | 16 | 100 |
| Co | 5,1 | 52,8 | 2,3 | 18,2 | 4,0 | 39,2 | 5,1 | 32 |
| Ni | 31,1 | 334 | 12,1 | 100 | 23,6 | 242 | 13 | 76 |
| Cu | 11,8 | 130 | 11,0 | 79,5 | 11,5 | 110 | 16 | 92 |
| Zn | 58,3 | 560 | 85,8 | 647 | 69,1 | 594 | 23 | 140 |
| Ga | 5,2 | 53,9 | 10,5 | 64,7 | 7,3 | 58,2 | 5,8 | 33 |
| Ge | 1,5 | 14,0 | 1,7 | 15,9 | 1,6 | 14,8 | 2,2 | 15 |
| As | 4,3 | 45,0 | 3,3 | 22,4 | 3,9 | 36,1 | 8,3 | 47 |
| Se | 1,4 | 14,0 | 2,6 | 19,0 | 1,9 | 15,9 | 1,3 | 8,8 |
| Br | 0,7 | 8,5 | 0,6 | 4,7 | 0,7 | 7,0 | 5,2 | 32 |
| Rb | 1,6 | 15,4 | 6,1 | 33,0 | 3,4 | 22,3 | 14 | 79 |
| Sr | 266 | 2859 | 81,6 | 583 | 194 | 1965 | 110 | 740 |
| Y | 25,6 | 224 | 34,2 | 273 | 29,0 | 243 | 8,4 | 51 |
| Zr | 252 | 2167 | 280 | 2122 | 263 | 2149 | 36 | 210 |
| Nb | 31,2 | 262 | 42,4 | 411 | 35,6 | 320 | 3,7 | 20 |
| Mo | 4,5 | 49,5 | 3,8 | 33,3 | 4,2 | 43,2 | 2,2 | 14 |
| Cd | 0,45 | 4,4 | 0,37 | 2,8 | 0,42 | 3,8 | 0,22 | 1,2 |
| Sn | 1,0 | 10,3 | 2,8 | 9,5 | 1,7 | 10,0 | 1,1 | 6,4 |
| Sb | 1,0 | 9,8 | 0,77 | 7,3 | 0,88 | 8,8 | 0,92 | 6,3 |
| Te | 0,09 | 1,0 | 0,07 | 0,48 | 0,08 | 0,81 | – | – |
| Cs | 0,18 | 1,8 | 0,53 | 3,0 | 0,32 | 2,3 | 1 | 6,6 |
| Ba | 228 | 2466 | 281 | 2017 | 249 | 2290 | 150 | 940 |
| La | 26,4 | 265 | 58,0 | 416 | 38,8 | 324 | 11 | 69 |
| Ce | 49,5 | 484 | 119 | 850 | 76,6 | 628 | 23 | 130 |
| Pr | 5,4 | 52,0 | 13,8 | 98,5 | 8,7 | 70,3 | 3,5 | 20 |
| Nd | 21,5 | 207 | 54,0 | 386 | 34,3 | 277 | 12 | 67 |
| Sm | 3,8 | 35,5 | 9,0 | 65,4 | 5,8 | 47,3 | 2 | 13 |
| Eu | 0,46 | 4,5 | 0,82 | 6,0 | 0,60 | 5,1 | 0,47 | 2,5 |
| Gd | 3,9 | 36,4 | 7,9 | 59,6 | 5,5 | 45,5 | 2,7 | 16 |
| Tb | 0,53 | 4,8 | 0,94 | 7,1 | 0,69 | 5,7 | 0,32 | 2,1 |
| Dy | 3,8 | 33,7 | 5,7 | 44,4 | 4,6 | 37,9 | 2,1 | 14 |
| Ho | 0,88 | 7,7 | 1,2 | 9,4 | 1,0 | 8,4 | 0,54 | 4 |
| Er | 2,9 | 25,5 | 3,7 | 29,1 | 3,2 | 26,9 | 0,93 | 5,5 |
| Tm | 0,40 | 3,5 | 0,48 | 3,8 | 0,43 | 3,6 | 0,31 | 2 |
| Yb | 3,0 | 27,0 | 3,6 | 28,4 | 3,3 | 27,6 | 1 | 6,2 |
| Lu | 0,48 | 4,3 | 0,54 | 4,2 | 0,50 | 4,3 | 0,2 | 1,2 |
| Hf | 3,7 | 34,0 | 6,4 | 39,7 | 4,8 | 36,2 | 1,2 | 8,3 |
| Ta | 0,40 | 3,8 | 1,9 | 7,1 | 1,0 | 5,1 | 0,28 | 1,7 |
| W | 2,0 | 24,8 | 1,5 | 12,8 | 1,8 | 20,1 | 1,1 | 6,9 |
| Au | 0,0011 | 0,0134 | 0,0016 | 0,0146 | 0,0013 | 0,0138 | 0,0037 | 0,022 |
| Hg ³ | 149 | 1602 | 125 | 852 | 139 | 1307 | 100 | 750 |
| Tl | 0,63 | 6,7 | 0,29 | 1,6 | 0,50 | 4,7 | 0,63 | 4,9 |
| Pb | 8,8 | 90,1 | 18,2 | 67,6 | 12,5 | 81,3 | 7,8 | 47 |
| Th | 3,6 | 38,3 | 6,9 | 35,7 | 4,9 | 37,3 | 3,3 | 21 |
| U | 0,78 | 8,0 | 2,5 | 16,4 | 1,4 | 11,3 | 2,4 | 16 |
| ΣРЗЭ/ΣREE | 123 | 1191 | 278 | 2008 | 184 | 1512 | 60,1 | 353 |

Примечание: – нет данных; 1 – кларк для углей по [11]; 2 – отношение среднего содержания в золе угля к кларку для золы углей (KK); 3 – мг/т; содержание Hg в золе получено путем пересчета содержания в угле.

Note: – no data; 1 – clark for coals [11]; 2 – ratio of the average concentration in the coal ash to the clark for coal ashes (CC); 3 – ppb, Hg in the coal ash was recalculated from the coal.

Среднее содержание тантала в золе угля составило 5,1 г/т. Для золы угля пласта XXXa этот показатель составил 3,8 г/т, а для XXX – 7,1 г/т. Распределение тантала, как и ниобия, неравномерно и приурочено к породному прослою – междуупластию. Концентрация тантала в указанном прослое составила 9,7 г/т, а в золе угля, находящегося непосредственно под партингом, – 21 г/т. Также значимая концентрация тантала (17,9 г/т) наблюдается в золе угля на контакте с тонштейном (рис. 4).

Концентрация циркония в золе угля пласта XXXa составила 2167 г/т, для XXX – 2122 г/т. Распределение циркония в разрезе схоже с распределением ниobia. Зона обогащения угля над прослоем мощнее и контрастнее, чем под ним. Наибольшая концентрация циркония наблюдается в золе угля, расположенного над прослоем, и составляет 14270 г/т. На удалении от породного междуупластия концентрация циркония в золе угля уменьшается (5109 г/т), но по-прежнему остается повышенной. В самом же партинге концентрация циркония составила 1337 г/т.

Среднее содержание гафния в золе угля составило 36,2 г/т. Для золы угля пластов XXXa и XXX концентрация гафния – 34,0 г/т и 39,7 г/т соответственно. Схемы распределения гафния и циркония схожи, что связано с геохимическим сродством этих элементов. Концентрация гафния в прослое составляет 41,7 г/т, в то время как в золе угля, расположенного выше партинга, достигает 164 г/т.

Концентрация галлия в золе угля составила 58,2 г/т. Распределение галлия в пласте неравномерно, аномальные концентрации приурочены к породному прослою. Концентрация галлия в прослое составила 64,5 г/т, наибольшая концентрация в золе угля – 226 г/т.

Содержание радиоактивных элементов в углях пласта не является промышленно значимым, но играет важную роль при выявлении в углях редкometалльного оруденения подобного типа. Из-за повышенной радиоактивности в 25 мкР/ч представляется возможным выявлять редкometалльное оруденение при гамма-каротаже, а также при использовании полевого радиометрического оборудования в горных выработках.

Среднее содержание тория в золе угля составляет 37,3 г/т, урана – 11,3 г/т. Прослой содержит 30,4 г/т Th и 9,4 г/т U. В золе угля на контакте с партингом содержание тория достигает 51,6 г/т, урана – 15,1 г/т.

Среднее содержание РЗЭ (суммы лантаноидов) в золе угля составило 1191 г/т. Концентрация РЗЭ в прослое – 682 г/т. Участок пласта под прослоем обогащен РЗЭ в большей степени, концентрация в золе угля под партингом достигает 7418 г/т.

Среднее содержание иттрия в золе угля пластов XXXa и XXX составляет 243 г/т. Наибольшие концентрации иттрия приурочены к породному прослою, максимальные значения в золе угля достигают 1290 г/т. В самом же прослое концентрация составила 124 г/т.

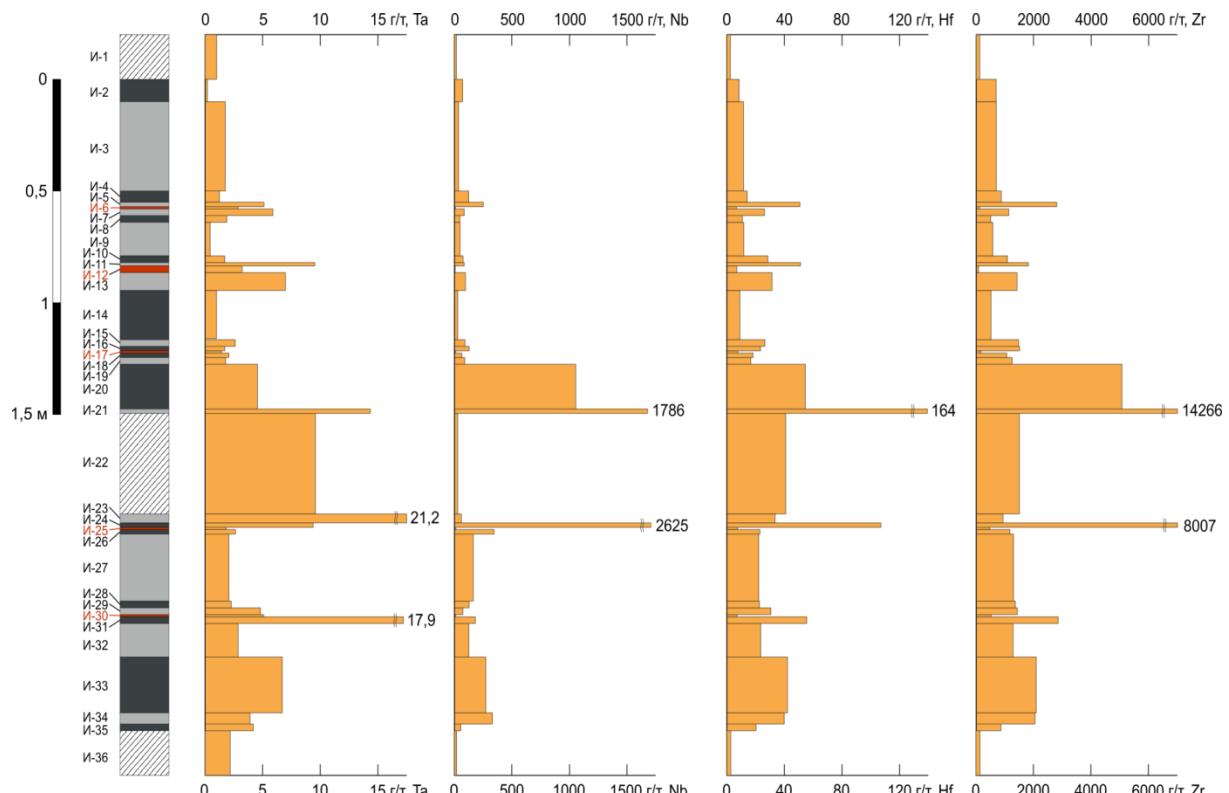


Рис. 4. Распределение Ta, Nb, Hf, Zr в золе угля в вертикальном разрезе пластов XXXa и XXX

Fig. 4. Distribution of Ta, Nb, Hf, Zr in coal ash in a vertical cross-section of the seams XXXa and XXX

Таким образом, проведенные исследования показали, что угли и породные прослои в угольном пласте XXX и XXXa отличаются аномально высокими содержаниями Zr, Nb, Hf, Ta, PЗЭ и Ga. При этом наиболее обогащены этими элементами угли, приуроченные к породному прослою-междупластию, разделяющему угольные пласти XXXa и XXX, и в меньшей степени – к тонштейнам. Диагностика минералого-геохимических особенностей этого породного прослоя позволяет установить его природу и механизм влияния на геохимические особенности вмещающих углей.

Особенности минералогии породных прослоев и углей

При петрографических исследованиях породных прослоев под оптическим микроскопом установлено,

что партинги представляют собой обломочную породу алевритовой размерности. Основная масса породы представлена глинистыми минералами, а также органическим веществом (рис. 5). В этой массе часто встречаются кристаллы полевых шпатов и кварца. В прослоях отсутствует стратификация зерен, расположение неориентированное. Зерна угловатые, следов окатанности не наблюдается.

В некоторых из изученных прослоев обнаружены вторичные структуры, образованные каолинитом. Каолинит в этих прослоях представлен в виде кристаллов, крупинок, псевдоморфоз по полевым шпатам и сподолам, а также в виде скрытокристаллической массы.

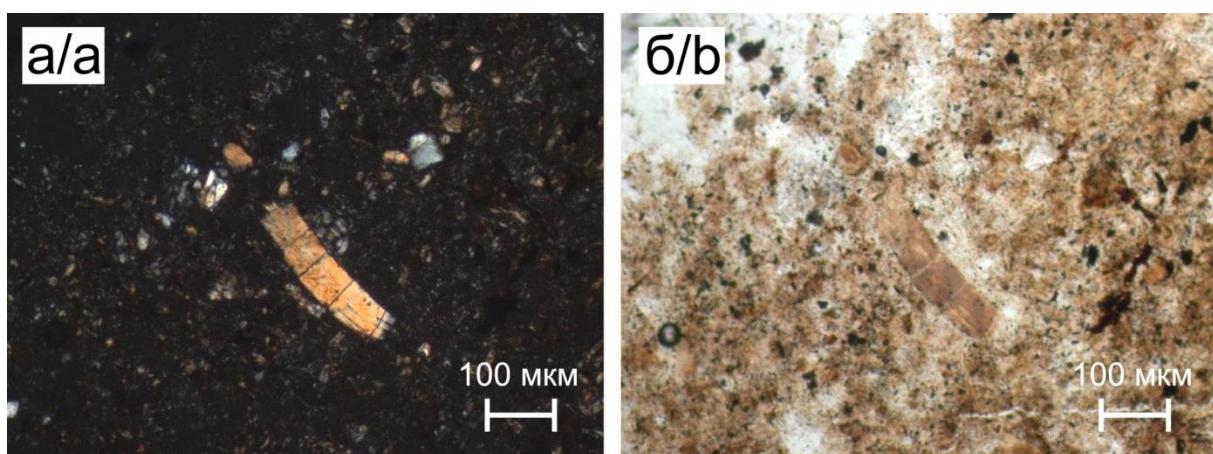


Рис. 5. Структура породы прослоя. Оптический микроскоп. а) николи скрещены; б) николи параллельны
 Fig. 5. Structure of intraformational seams. Optical microscopy. a) crossed nicols; b) parallel nicols

Таблица 3. Минеральный состав изученных породных прослоев, %

Table 3. Mineral composition of the studied intraformational seams, %

| Минерал Mineral | И-1 | И-6 | И-12 | И-17 | И-22 | И-25 | И-30 | И-36 |
|-----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Каолинит Kaolinite | 21,0 | 36,4 | 42,5 | 33,8 | 68,9 | 20,9 | 28,0 | 82,0 |
| Кварц Quartz | 39,0 | 36,4 | 31,5 | 66,2 | 11 | 52,0 | 29,9 | 5,5 |
| КПШ K-feldspar | – | – | 14,2 | – | 7 | 27,1 | 42,1 | 12,5 |
| Альбит Albite | – | – | – | – | 5,6 | – | – | – |
| Мусковит Muscovite | 28,1 | – | – | – | – | – | – | – |
| Хлорит Chlorite | 11,9 | – | – | – | – | – | – | – |
| Апатит Apatite | – | 22,0 | 11,8 | – | 3,5 | – | – | – |
| Сидерит Siderite | – | 5,2 | – | – | – | – | – | – |
| ССО ML | – | – | – | – | 3 | – | – | – |
| Смектит Smectite | – | – | – | – | 1 | – | – | – |
| | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |

Примечание: ССО – смешаннослойные образования.

Note: ML – mixed-layer clay minerals.

Результаты рентгенофазового анализа подтверждают данные петрографических исследований

(табл. 3). Породные прослои состоят из каолинита (21–68,9 %) и кварца (5,5–66,2 %). В составе трех проб (И-6, И-12, И-22) диагностирован апатит (3,5–22 %). В четырех пробах (И-12, И-22, И-25 и И-30) содержатся калиевые полевые шпаты (7–42,1 %).

В ходе исследования был изучен микроминеральный состав породного прослоя – междупластия, и вмещающих его углей. В составе породного прослоя встречаются кристаллы полевых шпатов, каолинита, кварца, фторапатита.

Минералы циркония представлены его сложными Nb-Zr-P силикатами, а также цирконом. Кристаллы циркона имеют неправильную форму и, вероятно, были подвержены выщелачиванию в процессе преобразования исходного материала в условиях палеоболота (рис. 6, а). Встречаются сложные Nb-Zr-P силикаты, расположенные непосредственно на оксидах титана (рис. 6, б). Среди агрегатов оксида титана были обнаружены разности с примесью Nb (рис. 6, в).

В породном прослое лантаноиды представлены преимущественно фосфатами – монацитом (рис. 6, г). В породном прослое выявлены сульфиды (пирит, галенит, сфалерит). Встречаются зерна барита. Большинство сульфидов имеют почковидную форму.

Во вмещающем породный прослой угле выявлен гипс, целестин, барит. Такие образования описаны в приконтактовой зоне риолитового тонштейна Чарлстон Маск в Англии [12].

В угле, расположеннном выше и ниже породного прослоя в приконтактовой зоне, обнаружены агрегаты Zr-Y фосфатов (рис. 7, а). Форма выделения минералов говорит о вторичном их образовании в процес-

се перераспределения вещества, которое поступило из породного прослоя. Также в угле, расположеннном под породным прослойем, часто встречаются агрегаты фосфатов РЗЭ в виде прожилков (рис. 7, б).

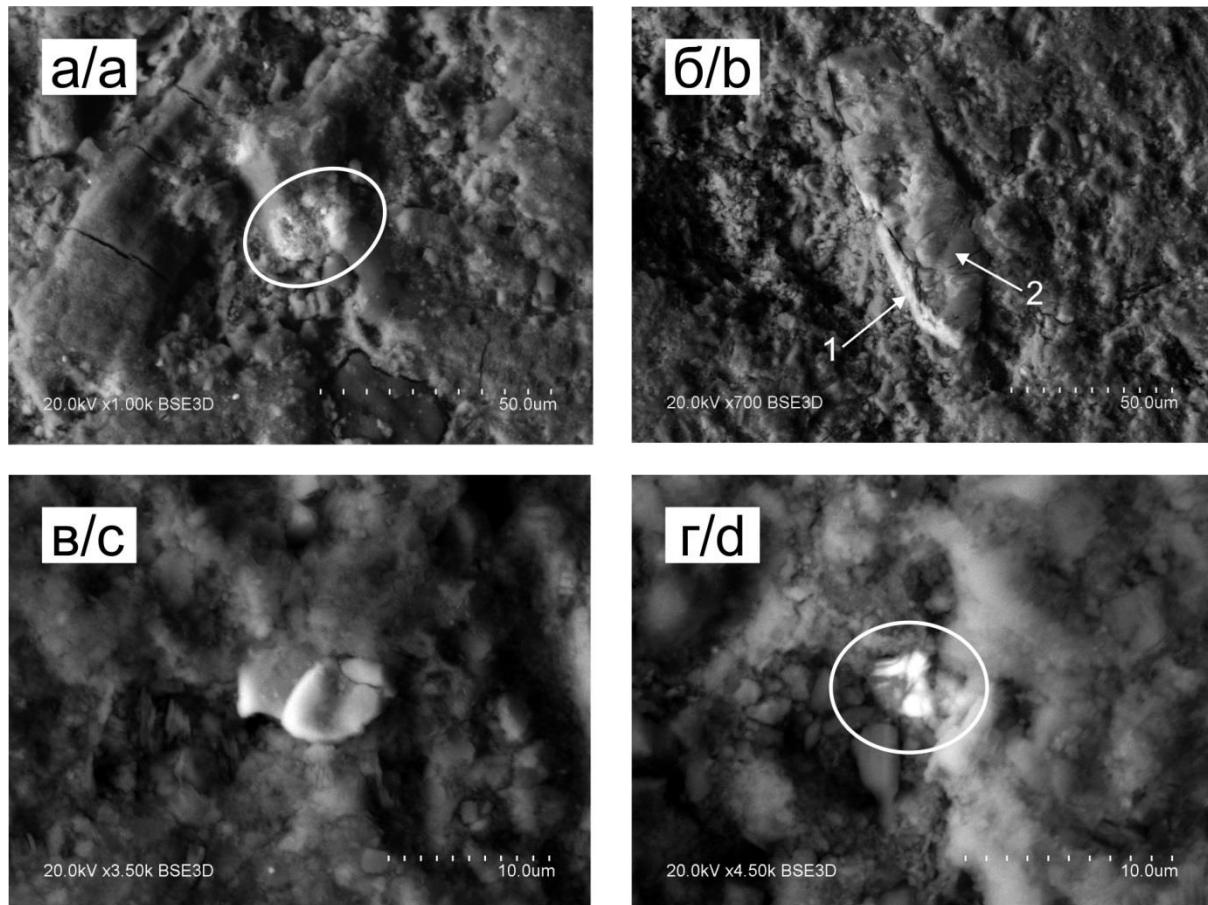


Рис. 6. а) кристаллы циркона в породном прослое; б) кристалл оксида титана (2) и агрегат Zr-Nb-P (1); в) кристалл оксида титана с примесью Nb; г) кристалл монацита

Fig. 6. а) zircon crystals in intraformational seam; б) titanium oxide crystal (2) and Zr-Nb-P aggregate (1); в) Nb-doped titanium oxide crystal; г) monazite crystal

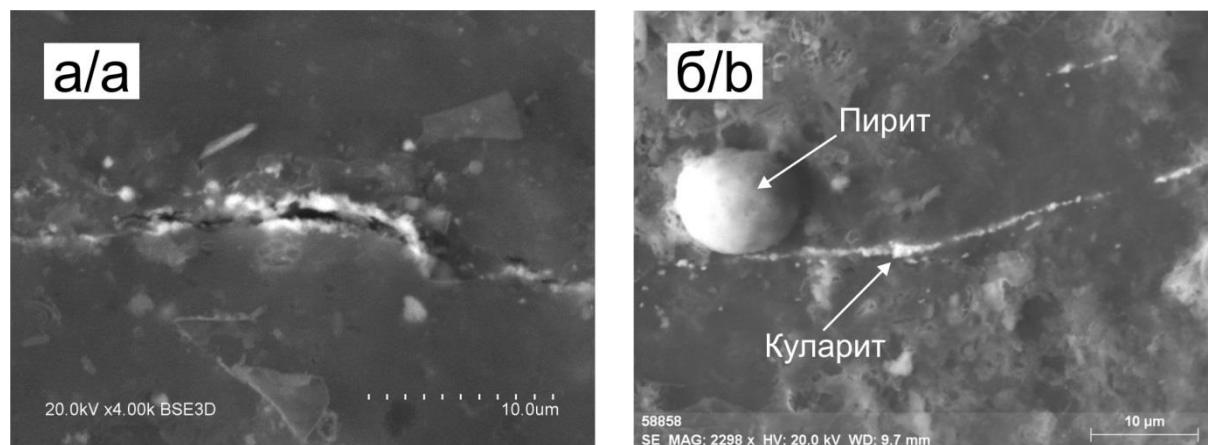


Рис. 7. а) агрегаты Zr-Y фосфата из угля над прослоем; б) прожилок куларита в угле непосредственно под прослойем

Fig. 7. а) Zr-Y phosphate aggregates from the coal above intraformational seam; б) cularite veinlet in the coal under intraformational seam

Геохимические особенности породных прослоев

Изученные образцы различны по содержанию микроэлементов. В породных прослоях XXX пласта (пробы И-30, И-25) отмечено повышенное относительно среднего состава глинистых сланцев содержание Be, Zn, Ga, Se, Zr, Mo, Ba, РЗЭ, Hf, Ta. Также тонштейн (проба И-25) обогащен Cu, As, Y, и Nb, однако в тонштейне И-30 повышенного содержания этих элементов не отмечено (табл. 5).

По сравнению со средним составом глинистых сланцев в породном прослое-междупластии (проба И-22) отмечены высокие концентрации Li, Be, Cu, Zn, Ga, Se, Y, Zr, Nb, Sn, РЗЭ, Hf, Ta, Pb, Th и U.

Породные прослои (тонштейны) пласта XXXa также обогащены определенным набором элементов, по сравнению с составом глинистых сланцев. Так, в составе тонштейна И-17 обнаружены высокие концентрации Be, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Ge, As, Se, Y, Zr, Nb, Mo, Sn, Ba, РЗЭ, Hf, W, Au, Pb, Th. Тонштейны И-12 и И-6 обогащены Li, Se, Y, Sn, Hf, Ta, Pb, Th и U.

Проба И-1, представляющая собой кровлю пласта XXXa, обогащена Cr, Ni, Zn, As, Se, Mo. А проба И-36 (почва пласта XXX) обогащена Li, Ga, Se, Sn, Pb, Th.

Из изложенного видно, что исследованные породы обогащены различными группами химических элементов. Это связано с особенностями состава исходных пород, сформировавших изучаемые прослои. Предполагается, что этим материалом, сформировавшим внутриугольные прослои, служил вулканический пепел различного состава.

В табл. 4 приведен химический состав изученных породных прослоев, а также пород кровли и почвы. Содержание кремнезема в породных прослоях колеблется в пределах 20,0–49,8 %, а глинозема – 4,0–27,8 %.

Таблица 4. Породообразующие оксиды (вес. %) в углевмещающих породах и породных прослоях

Table 4. Rock-forming oxides (wt. %) in coal-bearing rocks and intraformational seams

| Оксид Oxide | И-1 | И-6 | И-12 | И-17 | И-22 | И-25 | И-30 |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| SiO ₂ | 47,1 | 34,0 | 34,7 | 20,0 | 49,8 | 38,5 | 41,0 |
| TiO ₂ | 0,52 | 0,49 | 0,59 | 0,21 | 0,65 | 0,24 | 0,25 |
| Al ₂ O ₃ | 15,8 | 13,1 | 16,4 | 4,0 | 27,8 | 9,1 | 13,5 |
| Fe ₂ O ₃ | 6,2 | 0,48 | 0,81 | 0,72 | 0,86 | 0,96 | 0,69 |
| MnO | 0,096 | 0,010 | 0,011 | 0,004 | 0,006 | 0,006 | 0,005 |
| CaO | 0,83 | 6,18 | 3,61 | 0,34 | 1,58 | 0,31 | 0,26 |
| MgO | 1,07 | 0,17 | 0,20 | 0,08 | 0,31 | 0,14 | 0,17 |
| K ₂ O | 1,14 | 0,33 | 0,85 | 0,23 | 0,71 | 0,55 | 2,54 |
| Na ₂ O | 0,36 | 0,16 | 0,18 | 0,09 | 0,37 | 0,20 | 0,19 |
| P ₂ O ₅ | 0,13 | 3,86 | 2,16 | 0,04 | 0,88 | 0,09 | 0,10 |
| H ₂ O | 2,42 | 4,59 | 4,6 | 7,8 | 3,2 | 5,31 | 4,32 |
| LOI | 23,9 | 36,4 | 35,6 | 66,3 | 13,6 | 44,4 | 36,5 |
| Сумма/Sum | 99,6 | 99,8 | 99,7 | 99,8 | 99,8 | 99,7 | 99,5 |
| TiO ₂ /Al ₂ O ₃ | 0,033 | 0,037 | 0,036 | 0,053 | 0,023 | 0,027 | 0,018 |
| SiO ₂ /Al ₂ O ₃ | 2,99 | 2,60 | 2,12 | 5,01 | 1,79 | 4,26 | 3,04 |

Среди изученных пород выделяются три пробы с повышенным содержанием фосфора. Из них две пробы, расположенные в верхней пачке (пласт XXXa): И-6 и И-12, содержат 3,86 и 2,16 % P₂O₅ соответственно. Породный прослой-междупластие, разделяющий пласти XXXa и XXX, содержит 0,88 % P₂O₅. Все три пробы отличаются также повышенными содержаниями CaO (1,58–6,18 %).

Отношение SiO₂ к Al₂O₃ (алюмокремниевый модуль, АМ) для каолинита составляет 1,18. В исследуемых породных прослоях это соотношение изменяется от 1,79 до 5,01. Пробы, которые имеют наименьшие показатели АМ, отличаются также повышенным содержанием P₂O₅. Такая закономерность отмечалась для тонштейнов Бейского месторождения черногорской свиты [13].

Согласно обзору Я.Э. Юдовича и М.П. Кетрис, отношение TiO₂ к Al₂O₃ (титановый модуль, ТМ) является одним из достоверных показателей вклада пирокластики в формирование отложений, в особенности применительно к кислым вулканическим пеплам [14].

В работе Д.А. Спирса и Р. Канариса-Сотириу показано, что величина ТМ, характерная для риолитовой пирокластики, не превышает 0,02, для пирокластики основного состава, наоборот, более 0,06 [15]. Промежуточные значения ТМ свидетельствуют о вкладе вулканического пепла среднего либо щелочного состава.

Титановый модуль широко используется специалистами в качестве вспомогательного критерия при восстановлении исходного состава измененного пеплового материала [16].

Породные прослои пласта XXX характеризуются низкими значениями ТМ. Для тонштейна И-30 величина ТМ составила 0,018, а для И-25 – 0,027 (табл. 4). Таким же низким значением ТМ характеризуется и породный прослой-междупластие И-22 (0,023).

Тонштейны пласта XXXa отличаются более высокими значениями ТМ, нежели пласта XXX. Так, ТМ тонштейна И-17 достигает 0,053, что является наибольшим показателем для изученных прослоев. Тонштейны И-12 и И-6 характеризуются величиной ТМ 0,036 и 0,037 соответственно. Для пород кровли пласта XXXa (образец И-1) значение ТМ соответствует значению 0,033.

Эффективным критерием распознавания состава исходного материала тонштейнов могут служить радиоактивные элементы. Торий, как элемент-гидролизат в среде палеоболота, мигрирует слабо. Уран в этих же условиях восстанавливается до валентности 4+ и также слабо мигрирует. Исходя из этого можно предполагать несущественное выщелачивание и вынос радиоактивных элементов при преобразовании исходной пирокластики и, следовательно, высокие содержания тория и урана могут служить индикаторами кислой и щелочной пирокластики.

Среди изученных прослоев выделилось две группы. В первую группу вошли прослои пласта XXXa (И-6 и И-12). Они отличаются высоким содержанием тория – 27,7 и 24,6 г/т соответственно. Также в них отмечена повышенная концентрация урана: 6,2 г/т

для И-6 и 7 г/т для И-12. К первой группе относится породный прослой И-22, концентрация тория и урана в котором составляет 30,4 и 9,4 г/т соответственно (табл. 5). В связи с высоким содержанием Th и U радиоактивность его составляет 25 мкР/ч, что служит отличительным признаком при распознавании его как в разрезе, так и при каротаже скважин. Это свойство позволяет специалистам диагностировать прослои измененной пирокластики в угольных толщах [17, 18].

Во вторую группу попали прослои пласта XXX (И-25, И-30) с меньшей концентрацией радиоактивных элементов, чем в ранее описанных. Так, для прослоя И-25 концентрация Th составила 8 г/т, а U – 1,9 г/т. Для нижележащего прослоя (И-30) содержание этих же элементов составило: Th – 11,6 г/т, U – 3,5 г/т. Также во вторую группу попал прослой И-17 (пласт XXXa), содержание тория в котором составило 14,5 г/т, а урана – 2,5 г/т. Торий-урановое отношение в изученных пробах колеблется от 3,2 до 5,7 (табл. 5).

Еще одним критерием восстановления состава исходного пеплового материала является диаграмма, основанная на отношении Zr/TiO_2 к Nb/Y [20]. Прослои И-6 и И-12 занимают на классификационной диаграмме поле, соответствующее риодацитам/дацитам. Прослой И-17 также расположен в поле риодацитов/дацитов, но тяготеет к риолитам. Породные прослои И-25 и И-30 соответствуют риолитам. Породный прослой И-22 по этим показателям располагается в поле комендитов/пантеллеритов (рис. 8).

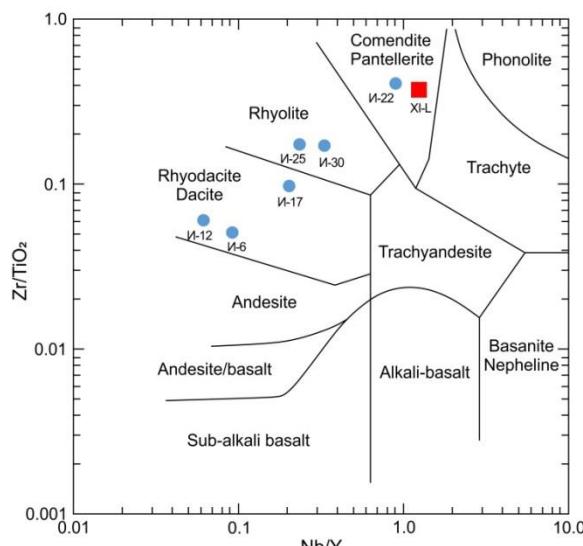


Рис. 8. Положение изученных проб на Zr/TiO_2 – Nb/Y диаграмме [20]. XI-L – пирокластический горизонт из пласта XI Кузбасса, II – пробы пород XXX–XXXa пластов Минусинского бассейна

Fig. 8. Location of the samples according to classification diagram by Zr/TiO_2 and Nb/Y [20]. XI-L – pyroclastic layer from the seam XI (Kuznetsk Basin), II – samples from seams XXX-XXXa (Minusinsk Basin)

Таблица 5. Микроэлементы (ε/m) в углевмещающих породах и породных прослоях

Table 5. Trace elements (ppm) in coal-bearing rocks and intraformational seams

| Элемент Element | И-1 | И-6 | И-12 | И-17 | И-22 | И-25 | И-30 | И-36 | Кларк глинистых сланцев* Clark for shales* |
|------------------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--|
| Li | 25,7 | 51,9 | 64,3 | 33,0 | 95,6 | 37,7 | 33,6 | 95,1 | 46 |
| Be | 1,7 | 2,2 | 2,9 | 13,6 | 4,7 | 7,2 | 4,0 | 1,1 | 2,8 |
| Sc | 10,9 | 5,3 | 4,7 | 7,0 | 8,1 | 5,1 | 1,7 | 1,4 | 15 |
| V | 121,8 | 20,3 | 15,5 | 55,6 | 29,9 | 25,3 | 12,4 | 3,8 | 120 |
| Cr | 194,6 | 31,7 | 21,2 | 92,5 | 18,9 | 52,3 | 29,0 | 2,6 | 76 |
| Co | 19,2 | 3,9 | 2,3 | 38,7 | 12,0 | 7,8 | 2,7 | 0,8 | 19 |
| Ni | 167,5 | 21,2 | 15,5 | 117,6 | 22,5 | 36,1 | 10,6 | 4,2 | 47 |
| Cu | 33,9 | 116,2 | 30,6 | 98,0 | 40,6 | 64,7 | 19,7 | 11,3 | 36 |
| Zn | 128,4 | 11,3 | 47,3 | 216,5 | 238,4 | 83,3 | 96,8 | 17,1 | 52 |
| Ga | 15,7 | 31,3 | 35,4 | 17,0 | 64,5 | 23,5 | 28,4 | 29,1 | 16 |
| Ge | 0,7 | 0,7 | 0,5 | 3,6 | 3,2 | 2,3 | 0,6 | 1,3 | 2 |
| As | 49,4 | 3,4 | 2,3 | 21,2 | 8,8 | 15,7 | 6,1 | 1,1 | 9,3 |
| Se | 2,6 | 4,6 | 2,3 | 5,0 | 4,7 | 7,2 | 3,0 | 1,2 | 0,36 |
| Rb | 49,7 | 14,7 | 29,9 | 23,1 | 22,1 | 34,7 | 96,7 | 10,7 | 130 |
| Sr | 85,0 | 272,8 | 235,8 | 206,3 | 149,8 | 128,9 | 95,1 | 63,9 | 240 |
| Y | 24,7 | 101,1 | 120,2 | 95,8 | 126,0 | 287,4 | 32,6 | 12,1 | 31 |
| Zr | 120,5 | 151,1 | 119,2 | 372,7 | 1336,6 | 378,1 | 318,6 | 23,2 | 190 |
| Nb | 11,1 | 6,5 | 6,3 | 20,7 | 113,7 | 86,8 | 10,8 | 2,8 | 11 |
| Mo | 3,4 | 1,5 | 1,4 | 19,0 | 2,1 | 11,0 | 2,3 | 1,3 | 1,6 |
| Cd | 0,6 | 1,5 | 0,5 | 1,4 | 1,8 | 0,5 | 0,6 | 0,1 | 1 |
| Sn | 2,0 | 8,2 | 7,6 | 5,7 | 9,4 | 2,8 | 9,0 | 7,7 | 3,5 |
| Sb | 0,8 | 0,6 | 0,4 | 1,7 | 0,6 | 1,7 | 0,3 | 1,4 | 1 |
| Cs | 5,8 | 2,2 | 1,9 | 2,6 | 2,4 | 6,2 | 2,0 | 0,8 | 10 |
| Ba | 329 | 345 | 445 | 535 | 340 | 534 | 998,9 | 137,1 | 460 |
| La | 32,6 | 29,1 | 15,9 | 125,0 | 129,4 | 288,6 | 105 | 18,6 | 48 |
| Ce | 68,0 | 77,2 | 41,3 | 299 | 286 | 547 | 231 | 40,4 | 75 |
| Pr | 6,9 | 7,6 | 5,1 | 33,2 | 36,7 | 67,4 | 23,9 | 4,1 | 10 |
| Nd | 28,5 | 31,1 | 22,6 | 135,6 | 118,1 | 219,3 | 88,0 | 17,4 | 36 |
| Sm | 5,8 | 8,3 | 7,4 | 28,6 | 27,4 | 43,1 | 17,3 | 3,4 | 8 |
| Eu | 1,4 | 1,6 | 1,6 | 3,3 | 2,6 | 3,9 | 1,7 | 0,4 | 1,2 |
| Gd | 7,6 | 10,3 | 11,6 | 20,7 | 24,7 | 40,4 | 12,5 | 3,5 | 5,8 |
| Tb | 0,8 | 1,4 | 1,8 | 2,8 | 4,1 | 5,9 | 1,7 | 0,4 | 0,8 |
| Dy | 4,8 | 10,1 | 11,7 | 13,6 | 23,0 | 34,2 | 7,7 | 2,6 | 4,4 |
| Ho | 0,9 | 2,3 | 2,8 | 2,9 | 4,4 | 8,0 | 1,4 | 0,5 | 0,7 |
| Er | 2,8 | 7,7 | 9,0 | 9,1 | 12,2 | 26,3 | 3,6 | 1,3 | 1,9 |
| Tm | 0,4 | 1,1 | 1,2 | 1,5 | 1,5 | 3,3 | 0,4 | 0,2 | 0,6 |
| Yb | 2,9 | 8,0 | 8,6 | 9,0 | 10,3 | 23,8 | 2,8 | 1,1 | 2,5 |
| Lu | 0,5 | 1,2 | 1,3 | 1,6 | 1,5 | 3,7 | 0,4 | 0,1 | 0,4 |
| Hf | 3,5 | 7,7 | 8,1 | 9,0 | 41,7 | 8,4 | 8,2 | 3,8 | 5 |
| Ta | 0,91 | 3,0 | 3,3 | 1,5 | 9,7 | 2,0 | 5,2 | 2,0 | 1,4 |
| W | 1,4 | 0,5 | 0,5 | 5,1 | 2,5 | 1,6 | 0,7 | 0,3 | 2,6 |
| Au | – | 0,0026 | <0,002 | 0,0097 | 0,0043 | 0,0028 | 0,0026 | 0,0030 | 0,0065 |
| Hg, ppb | 392 | 141 | 107 | 398 | 190 | 132 | 136 | 24 | 89 |
| Tl | 0,8 | 0,7 | 0,4 | 1,9 | 0,5 | 1,1 | 0,6 | 0,1 | 1,3 |
| Pb | 17,1 | 58,3 | 66,6 | 29,6 | 36,8 | 15,0 | 34,5 | 50,2 | 14 |
| Th | 13,5 | 27,7 | 24,6 | 14,5 | 30,4 | 8,0 | 11,6 | 13,6 | 10 |
| U | 2,8 | 6,2 | 7,0 | 2,5 | 9,4 | 1,9 | 3,5 | 1,0 | 4,5 |
| $\Sigma P3\mathcal{E}$ | 164 | 197 | 142 | 686 | 682 | 1315 | 497 | 94 | 195 |
| Th/U | 4,7 | 4,5 | 3,5 | 5,7 | 3,2 | 4,1 | 3,4 | 13,3 | 2,2 |

Примечание: – нет данных; * – по [19].

Note: – no data; * – by [19].

Результаты исследователей показывают, что данная диаграмма имеет ограниченное применение. Это связано с различной миграционной способностью элементов, используемых в диаграмме, что приводит к искажению результатов. В следствии неравномерного перераспределения элементов происходит более активный вынос ниobia и циркония из прослоев, нежели иттрия и титана, что приводит к заниженной оценке значения кислотности и щелочности исходных пород диаграммы [21].

О природе исходного вещества горных пород можно судить по результатам изучения лантаноидов (РЗЭ). Распределение РЗЭ, нормированных на кларк для верхней континентальной земной коры в междупластии (И-22), кровле (И-1) и почве (И-36), различно (рис. 9). Породы почвы имеют характерный для террегенных осадочных отложений график распределения РЗЭ.

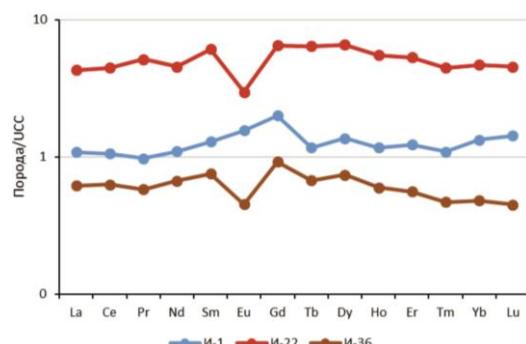


Рис. 9. Нормированные графики распределения РЗЭ в междупластии XXXa и XXX пластов и в породах почвы и кровли. Нормировано на кларк в верхней континентальной земной коре (UCC) [22]

Fig. 9. UCC-normalized REE patterns between the seams XXXa and XXX, in the bottom and roof of rock layers. Upper continental crust (UCC) data from [22]

Характер кривых распределения РЗЭ, нормированных к хондриту, в породных прослоях пластов XXX и XXXa свидетельствует о различном составе формирующего их исходного материала (рис. 10, а).

Отчетливой отрицательной европиевой аномалией характеризуется ряд проб, среди которых: прослой-

междупластие (И-22), породы почвы пласта XXX (И-36), а также тонштейны из пласта XXX (И-30, И-25). На различный состав исходного материала породных прослоев в угольных пластах указывает характер нормированных графиков и величина европиевого минимума. Европиевый минимум для пород нижней части разреза составляет $Eu/Eu^*=0.28-0.35$. Тонштейны из залегающего выше угольного пласта XXXa (пробы И-17, И-12, И-6) имеют менее отчетливый европиевый минимум, его величина составляет 0,40–0,53. Эти выводы согласуются с данными изучения TiO_2/Al_2O_3 отношения и с положением исследованных проб на диаграмме Винчестера и Флойда (табл. 4, рис. 8), указывающими на более кислый состав пирокластики в нижней части разреза (риолиты-пантеллериты) и более основной для верхней (дациты-риодазиты).

Комплекс методов, используемый при реконструкции состава пеплов, из которых сформировался изученный прослой-междупластие (И-22), позволил установить его исходный состав как пантеллеритовый. В одновозрастных углях кемеровской свиты Кузнецкого бассейна известен схожий по геологоминералогическим особенностям породный прослой [8]. На рис. 10, б приведены нормированные на хондрит графики распределения РЗЭ в породах схожего состава. Графики характеризуются отрицательной европиевой аномалией и преобладанием группы легких лантаноидов над тяжелыми.

Европиевый минимум для прослоя-междупластия из Минусинского бассейна составил 0,31, для прослоя из пласта XI Кузнецкого бассейна – 0,18. Для пантеллеритового туфа из массива Улан-Толгой, европиевый минимум составил 0,1.

Лантан-иттербьевое отношение в изученных прослоях изменяется в широких пределах от 1,9 до 37,4. Наименьшим значением La/Yb характеризуются тонштейны пласта XXXa И-12 (1,9) и И-6 (3,6). Для прослоев И-25, И-22, И-17 этот показатель колеблется в пределах 12,1–13,9. Наибольшим показателем La/Yb характеризуется тонштейн И-30 – 37,4. Для почвы (И-36) и кровли (И-1) лантан-иттербьевое отношение составило 17,6 и 11,1 соответственно.

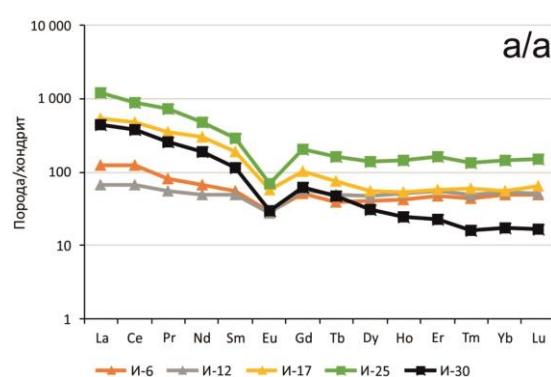
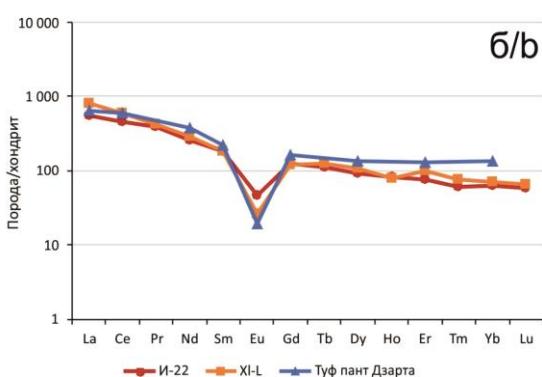


Рис. 10. Нормированные графики распределения РЗЭ: а) в тонштейнах XXXa и XXX пластов; б) в породных прослоях Минусинского бассейна, Кузнецкого бассейна и пантеллерите из массива Улан-Толгой, Монголия [24]. Нормировано на хондрит [23]

Fig. 10. Chondrite-normalized REE patterns: a) in tonsteins of the seams XXXa and XXX; b) in intraformational seams of Minusinsk and Kuznetsk basins and pantellerite from Ulan-Tolgoy massif, Mongolia [24]. Chondrite data from [23]



Заключение

Угли и внутрипластовые породные прослои в пласте XXX-XXXa Изыхского месторождения Минусинского бассейна характеризуются аномально высокими содержаниями Zr, Nb, Hf, Ta, РЗЭ и Ga. В золе угля содержание Zr в отдельных пробах достигает 1,4 %, Nb – 0,26 %, Hf – 164 г/т, Ta – 21,2 г/т, сумма РЗЭ – 0,8 %, Ga – 92 г/т.

Накопление аномальных концентраций Zr-Nb-Hf-Ta-РЗЭ и Ga характерно преимущественно для породного прослоя, разделяющего пласты XXX и XXXa, а также для углей, находящихся на контакте с породным прослоем. Цирконий, ниобий и РЗЭ образуют более контрастные ореолы вблизи партинга, чем tantal, гафний и галлий. Это объясняется различной подвижностью элементов в условиях гипергенеза. Тантал и галлий выделяются слабой способностью к миграции в данных условиях и концентрируются преимущественно в породном прослое либо в углях в непосредственном контакте с ним. Другие рудные элементы концентрируются в большей степени в угле в приконтактовой зоне, а также на удалении от прослоя.

В породах партинга (междупластия) и в углях в приконтактовой зоне выявлены многочисленные новообразованные минералы Nb, Zr и РЗЭ. Минералы циркония представлены первичным цирконом, подвергшимся коррозии, и сложными Nb-Zr-P силикатаами. Встречаются сложные Nb-Zr-P силикаты, нарастающие на оксидах титана. Среди агрегатов оксида титана были обнаружены разности с примесью Nb.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Редкometалльный потенциал углей Минусинского бассейна / С.И. Арбузов, В.В. Ершов, Л.П. Рихванов, Т.Ю. Усова, В.В. Кяргин, А.А. Булатов, Н.Е. Дубовик. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2003. – 347 с.
2. A new type of Nb (Ta)-Zr(Hf)-REE-Ga polymetallic deposit in the late Permian coal-bearing strata, eastern Yunnan, southwestern China: Possible economic significance and genetic implications / S. Dai, Y. Zhou, M. Zhang, X. Wang, J. Wang, X. Song, Y. Jiang, Y. Luo, Z. Song, Z. Yang, D. Ren // International Journal of Coal Geology. – 2010. – V. 83. – P. 55–63.
3. Geochemistry of trace elements in Chinese coals: a review of abundances, genetic types, impacts on human health, and industrial utilization / S. Dai, D. Ren, C.-L. Chou, R.B. Finkelman, V.V. Seredin, Y. Zhou // International Journal of Coal Geology. – 2012. – V. 94. – P. 3–21.
4. A model for Nb-Zr-REE-Ga enrichment in Lopingian altered alkaline volcanic ashes: Key evidence of H-O isotopes / S. Dai, V.P. Nechaev, I.Y. Chekryzhov, L. Zhao, S.V. Vysotskiy, I. Graham, C.R. Ward, A.V. Ignatiev, T.A. Velivetskaya, L. Zhao, D. French, J.C. Hower // Lithos. – 2018. – V. 302–303. – P. 359–369.
5. Geological controls on enrichment of Mn, Nb (Ta), Zr (Hf), and REY within the Early Permian coals of the Jimunai Depression, Xinjiang Province, NW China / B. Li, X. Zhuang, X. Querol, J. Li, N. Moreno, P. Córdoba, Y. Shangguan, J. Zhou, X. Ma, S. Liu // International Journal of Coal Geology. – 2019. – V. 215. – Article 103298.
6. Середин В.В. Первые данные об аномальных концентрациях ниобия в углях России // Доклады академии наук. – 1994. – Т. 335. – № 5. – С. 634–636.
7. Арбузов С.И., Ершов В.В. Геохимия редких элементов в углях Сибири. – Томск: ИД «Д-Принт», 2007. – 468 с.
8. Geochemistry, mineralogy and genesis of rare metal (Nb-Ta-Zr-Hf-Y-REE-Ga) coals of the seam XI in the south of Kuznetsk Basin, Russia / S.I. Arbuzov, D.A. Spears, A.V. Vergunov, S.S. Ilenok, A.M. Mezhibor, V.P. Ivanov, N.A. Zarubina // Ore Geology Reviews. – 2019. – V. 113. – Article 103073.
9. Угольная база России. Т. 3. Угольные бассейны и месторождения Восточной Сибири / под ред. В.Ф. Череповского. – М.: ООО «Геоинформцентр», 2002. – 488 с.
10. Государственная геологическая карта РФ. Масштаб 1:1000000 (третье поколение). Серия Алтае-Саянская. Лист N46 – Абакан. – СПб.: Картфабрика Всероссийского научно-исследовательского геологического института, 2008.
11. Ketris M.P., Yudovich Ya.E. Estimations of Clarkes for Carbonaceous biolithes: World average for trace element contents in black shales and coals // International Journal of Coal Geology. – 2009. – V. 78. – P. 135–148.
12. Spears D.A., Arbuzov S.I. A geochemical and mineralogical update on two major tonsteins in the UK Carboniferous Coal Measures // International Journal of Coal Geology. – 2019. – V. 210. – Article 103199.
13. Вергунов А.В., Арбузов С.И., Соболенко В.М. Минералогия и геохимия тонштейнов в углях Бейского месторождения Минусинского бассейна // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 2. – С. 155–166.
14. Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Основы литохимии. – СПб: Наука, 2000. – 479 с.
15. Spears D.A., Kanaris-Sotiriou R. A geochemical and mineralogical investigation of some British and other European tonsteins // Sedimentology. – 1979. – V. 26. – P. 407–425.
16. Altered volcanic ashes in coal and coal-bearing sequences: A review of their nature and significance / S. Dai, C.R. Ward, I.T. Graham, D. French, J.C. Hower, L. Zhao, X. Wang // Earth-Science Reviews. – 2017. – V. 175. – P. 44–74.
17. Spears D.A. The origin of tonsteins, an overview, and links with seatearths, fireclays and fragmental clay rocks // International Journal of Coal Geology. – 2012. – V. 94. – P. 22–31.

Согласно полученным данным на накопление редких металлов в угле изыхской свиты повлияла вулканическая пирокластика кислого и щелочного (риолит-пантеллеритового) состава. Исходным материалом, послужившим для формирования породного прослоя в углях, мог быть вулканический пепел, перенесенный из удаленного источника. По составу исходный материал пород прослоя-междупластия соответствует пантеллеритовым туфам. На территории сибирского региона схожими геохимическим чертами того же временного периода обладает угольный пласт XI кемеровской свиты Кузнецкого угольного бассейна с пепловым материалом пантеллеритового состава [8]. Особенности химического состава этих внутриугольных породных прослоев, состава минеральных новообразований в прослоях и в углях на контакте с ними позволяют идентифицировать их как аналоги. Их сходство подтверждают и различные геохимические критерии: положение на диаграмме Винчестера и Флойда, $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ отношение, особенности распределения лантаноидов. По характеру нормированной кривой прослои практически идентичны.

Полученные данные указывают на масштабное проявление кислого и щелочного вулканизма в период накопления изыхской и кемеровской свит ранне-пермского времени и расширяют перспективы выявления масштабного Zr-Nb-Hf-Ta-РЗЭ-Ga оруденения на территории Северной Азии.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-35-90010

18. Chemical and mineralogical compositions of silicic, mafic, and alkali tonsteins in the late Permian coals from the Songzao Coalfield, Chongqing, Southwest China / S. Dai, X. Wang, Y. Zhou, J.C. Hower, D. Li, W. Chen, X. Zhu, J. Zou // Chemical Geology. – 2011. – V. 282. – P. 29–44.
19. Grigorev N.A. Average concentrations of chemical elements in rocks of the upper continental crust // Geochemistry International. – 2003. – V. 41. – № 7. – P. 711–718.
20. Winchester J.A., Floyd P.A. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements // Chemical Geology. – 1977. – V. 20. – P. 325–343.
21. Минералого-geoхимическая идентификация продуктов эксплозивного вулканизма в углях Минусинского бассейна / С.И. Арбузов, С.С. Ильенок, А.В. Вергунов, М.В. Шалдыбин, В.М. Соболенко, П.Е. Некрасов // Петрология магматических и метаморфических комплексов. Вып. 9. Материалы IX Все-российской петрографической конференции с международным участием. – Томск: Изд-во Томского ЦНТИ, 2017. – С. 35–37.
22. Taylor S.R., McLennan S.M. The continental crust: its composition and evolution. – Oxford: Blackwell Scientific, 1985. – 312 p.
23. McDonough W.F., Sun S.-s. The composition of the Earth // Chemical Geology. – 1995. – V. 120. – P. 223–253.
24. Состав, источники и механизмы формирования редкometалльных гранитоидов позднепалеозойской Восточно-Саянской зоны щелочного магматизма (на примере массива Улан-Толой) / В.В. Ярмолюк, Д.А. Лыхин, А.М. Козловский, А.В. Никифоров, А.В. Травин // Петрология. – 2016. – Т. 24. – № 5. – С. 515–536.

Поступила 19.02.2020 г.

Информация об авторах

Вергунов А.В., аспирант, инженер-исследователь отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Арбузов С.И., доктор геолого-минералогических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Еремеева В.В., магистрант отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 553.493:550.42

MINERALOGY, GEOCHEMISTRY AND GENESIS OF RARE METAL Zr-Nb-Hf-Ta-REE-Ga MINERALIZATION OF THE SEAM XXX OF MINUSINSK BASIN

Alexey V. Vergunov¹,
alexeivergunov@rambler.ru

Sergey I. Arbuzov¹,
siarbuzov@mail.ru

Vlada V. Eremeeva¹,
vlada.eremeeva1996@yandex.ru

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

The relevance of the research is caused by the demand for assessment of volcanic pyroclastic material influence on formation of rare elements geochemical background in coal.

The main aim of the research is to identify mineral and geochemical characteristics of coals and surrounding rocks in the seam XXX of Minusinsk coal basin.

Objects: coals and surrounding rocks in the seam XXX of Minusinsk coal basin.

Methods: sampling of the seam XXX of Minusinsk coal basin; chemical composition is identified with inductively coupled plasma mass-spectrometry (ICP-MS), inductively coupled plasma atomic emission spectrometry (ICP-AES), instrumental neutron activation analysis (INAA); mineral composition is investigated with optical microscopy, petrographic methods, scanning electron microscopy, X-ray diffractometry.

Results. The detailed mineral and geochemical investigations of rare-metal Zr-Nb-Hf-Ta-REE-Ga mineralization in the seam XXX-XXXa, Izykh coal deposit, Minusinsk basin were carried out. In coal ash maximum content of Zr is 1,4 %, Nb – 0,26 %, Hf – 164 ppm, Ta – 21,2 ppm, Σ REE – 0,8 %, Ga – 226 ppm. The ore matter is predominantly concentrated in the fine mineral phases, composed mainly of Zr-Nb-Ti-Fe oxides, complex Nb-Zr-P silicates, rare-earth phosphates (monazite, xenotime). The relation between the anomalous concentrations of rare metals and the intraformational seam was established. The main mineral in the intraformational seam is kaolinite (68,9 %), quartz (11,0 %), K-feldspars (7,0 %), and albite (5,6 %) occur less often. This seam has volcanogenic pyroclastics genesis, and its composition is pantellerite-comendite. The intraformational seam enriched with similar rare-metal mineralization was found earlier in coals of Kemerovskaya suite (Kuznetsk coal basin). Complex Zr-Nb-Hf-Ta-REE-Ga mineralization associated with the volcanogenic pyroclastics in coals of both Kuznetsk and Minusinsk basins is an evidence of possible global felsic and alkaline volcanic activity during coal formation and expands the prospects of revealing further such mineralization in Permian coals of other basins.

Key words:

Coal, coal basin, rare metal mineralization, volcanogenic pyroclastic, Minusinsk basin.

The reported study was funded by RFBR, project number 19-35-90010.

REFERENCES

1. Arbuzov S.I., Ershov V.V., Rikhvanov L.P., Usova T.Y., Kargin V.V., Bulatov A.A., Dubovik N.E. *Redkometallny potentsial ugley Minusinskogo basseyna* [Rare-metal potential of the coals of the Minusinsk basin]. Novosibirsk, SO RAN Publ., 2003. 347 p.
2. Dai S., Zhou Y., Zhang M., Wang G.X., Wang J., Song X., Jiang Y., Luo Y., Song Z., Yang Z., Ren D. A new type of Nb(Ta)-Zr(Hf)-REE-Ga polymetallic deposit in the late Permian coal-bearing strata, eastern Yunnan, southwestern China: Possible economic significance and genetic implications. *International Journal of Coal Geology*, 2010, vol. 83, pp. 55–63.
3. Dai S., Ren D., Chou C.-L., Finkelman R.B., Seredin V.V., Zhou Y. Geochemistry of trace elements in Chinese coals: a review of abundances, genetic types, impacts on human health, and industrial utilization. *International Journal of Coal Geology*, 2012, vol. 94, pp. 3–21.
4. Dai S., Nechaev V.P., Chekryzhov I.Yu., Zhao L., Vysotskiy S.V., Graham I., Ward C.R., Ignatiev A.V., Velivetskaya T.A., Zhao L., French D., Hower J.C. A model for Nb-Zr-REE-Ga enrichment in Lopingian altered alkaline volcanic ashes: key evidence of H-O isotopes. *Lithos*, 2018, vol. 302–303, pp. 359–369.
5. Li B., Zhuang X., Querol X., Li J., Moreno N., Córdoba P., Shangguan Y., Zhou J., Ma X., Liu S. Geological controls on enrichment of Mn, Nb (Ta), Zr (Hf), and REY within the Early Permian coals of the Jimunai Depression, Xinjiang Province, NW China. *International Journal of Coal Geology*, 2019, vol. 215, article 103298.
6. Seredin V.V. Pervye dannye ob anomalnykh kontsentratsiyakh niobiya v uglyakh Rossii [The first data on abnormal concentrations of niobium in coals of Russia]. *Doklady akademii nauk*, 1994, vol. 335, no. 5, pp. 634–636.
7. Arbuzov S.I., Ershov V.V. *Geokhimiya redkikh elementov v uglyakh Sibiri* [Geochemistry of rare elements in coals of Siberia]. Tomsk, D-Print Publ. house, 2007. 468 p.
8. Arbuzov S.I., Spears D.A., Vergunov A.V., Ilenok S.S., Mezhibor A.M., Ivanov V.P., Zarubina N.A. Geochemistry, mineralogy and genesis of rare metal (Nb-Ta-Zr-Hf-Y-REE-Ga) coals of the seam XI in the south of Kuznetsk Basin, Russia. *Ore Geology Reviews*, 2019, vol. 113, article 103073.
9. *Ugolnaya baza Rossii. T. 3. Ugolnye basseyny i mestorozhdeniya Vostochnoy Sibiri* [Coal base of Russia. Vol. III. Coal basins and deposits of Eastern Siberia]. Ed. by V.F. Cherepovskiy. Moscow, Geoinformtsentr Publ., 2002. 488 p.
10. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta RF. Masshtab 1:1000000 (tretye pokolenie). Seriya Altaye-Sayanskaya. List N46, Abakan* [State geological map of the Russian Federation. Scale 1:1000000 (third generation). Series Altai-Sayan. Sheet N-46, Abakan]. St-Petersburg, Cartridge factory Russian Geological Research Institute, 2008.
11. Ketriss M.P., Yudovich Ya.E. Estimations of Clarkes for Carbonaceous biolithes: World average for trace element contents

- in black shales and coals. *International Journal of Coal Geology*, 2009, vol. 78, pp. 135–148.
12. Spears D.A., Arbuzov S.I. A geochemical and mineralogical update on two major tonsteins in the UK Carboniferous Coal Measures. *International Journal of Coal Geology*, 2019, vol. 210, article 103199.
 13. Vergunov A.V., Arbuzov S.I., Sobolenko V.M. Mineralogy and geochemistry of tonsteins in the Beysk coal deposit of the Minusinsk coal basin. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330 no. 2, pp. 155–166. In Rus.
 14. Yudovich Ya.E., Ketris M.P. *Osnovy lithohimii* [Foundations of lithochemistry]. St-Petersburg, Science Publ., 2000. 479 p.
 15. Spears D.A., Kanaris-Sotiriou R. A geochemical and mineralogical investigation of some British and other European tonsteins. *Sedimentology*, 1979, vol. 26, pp. 407–425.
 16. Dai S., Ward C.R., Graham I.T., French D., Hower J.C., Zhao L., Wang X. Altered volcanic ashes in coal and coal-bearing sequences: a review of their nature and significance. *Earth-Science Reviews*, 2017, vol. 175, pp. 44–74.
 17. Spears D.A. The origin of tonsteins, an overview, and links with seatearths, fireclays and fragmental clay rocks. *International Journal of Coal Geology*, 2012, vol. 94, pp. 22–31.
 18. Dai S., Wang X., Zhou Y., Hower J.C., Li D., Chen W., Zhu X., Zou J. Chemical and mineralogical compositions of silicic, mafic, and alkali tonsteins in the late Permian coals from the Songzao Coalfield, Chongqing, Southwest China. *Chemical Geology*, 2011, vol. 282, pp. 29–44.
 19. Grigorev N.A. Average concentrations of chemical elements in rocks of the upper continental crust. *Geochemistry International*, 2003, vol. 41, no. 7, pp. 711–718.
 20. Winchester J.A., Floyd P.A. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical Geology*, 1977, vol. 20, pp. 325–343.
 21. Arbuzov S.I., Ilenok S.S., Vergunov A.V., Shalbybin M.V., Sobolenko V.M., Nekrasov P.E. Mineralogo-geokhimicheskaya identifikatsiya produktov eksplozivnogo vulkanizma v uglyakh Minusinskogo basseyna [Mineralogical and geochemical identification of products of explosive volcanism in the coals of the Minusin basin]. *Petrologiya magmaticheskikh i metamorficheskikh kompleksov. Vyp. 9 Materialy IX Vserossiyskoy petrograficheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem* [Petrology of magmatic and metamorphic complexes. Iss. 9 Materials of the IX All-Russian Petrographic Conference with international participation]. Tomsk, Tomsk scientific and technical information center Publ., 2017, pp. 35–37.
 22. Taylor S.R., McLennan S.M. *The continental crust: its composition and evolution*. Oxford, Blackwell Scientific, 1985. 312 p.
 23. McDonough W.F., Sun S.-s. The composition of the Earth. *Chemical Geology*, 1995, vol. 120, pp. 223–253.
 24. Yarmolyuk V.V., Kozlovsky A.M., Nikiforov A.V., Travin A.V., Lykhin D.A. Composition, sources, and mechanisms of origin of rare-metal granitoids in the late Paleozoic Eastern Sayan zone of alkaline magmatism: a case study of the Ulaan Tolgoi massif. *Petrology*, 2016, vol. 24, no. 5, pp. 477–496.

Received: 19 February 2020.

Information about the authors

Alexey V. Vergunov, post-graduate student, research engineer, National Research Tomsk Polytechnic University.

Sergey I. Arbuzov, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Vlada V. Eremeeva, graduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

МИГРАЦИЯ РТУТИ В ПОСТПИРОГЕННЫХ УСЛОВИЯХ

Журкова Инна Сергеевна,
zhurkova@igm.nsc.ru

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

Актуальность исследования обусловлена необходимостью оценки выноса ртути при лесных пожарах. Лесные пожары являются катализатором миграции ртути, способствуя ее активному поступлению в атмосферу. В зависимости от типа пожара соединения ртути перераспределяются в пределах пожарного или выносятся на дальние расстояния.

Цель: оценить миграцию супертоксиканта ртути в пирогенных условиях и масштабы ее воздействия на растительные компоненты и окружающую среду.

Объекты: почва и растительные компоненты на территории Караканского бора, расположенного в Ордынском районе Новосибирской области, где произошел пожар смешанного типа, сочетающий низовой и повально-верховой.

Методы. Отбор проб почв (n=51 штук) проведен летом 2011, 2013, 2015, 2018 гг. металлическим кольцевым пробоотборником (высота 50 мм, диаметр 84 мм), используемым для экогеохимических исследований. Отбор проб коры, веток, хвои (n=15 штук) проводили ручным способом. Пробоподготовку проводили по схеме: измельчение–квартование–взвешивание. Определение ртути выполнено атомно-абсорбционным методом «холодного паро» с использованием амальгамации на золотом сорбенте.

Результаты. Проведено сравнение физико-химических характеристик проб, отобранных на фоновых и горелых территориях. Оценено содержание ртути на фоновой и горелых поверхностях. Установлено, что содержание ртути ниже на горелых площадях, а с течением времени оно снижается как на фоновых, так и на горелых поверхностях. Рассмотрено распределение ртути в системе «кора–ветви–хвоя» для образцов, отобранных на фоновых площадях. Наименьшее содержание ртути определено в образцах хвои. Проведен анализ степени поглощения ртути растениями из почвы на примере образцов листьев бересклета повислого (*Betula Pendula Roth*) и осины обыкновенной (*Populus tremula Linnaeus*), хвои сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris Linnaeus*), иван-чая узколистного (*Chamerion angustifolium Linnaeus*), мхов (*Hylocomium splendens Bruch*), лишайников (*Cladina stellaris Opiz*) на фоновой и горелой поверхностях. Наибольший коэффициент поглощения имеет мх на фоновой (0,75) и горелой (1,0) поверхностях.

Ключевые слова:

Ртуть, постпожарные изменения, лесные пожары, миграция, атмосферное загрязнение.

Введение

Изучению лесных пожаров посвящено множество работ [1–4]. Анализ пирологических данных за последние два с лишним десятка лет (1996–2018) показывает увеличение количества лесных пожаров в различных областях Сибири [5–7]. Пожары приводят к уничтожению лесных массивов [8], изменению климата [3], заболачиванию территорий [9], загрязнению окружающей среды, чему способствует вынос в атмосферу органических соединений (фосген, угарный газ, метан, фенол) [10, 11] тяжелых металлов [7] и радионуклидов [12]. Ранее проведены многолетние исследования миграции ряда элементов при лесных пожарах [13, 14]. По характеру поведения в пирогенных условиях элементы делятся на две группы: мигранты (Hg, Cd, Pb, Zn, Mn, As, 90Sr, 137Cs) и пассивные (Al, Fe, Mg, V, Cr, Ni, Co, Ca, K, Na) [7]. Перераспределение элементов приводит к изменению свойств почв [13] и элементного состава растительных компонентов [7]. Тяжелые металлы и радионуклиды оказывают токсичное действие как на растения, так и на живые организмы, более губительное влияние имеет их сочетанное действие, поскольку ионизирующее излучение и тяжелые металлы увеличивают количество aberrантных клеток в живых организмах [15]. Соединения свинца отрицательно влияют на состав крови и нервную систему, мышьяк вызывает мутагенные последствия, кадмий относится к особо опасным канцерогенам, воздействуя на многие системы

организма [16–19]. Отдельная роль принадлежит ртути, относящейся к токсикантам повышенной опасности, она влияет на нервную и эндокринную системы, действует на печень, почки, кишечный тракт [20]. Ртуть легколетучая, в кислой pH среде образует сильные связи с серой или находится в элементарном состоянии, в водной среде образует высоко подвижные, хорошо растворимые органо-металлические соединения (метилртуть, фенилртуть) [21]. С повышением температуры и щелочности почвы ртуть поступает в атмосферу в виде паров [22]. Пары ртути ускоряют процессы старения, нарушая метаболические процессы (фотосинтез, образование хлорофилла, газового обмена, дыхания), что приводит к задержке роста всходов, развития корней и снижению урожайности, молодые растения более чувствительны к насыщенному парами ртути воздуху, чем взрослые. Скорость поглощения ртути растениями и почвенной биотой зависит от освещенности, но не зависит от температуры окружающего воздуха [23].

В настоящее время оценка естественных источников выбросов ртути считается более неопределенной, чем оценка антропогенных источников [24]. Лесные пожары способствуют активному поступлению ртути в атмосферу и ее перераспределению в ней. X. Huang et al. подсчитали [25], что среднегодовое количество выбросов ртути в результате горения биомассы составило 675 ± 240 т в год, что составляет 8 % от общего антропогенного и природного источника ртути.

Имеется ряд работ, посвященных миграции ртути в атмосфере, в том числе при пожарах и в постпирогенных условиях. Исследователи [26] проводили эксперимент, который заключался в сжигании образцов растительных компонентов в лабораторных условиях с целью получения зольного материала. Аналитические данные показали содержание ртути в золе меньше на 97,5–99,8 %, чем в исходном материале, что свидетельствует о выносе ртути в атмосферу.

Настоящая работа посвящена исследованию влияния верховых пожаров на миграцию ртути. Несмотря на широкий спектр исследований, проведенных в области лесных пожаров, работы, посвященных миграции ртути немногочисленны. Учитывая ее высокую токсичность, существует необходимость в понимании ее поведения в атмосфере и влияния на растительные компоненты в условиях лесных пожаров.

Цель работы – проследить перемещение супертоксиканта ртути в пирогенных условиях и оценить масштабы ее воздействие на растительные компоненты и окружающую среду.

Материалы и методы

Объектом исследования выбраны почвы и растительные компоненты, отобранные в Караканском бору Ордынского района Новосибирской области. Караканский бор представляет собой лесостепную природную зону со множеством речек и ручьев, впадающих в Новосибирское водохранилище. Сложное геологическое строение лесного массива Караканского бора сочетает в себе рыхлый однородный материал речных террас со скальными породами различного возраста и генезиса. Здесь сосредоточены основные массивы черноземов, сформировались дерново-подзолистые почвы (боровые пески). Многие растения Караканского бора включены в региональную Красную книгу Российской Федерации [27]. Каракан включает в себя пять крупных поселений с численно-

стью населения около 6 тыс. чел., а в летне-осенний период количество человек увеличивается до 15 тыс. за счет туристов [28]. Это приводит к повышенному уровню загрязнения и пожароопасной ситуации, в результате площадь бора изобилует пожарищами различного возраста.

Предметом исследования стало содержание ртути в компонентах природной среды в постпирогенных условиях в Караканском бору в мае 2006 г., образовавшихся в результате пожара, вызванного преднамеренным поджогом. Во время пожара температура воздуха составляла 26–28 °C, дул юго-западный ветер со скоростью 15–18 м/с. Тип произошедшего пожара характеризуется как смешанный, сочетающий низовой и повально-верховой с незатронутыми площадями, чему способствовали особенность рельефа бора и множество болотистых участков [29].

Обследование пожарища и прилегающих к нему площадей проведено спустя 5, 7 и 9 лет после пожара.

Отбор проб почв [30] проведен в координатных точках, указанных на рис. 1, в 16-ти точках по 3 в каждой, металлическим кольцевым пробоотборником (высота 50 мм, диаметр 84 мм), используемым при экгеохимических исследованиях [7]. Пробоотбор проходил летом 2011, 2013, 2015, 2018 гг. при ясных сухих погодных условиях, температура воздуха составляла более 20 градусов, скорость ветра не превышала 15 м/с. Масса проб составляла в среднем 80–120 г. Общее количество образцов почв, листьев бересклета, листьев осины, хвои сосны, отобранных на фоновых и горелых поверхностях, составило 16 штук для каждого года отбора. Сухие образцы упаковывали в тряпичные продуваемые мешки. На фоновых местах в пробу попадали мхи, лишайники, свежий опад и лесная подстилка или дерновый слой почвы, т. е. все наземные лесные горючие материалы (ЛГМ), на пожарищах – все, что осталось от ЛГМ и горелая почва.

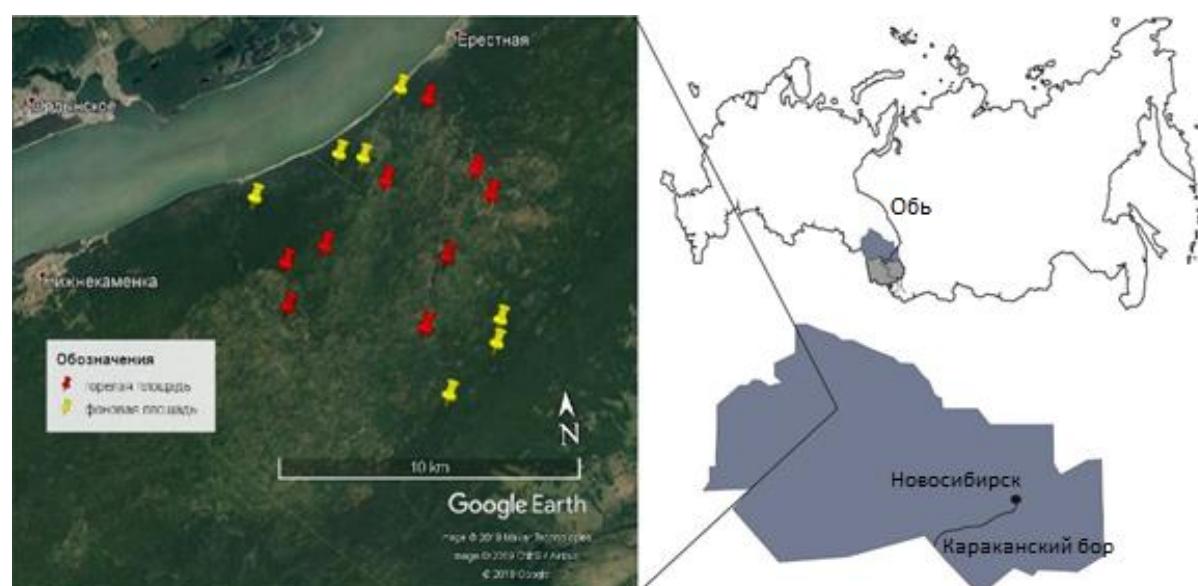


Рис. 1. Схема отбора проб. Примечание: желтые точки – фоновые площади; красные точки – горелая площадь

Fig. 1. Sampling scheme. Note: yellow points – background areas; red points – fire areas

Отбор проб коры, веток, хвои сосны проводили вручную [7]. Возраст хвои на момент отбора составлял 1 и 3 года.

После отбора пробы высушивали и проводили стандартную подготовку (измельчение–квартовани–взвешивание) к химическому анализу [31]. Маршруты отбора проб выбирались по схеме «наветренная сторона–пожарище–подветренная сторона» для выяснения влияния пожара на геохимический состав почв пожарища и прилегающей к нему площади. Выбор расстояний между точками отбора контролировался размерами пожарища, а длина трансекта – изменением ландшафтных условий: при одинаковых параметрах достаточным считался отбор 10–12 проб за пределами гари.

Основные задачи проведенных исследований решались сравнением концентраций элементов на фоновых (прилегающих к пожарищу территориях) и выгоревших площадях.

Определение ртути выполнено атомно-абсорбционным методом «холодного пара» с использованием амальгамиации на золотом сорбенте аналитиком Ж.О. Бадмаевой. Использовался спектрометр фирмы «Perkin-Elmer» (США), модель 3030 В с ртутно-гидридной приставкой MHS-20. Предел обнаружения метода при навеске пробы 0,5 г составляет $0,010 \pm 0,005$ ppm. Относительная погрешность составляет 10 %.

Аналитические работы выполнены в Центре коллективного пользования многоэлементных и изотопных исследований Института геологии и минералогии СО РАН. В фоновых и горелых почвах определена величина pH водных суспензий и зольность (%). Величина pH определялась по опубликованной методике [32], зольность – весовым методом [33].

Результаты и обсуждение

В пробах почв подзолистого типа определены величины pH водных суспензий и зольность по опубликованным методикам. Почвы на фоновых площадях характеризуются кислой реакцией ($4,9 \pm 0,1$) и зольностью 50 %, почвы на горелой поверхности – слабокислой реакцией среды ($5,7 \pm 0,2$) и зольностью 70 %.

Результаты атомно-абсорбционного анализа соотносятся с данными других авторов [25, 26], сообщающих о том, что лесной пожар сопровождается выносом ртути в атмосферу, и показывают более низкое содержание ртути в образцах почвы, отобранных на горелой поверхности, чем на фоновой (рис. 2). Разница между содержанием ртути на фоновой и горелой поверхностях составила: в 2011 г. – 34,5 %, в 2013 г. – 38,7 %, в 2015 г. – 57,1 %.

Кроме того, проведенный нами мониторинг в течение нескольких лет показывает (рис. 2) снижение концентрации ртути в почвах как на фоновой, так и на горелой площадях, с увеличением времени после пожара.

Снижение концентрации ртути на фоновых площадях с течением времени связано с восстановлением катиона Hg^{2+} до Hg^0 , которое сопровождается удалением ртути из среды в виде паров, чему способствует повышение щелочности почвы [34] и температуры,

которое возникает в результате солнечной активности [35].

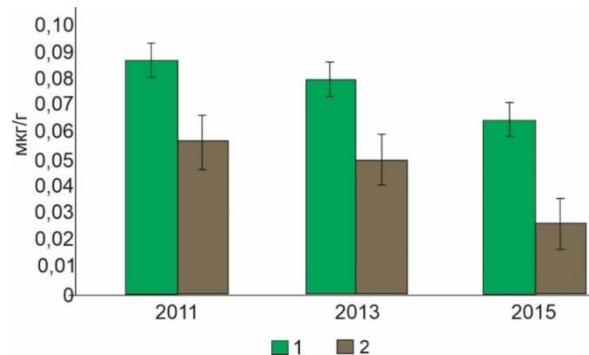


Рис. 2. Содержание ртути в почвах в зависимости от времени после пожара. Примечание: 1 – фоновая площадь ($n=7$ в каждой выборке), 2 – горелая площадь ($n=9$ в каждой выборке)

Fig. 2. Mercury content in soils depending on the time after the fire. Note: 1 – background surface ($n=7$ in each sample), 2 – burned surface ($n=9$ in each sample)

Лесной пожар сопровождается глобальным выносом в атмосферу ряда химических элементов, в частности ртути, и приводит к изменению pH почв в сторону щелочной ($5,7 \pm 0,2$). В последующие годы после пожара на постпирогенных площадях происходит более активный вынос ртути в атмосферу по сравнению с фоновыми поверхностями.

Обожженные участки имеют более низкие показатели накопления ртути и сниженную способность удерживать ранее накопленные соединения ртути [36].

Исследования, проводимые на фоновой территории и территориях низового и верхового пожаров, произошедших 9 лет назад, показали различие в содержании ртути на всех рассмотренных площадях (рис. 3). Наименьшее содержание ($0,03$ mg/kg) отмечено в почвах, подвергшихся верховому пожару, при низовом пожаре содержание ртути составило $0,08$ mg/kg, на фоновой поверхности – $0,06$ mg/kg.

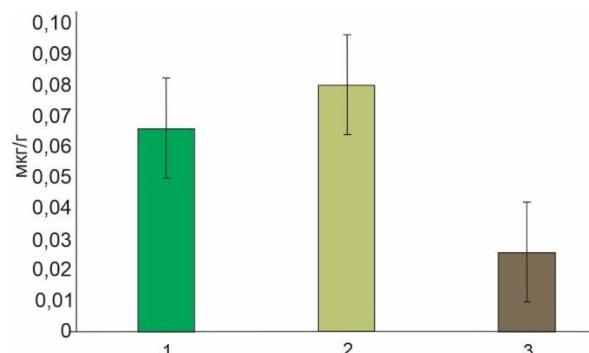


Рис. 3. Содержание ртути в почвах. Примечание: 1 – фоновая площадь ($n=7$), 2 – низовой пожар ($n=6$), 3 – верховой пожар ($n=6$)

Fig. 3. Mercury content in soils. Note: 1 – background surface ($n=7$), 2 – ground fire ($n=6$), 3 – crown fire ($n=6$)

Тип пожара влияет на распределение ртути в окружающей среде. Содержание ртути на участках

низовых пожаров выше, чем на фоновых и верховых, поскольку, с одной стороны, при низовом пожаре ртуть перераспределяется в экосистеме, оставаясь внутри пожарища, а с другой – температура низового пожара, в отличие от температуры верхового, недостаточна для разрушения наиболее стабильных связей Hg-лигандов [37]. Верховой пожар уничтожает практически всю лесную растительность (деревья, травы, лишайники, верхние слои почвы), сопровождаясь выносом в атмосферу химических элементов, температура кипения которых близка или ниже температуры пожара [13].

Следующий этап работы заключался в оценке распределения ртути в вегетативных органах сосны. Возраст сосен составляет 16 лет. Место их произрастания удалено от дороги и находится на территории базы отдыха «Геология» в Караканском бору. Распределение ртути смотрели в системе почва–кора–ветви–хвоя. Ветви разделили на три части – возрастом более 3-х лет, менее 3-х лет и менее года.

Содержание ртути в почве, на которой произрастали исследуемые сосны, составило $0,030 \pm 0,002$ мкг/г. Наибольшее содержание ртути (рис. 4) определено в ветвях возраста более 3-х лет ($0,040 \pm 0,004$ мкг/г). Содержание ртути в ветвях возраста менее 3-х лет равно $0,026 \pm 0,002$ мкг/г, в ветвях возраста менее года – $0,020 \pm 0,002$ мкг/г, в хвое возраста года отбора (мериместемные окончания) – $0,018 \pm 0,004$ мкг/г, в коре – $0,028$ мкг/г. Полученные значения концентраций ртути в почве не превышают уровень ПДК, равного 2,1 мг/кг [38].

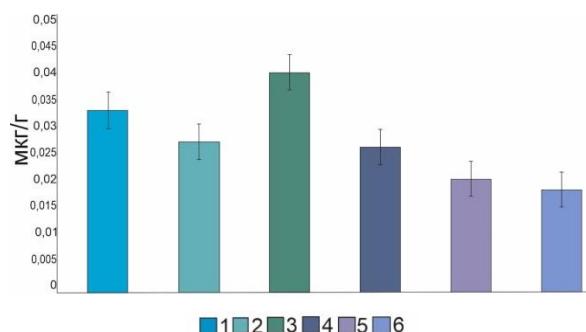


Рис. 4. Распределение ртути в органах сосны на фоновой площади. Примечание: 1 – почва, 2 – кора, 3 – ветви (возраст более 3-х лет), 4 – ветви (возраст менее 3-х лет), 5 – ветви (возраст менее года), 6 – хвоя, $n=3$ для каждой выборки

Fig. 4. Mercury distribution in the organs of pine trees on a background surface. Note: 1 – soil, 2 – bark, 3 – branches, 4 – young branches, 5 – new branches, 6 – pine needle, $n=3$ in each sample

Ртуть легко поглощается корневой системой и переносится в растении [35]. Однако вследствие сильного связывания ртути компонентами почвы уровень ее концентрации в самом растении может быть значительно ниже, чем в почве. Растения могут непосредственно поглощать пары ртути. Молодые растения в отличие от взрослых более чувствительны к насыщенному парами ртути воздуху [16].

По результатам полученных данных в исследуемых нами образцах органов сосны наименьшее содержание ртути определено в хвое, что подтверждает данные работы [39].

Для более детального изучения воздействия ртути на вегетативные органы растений, в зависимости от их типа и места произрастания, были рассмотрены листья березы, осины, хвоя сосны, иван-чай, лишайник, мох, отобранные на фоновых и горелых площадях. Определены содержания ртути в почвах и образцах растений, проведено сравнение содержаний на фоновой и горелой площадях, посчитаны коэффициенты концентрации для мха, лишайника и иван-чая. М. Ассад и др. проводили эксперимент по выращиванию тополей на загрязненном ртутью субстрате и в камере, обогащенной ртутью. Был сделан вывод, что листья тополя поглощают ртуть исключительно через атмосферный путь [40]. Поскольку поглощение ртути листьями березы, осины и хвоей сосны проходит путем атмосферного поступления и не зависит от содержания в почве [40], коэффициенты концентрации для них рассматривать нецелесообразно.

Коэффициент концентрации Кк характеризует степень поглощения элемента растительными компонентами из почвы, на которых они произрастают.

$$K_k = \frac{C_{\text{растения}}}{C_{\text{почвы}}},$$

где С (растения) – содержание ртути в растении; С (почвы) – содержание ртути в почве.

Примечание: Растение – мох, иван-чай, лишайник.

Кк ртути горелых площадей выше фоновых для иван-чая, мха, лишайника. Наибольший Кк для иван-чая (0,45) и мха (таблица).

Таблица. Содержание (мг/кг) и коэффициенты концентрации ртути в почве и растениях

Table. Content (mg/kg) and mercury concentration factors in soil and plants

| Растительный компонент Vegetable element | Hg | | Кк | |
|---|-------------------|---------------------------------------|-------------------|---------------------------------------|
| | Фон Background | Горелая поверхность Burned surface | Фон Background | Горелая поверхность Burned surface |
| Почва Soil | $0,080 \pm 0,010$ | $0,05 \pm 0,010$ | – | – |
| Лист березы Birch leaf | $0,017 \pm 0,006$ | $0,014 \pm 0,002$ | – | – |
| Лист осины Aspen leaf | $0,021 \pm 0,005$ | $0,016 \pm 0,002$ | – | – |
| Хвоя Pine needle | $0,023 \pm 0,007$ | $0,014 \pm 0,002$ | – | – |
| Иван-Чай Ivan-tea | $0,012 \pm 0,005$ | $0,024 \pm 0,003$ | 0,15 | 0,48 |
| Мох Moss | $0,060 \pm 0,010$ | $0,050 \pm 0,01$ | 0,75 | 1,00 |
| Лишайник Lichen | $0,030 \pm 0,008$ | $0,020 \pm 0,006$ | 0,37 | 0,38 |

Коэффициент концентрации ртути зависит от типа, вегетативных органов и площади (горелая/не горелая) произрастания растений. Отсутствие корневой системы у лишайника предполагает только атмосферное поступление ртути, что делает его хорошим индикатором загрязнения окружающей среды, по

анalogии с хвойей [39]. Кк иван-чая и мха выше на горелой поверхности, поскольку поглощение ртути происходит как из атмосферы, так и из почвы.

Заключение

Лесные пожары приводят к изменению рН почв в сторону щелочной и повышают зольность почвы на 20 %. При низовом пожаре ртуть переносится на соседние территории, в пределах пожара. При верховом пожаре выносится в атмосферу на дальние расстояния. С каждым годом в Караканском бору концентрация ртути уменьшается как на фоновых, так и на горелых территориях, что объясняется отсутствием источника техногенного загрязнения в районе Караканского бора.

Органы сосны поглощают ртуть из почвы, большая часть ртути концентрируется во взрослых ветвях, хвоя сосны поглощает ртуть из атмосферы и служит индикатором уровня загрязнения ртутью в атмосфере.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Forest fires in Europe Middle East and North Africa / G. Schmuck, J. San-Miguel-Ayanz, A. Camia, T.H. Durrant, R. Boca, G. Liberta // Reference Report by the Joint Research Center of the European Commission, 2012. – 118 p.
2. Kanga S., Tripathi G., Singh S.K. Forest fire hazards vulnerability and risk assessment in Bhajji forest range of Himachal Pradesh (India) // Journal of Remote Sensing & GIS. – 2017. – V. 8. – № 1. – P. 1–16.
3. Valderrama L., Contreras-Reyes J., Carrasco R. Ecological impact of forest fires and subsequent restoration in Chile // Resources. – 2018. – V. 7. – № 2. – P. 26–36.
4. Анализ изменения пожароопасной обстановки в лесах России в XX–XXI веках / С.П. Малевский-Малевич, Е.К. Молькентин, Е.Д. Надеждин и др. // Метеорология и гидрология. – 2007. – № 3. – С. 14–24.
5. Пономарев Е.И., Харук В.Н., Якимов Н.Д. Результаты спутникового мониторинга природных пожаров Сибири // Сибирский лесной журнал. – 2017. – № 5. – С. 25–36.
6. Фуряев В.В. и др. Условия возникновения и распространения пожаров в лесных районах Красноярского края // Хвойные бореальные зоны. – 2017. – Т. 35. – № 1–2. – С. 66–74.
7. Щербов Б.Л., Лазарева Е.В., Журкова И.С. Лесные пожары и их последствия. – Новосибирск: Изд-во «ГЕО», 2015. – 154 с.
8. Condé T.M., Higuchi N., Lima A.J.N. Illegal selective logging and forest fires in the Northern Brazilian Amazon // Forests. – 2019. – V. 10. – № 1. – P. 61–83.
9. Introduction to chemical engineering thermodynamics / J.M. Smith, H.C. van Ness, M. Abbott, M. Swihart. – USA: McGraw-Hill Education, 2018. – 768 p.
10. Маркизова Н.Ф., Преображенская Т.Н. Токсичные компоненты пожаров. – СПб: ООО Изд-во «ФОЛИАНТ», 2008. – 208 с.
11. Using low-density discrete Airborne Laser Scanning data to assess the potential carbon dioxide emission in case of a fire event in a Mediterranean pine forest / A.L. Montealegre-Gracia, M.T. Lamelas-Gracia, A. García-Martín, J. de la Riva-Fernández, F. Escrivano-Bernal // GIScience & Remote Sensing. – 2017. – V. 54. – № 5. – P. 721–740.
12. Дворник А.А., Дворник А.М. Радиационная опасность продуктов сгорания горючих компонентов лесных фитоценозов // Экологический вестник. – 2015. – № 1. – С. 31–36.
13. Журкова И.С., Щербов Б.Л. Миграция химических элементов при лесном низовом пожаре (Алтайский край) // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле. – 2016. – Т. 16. – С. 30–41.
14. Wright H.E., Heinzelman M.L. The ecological role of fire in natural conifer forests of western and northern North America – Introduction // Fire Ecology. – 2014. – V. 10. – № 3. – P. 4–13.
15. Влияние комбинированного действия ионизирующего излучения и солей тяжелых металлов на частоту хромосомных aberrаций в листовой меристеме ярового ячменя / С.А. Ге-раськин, В.Г. Дикарев, А.А. Удалова, Н.С. Дикарева // Генетика. – 1996. – Т. 32. – № 2. – С. 279–288.
16. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях / Пер. с англ. – М: Мир, 1989. – 439 с.
17. Алексеенко В.А. Геохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых. – М: Логос, 2005. – 354 с.
18. Перельман А.И., Касимов Н.С. Геохимия ландшафта. – М.: Астрея-2000, 1999. – 768 с.
19. Prevalence of exposure of heavy metals and their impact on health consequences / K. Rehman, F. Fatima, I. Waheed, M.S. Akash // Journal of cellular biochemistry. – 2018. – V. 119. – № 1. – P. 157–184.
20. The toxicology of mercury: current research and emerging trends / G. Bjorklund, M. Dadar, J. Mutter, J. Aaseth // Environmental research. – 2017. – V. 159. – P. 545–554.
21. Токсичные (ртуть, бериллий) и биогенные (селен, фтор) элементы в аквальных экосистемах Байкальской природной территории / И.С. Ломоносов, В.И. Гребенщикова, О.А. Склярова, Н.Н. Бриоханова, Д.А. Носков, Л.М. Яновский, Ю.Н. Диленков // Водные ресурсы. – 2011. – Т. 38. – № 2. – С. 193–204.
22. Hightower J. Methyl mercury reference dose: response to Schoen // Environmental Health Perspectives. – 2004. – V. 112. – № 6. – P. 337–338.
23. Subir M., Ariya P.A., Dastoor A.P. A review of the sources of uncertainties in atmospheric mercury modeling II. Mercury surface and heterogeneous chemistry – a missing link // Atmospheric Environment. – 2012. – V. 46. – P. 1–10.
24. New constraints on terrestrial surface–atmosphere fluxes of gaseous elemental mercury using a global database / Y. Agnan, T. Le Dantec, C.W. Moore, G.C. Edwards, D. Obrist // Environ. Sci. Technol. – 2016. – V. 50. – P. 507–524.
25. Mercury emissions from biomass burning in China / X. Huang, M. Li, H.R. Friedli, Y. Song, D. Chang, L. Zhu // Environ. Sci. Technol. – 2011. – V. 45 (21). – P. 9442–9448.
26. Friedli H.R., Radke L.F., Lu J.Y. Mercury in smoke from biomass fires // Geophysical research letters. – 2001. – V. 28. – № 17. – P. 3223–3226.
27. Красная книга Российской Федерации (Растения и грибы) / под ред. Ю.П. Трутнева, Р.Р. Гизатулина, О.Л. Митволь. – М.: ООО Товарищество научных изданий КМК, 2008. – 885 с.
28. Грицкевич О.В., Ушакова Е.О. Развитие рекреационного потенциала территории на примере Караканского бора Ордынского района Новосибирской области // Интерэко ГеоСибирь. – 2015. – Т. 3. – № 1. – С. 46–51.
29. Журкова И.С., Щербов Б.Л., Будашкина В.В. Постпирогенный элементный состав почвенно-растительного покрова в сосновом бору (Новосибирская область) // Вестник воронежского университета. Серия: География. Геоэкология. – 2018. – № 3. – С. 44–49.
30. ГОСТ 17.4.4.02.2017 Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа. – М.: Стандартинформ, 2018. – 21 с.

Уровень загрязнения ртутью в исследуемой нами области Караканского бора Новосибирской области находится в пределах $0,018 \pm 0,004$ мкг/г.

Ртуть является подвижным элементом и легко перемещается в различные ткани растений. Кк ртути для растений, произрастающих на фоновых площадях, ниже, чем Кк ртути для растений такого же вида, произрастающих на горелых площадях. Наиболее высокие значения отмечены для мха. Лишайники аналогично хвое являются индикаторами атмосферного загрязнения, поскольку не имеют корневой системы и имеют лишь атмосферный путь поступления.

Работа выполнена в рамках государственного задания № 0330-216-0011 и при финансовой поддержке гранта РФФИ в рамках научного проекта № 18-35-00408 мол_а (аналитические исследования проведены в «ЦКП Многоэлементных и изотопных анализов ИГМ СО РАН»).

31. ГОСТ Р 56157-2014 Почва. Методики (методы) анализа состава и свойств проб почв. Общие требования к разработке. – М.: Стандартинформ, 2015. – 10 с.
32. Пустовалов Л.В., Соколова Е.И. Методы определения pH и Eh в осадочных породах // Методы изучения осадочных пород. – 1957. – Т. 2. – С. 116–127.
33. Аринушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. – М.: Изд-во Московского университета, 1961. – 488 с.
34. Lin C.J., Pehkonen S.O. The chemistry of atmospheric mercury: a review // Atmospheric environment. – 1999. – V. 33. – № 13. – P. 2067–2079.
35. Grigal D.F. Mercury sequestration in forests and peatlands // Journal of environmental quality. – 2003. – V. 32. – № 2. – P. 393–405.
36. Release of mercury from Rocky Mountain forest fires / A. Biswas, J.D. Blum, B. Klaue, G.J. Keeler // Global Biogeochemical Cycles. – 2007. – V. 21. – № 1. – P. 1–13.
37. Effects of wildfire on mercury mobilisation in eucalypt and pine forests / I. Campos, C. Vale, N. Abrantes, J.J. Keizer, P. Pereira // Catena. – 2015. – V. 131. – P. 149–159.
38. Арефьева А.С., Барыгина В.В., Зацепина О.В. Современные представления о влиянии соединений ртути на клеточном и системном уровне (обзор) // Экология человека. – 2010. – № 8. – С. 35–41.
39. Factors influencing mercury uptake by leaves of stone pine (*Pinus pinea* L.) in Almadén (Central Spain) / J.I. Barquero, S. Rojas, J.M. Esbri, E.M. García-Noguero P. Higueras // Environmental Science and Pollution Research. – 2017. – V. 24. – P. 3129–3137.
40. Mercury uptake into poplar leaves / M. Assad, J. Parelle, D. Cazaux, F. Gimbert, M. Chalot, F. Tatin-Froux // Chemosphere. – 2016. – № 146. – P. 1–7.

Поступила 22.02.2020 г.

Информация об авторах

Журкова И.С., младший научный сотрудник Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН.

UDC 550.47:571.14

MERCURY MIGRATION IN POST-FIRE CONDITIONS

Inna S. Zhurkova,
zhurkova@igm.nsc.ru

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

The relevance of the research is caused by the need to assess mercury removal during forest fires. Forest fires are a catalyst for mercury migration, contributing to its active entry into the atmosphere. Mercury compounds are redistributed within the conflagration or carried over long distances, depending on the type of fire.

The main aim of the research is to assess mercury supertoxicant movement in pyrogenic conditions and the extent of its impact on plant components and the environment.

Objects: territory of the Karakansky boron, located in the Ordinsky district of the Novosibirsk region, where there was a mixed-type fire combining ground fire and general fire.

Methods. Soil samples were taken with a steel ring (height 50 mm, diameter 84 mm) used in ecogegeochemical studies. Sampling of bark, branches, needles was conducted by hand. Sample preparation was carried out according to the scheme «grinding–quartering–weighing». Mercury was determined by the atomic absorption method of «cold steam» using amalgamation on a gold sorbent.

Results. The author has compared the physicochemical characteristics of the samples taken from background and burnt areas and evaluated mercury content on background and burnt surfaces. It is established that mercury content is lower on the burnt areas, and over time it decreases both on the background and on the burnt surfaces. Mercury distribution in the system «bark–branches–needles» for samples taken from background areas, was studied. The lowest mercury content is determined in needles samples. The degree of mercury absorption by plants from the soil was analyzed by the example of birch and aspen leaves, needles, Ivan tea, mosses, and lichens on the background and burnt surfaces. Moss on the background (0,75) and burnt (1,0) surfaces has the highest absorption coefficient.

Key words:

Mercury, post-fire changes, forest fires, migration, atmospheric pollution.

The work was performed within the framework of the state assignment No. 0330-216-0011 and with the financial support of the RFB grant in the framework of the scientific project No. 18-35-00408 mol_a (analytical studies were conducted in the Center for Multiple Element and Isotopic Analyzes of the IGM SB RAS).

REFERENCES

1. Schmuck G., San-Miguel-Ayanz J., Camia A., Durrant T.H., Boca R., Liberta G. Forest fires in Europe Middle East and North Africa. *Reference Report by the Joint Research Center of the European Commission*, 2012. 118 p.
2. Kanga S., Tripathi G., Singh S.K. Forest fire hazards vulnerability and risk assessment in Bhajji forest range of Himachal Pradesh (India). *Journal of Remote Sensing & GIS*, 2017, vol. 8, no. 1, pp. 1–16.
3. Valderrama L., Contreras-Reyes J., Carrasco R. Ecological impact of forest fires and subsequent restoration in Chile. *Resources*, 2018, vol. 7, no. 2, pp. 26–36.
4. Malevsky-Malevich S.P., Molkentin E.K., Nadezhdin E.D. Analysis of changes in the fire hazard situation in the forests of Russia in the XX–XXI centuries. *Meteorology and hydrology*, 2007, no. 3, pp. 14–24. In Rus.
5. Ponomarev E.I., Kharuk V.N., Yakimov N.D. Results of satellite monitoring of wildfires of Siberia. *Siberian Forest Journal*, 2017, no. 5, pp. 25–36. In Rus.
6. Furyaev V.V. Conditions for the occurrence and spread of fires in forest areas of the Krasnoyarsk Territory. *Coniferous boreal zone*, 2017, vol. 35, no. 1–2, pp. 66–74. In Rus.
7. Shcherbov B. L., Lazareva E. V., Zhurkova I. S. *Lesnye pozhary i ikh posledstviya* [Forest fires and their consequence]. Novosibirsk, GEO Publ., 2015. 154 p.
8. Conde T. M., Higuchi N., Lima J.N.A. Illegal selective logging and forest fires in the Northern Brazilian Amazon. *Forests*, 2019, vol. 10, no. 1, pp. 61–83.
9. Smith J.M., Van Ness H.C., Abbott M., Swihart M. *Introduction to chemical engineering thermodynamics*. USA, McGraw-Hill Education, 2018. 768 p.
10. Markizova N.F., Preobrazhenskaya T.N. *Toksichnye komponenty pozharov* [Toxic components of fires]. St-petersburg, FOLIANT Publ., 2008. 208 p.
11. Lamelas-Gracia A.L., Garcia-Martin M.T., Riva-Fernandez A., Escribano-Bernal J.F. Using low-density discrete Airborne Laser Scanning data to assess the potential carbon dioxide emission in case of a fire event in a Mediterranean pine forest Montealegre-Gracia. *GIScience & Remote Sensing*, 2017, vol. 54, no. 5, pp. 721–740.
12. Dvornik A.A., Dvornik A.M. Radiation hazard of combustion products of combustible components of forest phytocenose. *Ecological bulletin*, 2015, no. 1, pp. 31–36. In Rus.
13. Zhurkova I.S., Shcherbov B.L. Migration of chemical elements in forest ground fire (Altai Territory). *News of the Irkutsk State University. Series: Earth Sciences*, 2016, vol. 16, pp. 30–41. In Rus.
14. Wright H.E., Heinselman M.L. The ecological role of fire in natural conifer forests of western and northern North America. *Fire Ecology*, 2014, vol. 10, no. 3, pp. 4–13.
15. Geraskin S.A., Dikarev V.G., Udalova A.A., Dikareva N.S. Effect of the combined effect of ionizing radiation and heavy metal salts on the frequency of chromosomal aberrations in spring barley leaf meristem. *Genetics*, 1996, vol. 32, no. 2, pp. 279–288. In Rus.
16. Kabata-Pendias A., Pendias H. *Mikroelementy v pochvakh i rasteniyakh* [Trace elements in soils and plant]. Moscow, Mir Publ., 1989. 439 p.
17. Alekseenko V.A. *Geokhimicheskie metody poiskov mestorozhdeniy poleznykh iskopаемых* [Geochemical methods of prospecting mineral deposits]. Moscow, Logo Publ., 2005. 354 p.
18. Perelman A.I., Kasimov N.S. *Geokhimiya landshafta* [Landscape geochemistry]. Moscow, Astre Publ., 2000. 768 p.
19. Rehman K., Fatima F., Waheed I., Akash M. S. Prevalence of exposure of heavy metals and their impact on health consequences. *Journal of cellular biochemistry*, 2018, vol. 11, no. 91, pp. 157–184.
20. Dadar G., Mutter M., Aaseth J. The toxicology of mercury: Current research and emerging trends. Bjorklund. *Environmental research*, 2017, vol. 159, pp. 545–554.

21. Lomonosov I.S., Grebenschikova V.I., Sklyarova O.A. Toxic (mercury, beryllium) and biogenic (selenium, fluorine) elements in aquatic ecosystems of the Baikal natural territory. *Water resources*, 2011, vol. 38, no. 2, pp. 193–204. In Rus.
22. Hightower J. Methyl mercury reference dose: response to Schoen. *Environmental Health Perspectives*, 2004, vol. 112, no. 6, pp. 337–338.
23. Subir M., Ariya P.A., Dastoor A.P. A review of the sources of uncertainties in atmospheric mercury modeling II. Mercury surface and heterogeneous chemistry – a missing link. *Atmospheric Environment*, 2012, vol. 46, pp. 1–10.
24. Agnan Y., Le Dantec T., Moore C.W., Edwards G.C., Obrist D. New constraints on terrestrial surface–atmosphere fluxes of gaseous elemental mercury using a global database. *Environmental Science Technology*, 2016, vol. 50, pp. 507–524.
25. Huang X., Li M., Friedli H.R., Song Y., Chang D., Zhu L. Mercury emissions from biomass burning in China. *Environmental Science Technology*, 2011, vol. 45, no. 21, pp. 9442–9448.
26. Friedl H.R., Radke L.F., Lu J.Y. Mercury in smoke from biomass fires. *Geophysical research letters*, 2001, vol. 28, no. 17, pp. 3223–3226.
27. *Krasnaya kniga Rossiyskoy Federatsii (Rasteniya i griby)* [Red Book of the Russian Federation (Plants and Mushrooms)]. Eds. Yu.P. Trutnev, R.R. Gizatulin, O.L. Mitvol. Moscow, KMK Publ., 2008. 885 p.
28. Grickevich O.V., Ushakova E.O. Development of the recreational potential of the territory on the example of Karakansky pine forest, Orda district, Novosibirsk region. *Interexpo Geo-Siberia*, 2015, vol. 3, no. 1, pp. 46–51. In Rus.
29. Zhurkova I.S., Shcherbov B.L., Budashkina V.V. Post-pyrolytic elemental composition of soil and plant cover in a pine forest (Novosibirsk region). *Bulletin of the Voronezh University. Series: Geography. Geoecology*, 2018, no. 3, pp. 44–49. In Rus.
30. *GOST 17.4.4.02.2017 Pochvy. Metody otbora i podgotovki prob dlya khimicheskogo, bakteriologicheskogo, gelmintologicheskogo analiza* [SS 17.4.4.02.2017 Soils. Methods of sample selection and preparation for chemical bacterial and helminthological analysis]. Moscow, Standardinform Publ., 2018. 21 p.
31. *GOST 56157-2014 Pochva. Metodiki, metody analiza sostava i svyazi prob pochvy. Obshchie trebovaniya k razrabotke* [SS 56157-2014 Soil. Methods and techniques of composition and features of soil samples. General requirements to development]. Moscow, Standardinform Publ., 2015. 10 p.
32. Pustovalov L.V., Sokolova E.I. Metody opredeleniya pH i Eh v osadochnykh porodakh [Methods for determining pH and Eh in sedimentary rocks]. *Metody izucheniya osadochnykh porod*, 1957, vol. 2, pp. 116–127.
33. Arinushkina E.V. *Rukovodstvo po khimicheskemu analizu pochv* [Manual on chemical analysis of soil]. Moscow, Moscow University Press, 1961. 488 p.
34. Lin C.J., Pehkonen S.O. The chemistry of atmospheric mercury: a review. *Atmospheric environment*, 1999, vol. 33, no. 13, pp. 2067–2079.
35. Grigal D.F. Mercury sequestration in forests and peatlands. *Journal of environmental quality*, 2003, vol. 32, no. 2, pp. 393–405.
36. Biswas A., Blum J.D., Klaue B., Keeler G.J. Release of mercury from Rocky Mountain forest fires. *Global Biogeochemical Cycles*, 2007, vol. 21, no. 1, pp. 1–13.
37. Campos I., Vale C., Abrantes N., Keizer J.J., Pereira P. Effects of wildfire on mercury mobilisation in eucalypt and pine forests. *Catena*, 2015, vol. 131, pp. 149–159.
38. Arefeva A.S., Barygina V.V., Zacepina O.V. Current views on the effects of mercury compounds at the cellular and systemic levels (review). *Human ecology*, 2010, no. 8, pp. 35–41. In Rus.
39. Barquero J.I., Rojas S., Esbri J.M., García-Noguero E.M. Higuera P. Factors influencing mercury uptake by leaves of stone pine (*Pinus pinea L.*) in Almaden (Central Spain). *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, vol. 24, pp. 3129–3137.
40. Assad M., Parelle J., Cazaux D., Gimbert F., Chalot M., Tatin-Froux F. Mercury uptake into poplar leaves. *Chemosphere*, 2016, no. 146, pp. 1–7.

Received: 22 February 2020.

Information about the authors

Inna S. Zhurkova, junior researcher, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS.

УДК 621.18

ПОДХОДЫ К ЧИСЛЕННОМУ ИССЛЕДОВАНИЮ ТОПОЧНЫХ КАМЕР С ЦИРКУЛИРУЮЩИМ КИПЯЩИМ СЛОЕМ

Гиль Андрей Владимирович¹,
angil@tpu.ru

Заворин Александр Сергеевич¹,
kotel@tpu.ru

Кокшарев Олег Максимович¹,
omk2@tpu.ru

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

Актуальность исследования. В современных научных исследованиях вычислительный эксперимент является одним из наиболее продуктивных средств изучения комплекса задач, в которых результат зависит от одновременного проявления аэродинамики, теплообмена и горения. Численные расчеты при этом позволяют не только правильно интерпретировать физические явления, фиксируемые на экспериментальных установках, но и дополнить существенно более дорогостоящий и трудоемкий физический или натурный эксперимент компьютерной симуляцией. В связи с этим актуальность проведения исследований, направленных на совершенствование методов численного анализа топочных процессов в котлах с циркулирующим кипящим слоем на основе компьютерного математического моделирования, является весьма высокой для обоснования основных проектно-конструкторских и технологических решений, принимаемых при создании котлов с циркулирующим кипящим слоем. Помимо практической значимости, такого рода исследование обладает высокой научной составляющей, поскольку в основе поставленной задачи лежат фундаментальные закономерности физико-химических процессов в циркулирующем кипящем слое.

Цель: определение подходов и применимости численных алгоритмов с удовлетворительным уровнем детализации и сходимости для моделирования топочных процессов в котлах с циркулирующим кипящим слоем.

Объекты: топка с циркулирующим кипящим слоем, оборудованная двумя вводами подачи топлива и инертных частиц, на тыльной стене и десятью трубопроводами вторичного дутья на фронтовой стене в два яруса.

Методы: математическое моделирование физико-химических процессов в топочной камере с циркулирующим кипящим слоем на основе Эйлера-Эйлера и Эйлера-Лагранжа подходит с использованием RANS моделей. Записаны дифференциальные уравнения для сохранения массы, импульса, энергии и переноса частиц. Численное исследование проведено с использованием пакета прикладных программ Ansys Fluent v.12.1.

Результаты. Определены начальные и граничные условия для численного моделирования процессов в топочной камере котельного агрегата с циркулирующим кипящим слоем при использовании Эйлера-Эйлера и Эйлера-Лагранжа подходит.

Ключевые слова:

Котел с циркулирующим кипящим слоем, математическое моделирование, метод Эйлера-Эйлера, метод Эйлера-Лагранжа, физико-химические процессы.

Введение

Начиная с последней трети прошлого века развитие новых технологий сжигания твердого топлива оказалось сопряжено с тенденцией повышения экологических параметров и обеспечения маневренности топливосжигающих агрегатов при постоянном ухудшении качества твердых топлив.

Именно поэтому в 1970–1980 гг. усилиями нескольких инженерных компаний получила практическое применение перспективная технология циркулирующего кипящего слоя (ЦКС), которая и по настоящее время играет важную роль в развитии технологий для генерации энергии с минимальными выбросами вредных веществ.

Данный способ представляется перспективным, поскольку успешно позволяет решать задачи повышения эффективности выгорания низкокачественного, высокозольного и влажного топлива [1], снизить выбросы золовых частиц, окислов азота и серы, а также повысить возможность последующего использования золошлаковых отходов.

На современном этапе мировой опыт эксплуатации котлов с ЦКС очень богат и постоянно совершенствуется. За годы использования ЦКС в энергетике удалось серьезно уменьшить металлоемкость, усовершенствовать различные конструктивные решения, повысить уровень надежности и экономичности.

Однако в данный момент как в России, так и в зарубежных странах возможности численного прогнозирования процессов в слое и образования тех или иных веществ в результате сжигания в ЦКС все еще далеки от завершения. Например, в России представлен только единственный образец котла с ЦКС (Новочеркасская ГРЭС-9), а газодинамические процессы в топочных камерах с ЦКС остаются недостаточно глубоко изученными, что отчасти обусловлено и отсутствием единой нормативной методики инженерных расчетов. В совокупности названное отставание сдерживает развитие отечественного котлостроения и теплоэнергетики в целом. Поэтому одно из направлений Энергетической стратегии России до 2030 г. [2] сконцентрировано на создании отечественных котлов

с ЦКС, которые обладают преимуществами перед наиболее распространенным факельным сжиганием в пылеугольных котлах, конструкции которых спроектированы в то время, когда не было «жестких» экологических ограничений.

Из-за нехватки опыта эксплуатации и проектирования котлов с ЦКС проведение натурных экспериментов затруднено, а выполнение исследований на лабораторных установках позволяет изучить и оценить влияние лишь одного или нескольких параметров, а не совокупность процессов в целом.

Поэтому на современном этапе исследований в технических науках вычислительный эксперимент является одним из наиболее продуктивных средств изучения комплекса задач, в которых результат зависит от одновременного проявления аэродинамики, теплообмена и горения. Численные расчеты при этом позволяют не только правильно интерпретировать физические явления, фиксируемые на экспериментальных установках, но иередко и дополнить существенно более дорогостоящий и трудоемкий физический или натурный эксперимент компьютерной симуляцией. Соответственно актуальность проведения

исследований, направленных на совершенствование методов численного анализа топочных процессов в котлах с ЦКС на основе компьютерного математического моделирования, является весьма высокой.

Проблематика. Практика и методология исследования феномена

Типичная схема котла ЦКС представлена на рис. 1 [3]. Слой из твердого материала ожигается первичным воздухом, который поступает в топку через нижнюю решетку. Псевдоожиженный слой, как правило, представляет собой смесь золы, недогоревшего углеродистого остатка, инертного вещества (обычно песок) и возможно добавление сорбента. Подача топлива и других твердых компонентов осуществляется в нижней части топки. Вторичный воздух вводится над точками подачи топлива в различных местах и на различных высотах для выполнения поэтапного сжигания. Температура в топке ниже температуры агломерации твердых веществ, как правило, в диапазоне 750–950 °C, т. е. значительно ниже, чем при сжигании пылеугольного топлива факельным способом или при сжигании на колосниковой решетке.

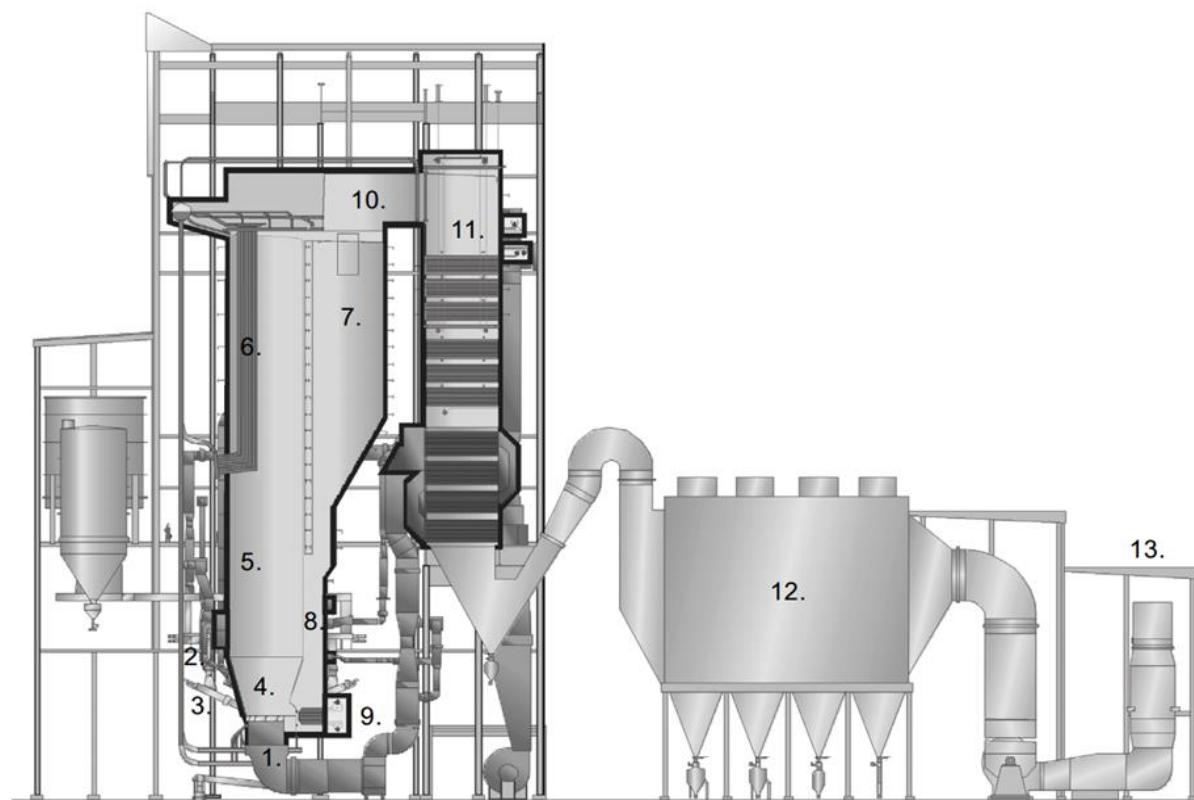


Рис. 1. Типичная компоновка котла с циркулирующим кипящим слоем (компания Foster Wheeler Energia Oy): 1 – первичный воздух, 2 – вторичный воздух, 3 – топливо, известняк, добавочное питание, 4 – нижняя часть топки с оgneупорной футеровкой, 5 – мембранные экраны топки, 6 – внутренние поверхности нагрева, 7 – сепаратор (циклон), 8 – система возврата частиц, 9 – внешний кипящий теплообменник, 10 – горизонтальный газоход, 11 – опускной газоход с теплообменниками, 12 – электрофильтр, 13 – дымовая труба

Fig. 1. Typical arrangement of circulating fluidized bed boiler (Foster Wheeler Energia Oy): 1 – primary air, 2 – secondary air, 3 – fuel, limestone, additional feed, 4 – lower part of the furnace with refractory lining, 5 – membrane screens of the furnace, 6 – internal heating surfaces, 7 – separator (cyclone), 8 – particle return system, 9 – external fluidized heat exchanger, 10 – horizontal flue, 11 – down flue with heat exchangers, 12 – electrofilter, 13 – chimney

Обозначенные выше исследования непосредственно связаны с численным моделированием статических и динамических процессов на модульно-структурной основе, которые отражают эффективность работы проектируемого котельного агрегата. Такие модели должны основываться на детальных механизмах реакций и помимо гомогенных и гетерогенных реакций включать в себя также и катализитические реакции, затрагивая многообразие других явлений, в реальности протекающих и описывающих котельную установку. В настоящее время многие ученые уже подтвердили тот факт, что развитие микроскопических подходов в CFD моделировании (Computational Fluid Dynamics – вычислительная гидрогазодинамика) страдает от нехватки и трудности получения соответствующих экспериментальных данных от объектов промышленной эксплуатации ЦКС, а также от длительного времени расчета. Поэтому одно из направлений, которое сложилось из-за больших габаритных размеров установок ЦКС в совокупности со сложной системой уравнений, требует моделей, которые будут позволять разрешать данное явление как можно более ресурсоэффективной и с достаточной точностью на грубой расчетной сетке с применением эмпирических или полуэмпирических выражений для анализа процесса, увеличенным временным шагом или в стационарных условиях (макроскопическое моделирование). Как видно, сочетание моделей CFD с полным описанием химических процессов является слишком сложной задачей с точки зрения вычислений, и поэтому ведется разработка упрощенных подходов. По мнению различных исследователей, в ближайшем будущем процессы в ЦКС в промышленном масштабе не представляется возможным смоделировать с полным набором уравнений, описывающих химические процессы, тепломассоперенос и гранулометрический состав частиц [4–9]. Тем не менее учеными [10, 11] проводятся исследования влияния конструкций циклонных установок на гидродинамику потока в котле с ЦКС в трехмерной (3D) постановке задачи с полным циклом протекания внутренних процессов. Из анализа расположения циклонов было установлено, что распределение потока частиц протекает более равномерно при осесимметричном расположении, чем при расположении относительно центральной оси. Исходя из этого, моделирование полного цикла является перспективным способом для обеспечения качественных расчетов на этапе проектирования.

В настоящее время используются два основных подхода для моделирования газовых потоков с наличием твердых частиц, а именно Эйлеров–Лагранжев (ЭЛ) и Эйлеров–Эйлеров (ЭЭ) подход. ЭЛ подход, который рассматривает частицы индивидуально, часто применяется для описания систем методом траекторий [12]. С помощью этого метода вычисляются траектории отдельных частиц или частиц, представляющих большое число отдельных субчастиц, пренебрегая их столкновениями. Для более высоких концентраций твердых частиц, в которых существуют столкновения между частицами, доминируют перенос

и дисперсия импульса. Для этих явлений может быть использован метод дискретного моделирования частиц (DPM – Discrete Phase Model) [13]. При использовании метода DPM вычисляется траектория каждой отдельной частицы, предсказываются столкновения между отдельными частицами, и учитывается их влияние на траектории друг друга. Этот метод требует много вычислительных ресурсов и потому ограничен на текущий момент числом частиц 10^6 . По этой причине DPM пока нельзя использовать для моделирования крупномасштабных систем ЦКС, которые насчитывают в себе более чем 10^{12} частиц.

Модель промышленного образца котла с ЦКС была смоделирована в [14] с помощью модели DDPM (DDPM – Dense Discrete Phase Model) для изучения процесса горения угля и гидродинамики частиц. Исследования процесса горения угля в ЦКС при различных концентрациях O₂ с использованием модели DDPM, а также влияние гранулометрического состава частиц и концентрации O₂ на структуру дисперсного потока и характеристики горения были рассмотрены в [15].

Наиболее широко используется ЭЭ подход для моделирования котлов с ЦКС. В методе ЭЭ (двухжидкостной модели) газовая и твердая фаза рассматриваются как два полностью взаимопроникающих континуума. Используемые уравнения являются обобщением уравнений Навье–Стокса для взаимодействующих сред [16]. Частицы внутри твердой фазы рассматриваются с идентичными и определенными диаметрами и плотностью. Для моделирования распределения частиц по размерам необходимо использовать несколько псевдожидкостей для моделирования твердой фазы, каждая из которых представляет один класс частиц [17, 18].

В работах [19] и [20] процесс смешения описывается моделью 1,5D. Однако детально рассматривают химические процессы окисления метана, этана, HCN и NH₃ так же, как и взаимодействия углеводородного сырья (CH₄, HCCO), компонентов азота (NO, NH₃, N₂) и H₂.

Среди различных попыток сформировать поток частиц кинетическая теория гранулированных потоков (KTGF – Kinetic Theory of Granular Flow) нашла свое широчайшее применение. Она является дополнением к классической кинетической теории газов, описанной в [21], и применяется к плотным потокам частиц, описывая их столкновения [16]. Случайное распределение и упругие столкновения твердых частиц делают кинетическую теорию идеально подходящей для описания зернистых течений.

Столкновения частиц и воздействия на твердые фазы не единственные проблемы моделей «газ–твердая частица». Другой проблемой моделирования является использование соответствующих корреляций сопротивления для описания обмена импульсами между двумя фазами. В [22] выявили, что воздействие на твердые частицы, предсказанное с помощью модели KGTF, не оказывает существенного влияния в общую структуру потока, в то время как влияние кла-

стеризации частиц и, следовательно, трение имеет доминирующую роль в результатах моделирования.

Межфазный перенос импульса является одним из наиболее значимых членов в уравнениях импульса газа и твердой фазы. Этот обмен импульсом представлен силой сопротивления. Сила сопротивления на одной сферической частице хорошо коррелирует для широкого диапазона чисел Рейнольдса [23]. Однако эти корреляции теряют свою актуальность в твердо-газовой суспензии, поскольку на силу сопротивления одной частицы влияет наличие других частиц [24].

Для охвата широкого диапазона концентраций твердых веществ при моделировании CFD довольно часто используется сочетание корреляций С. Эргуна [25] и Вена и Ю [26]. Эти корреляции были первоначально разработаны на основе экспериментов с гомогенными системами. Однако распределение в псевдоожиженных слоях гетерогенно.

CFD моделирование с этими или подобными корреляциями сопротивления, как правило, хорошо согласуется с экспериментальными результатами для верхних разреженных областей подъемного газохода ЦКС. Однако чаще всего моделирование не позволяет описать нижнюю часть подъемного газохода, где в большинстве экспериментов наблюдается область с высокими концентрациями твердых частиц. Обычно при моделировании специально снижают концентрацию твердых веществ в данной области. Например, в [27] описывается, что корреляции сопротивления, полученные из уравнения Эргуна, вызвали быстрый перенос твердых тел и в результате моделируемый поток стал довольно разбавленным в целом. Причиной такого поведения является монотонное увеличение сопротивления с возрастанием концентрации твердых тел, что контрастирует с экспериментально наблюдаемым уменьшением сопротивления за счет образования кластеров.

Моделирование топочных камер с ЦКС по методу решеточных уравнений Больцмана (Lattice Boltzmann Method), в работе [28] показано, что расположение частиц сильно влияет на сопротивление суспензий, поэтому при расчете обмена импульсами необходимо учитывать структуру суспензий. Метод имеет преимущества над другими методами (например, finite element method) по возможности моделирования многофазных потоков и моделирования в пористых средах, а также по меньшей трудоемкости распараллеливания. Немаловажно и то, что вычислительный алгоритм состоит только из простейших арифметических операций. Данный метод – один из новых, поскольку основанные на нем первые коммерческие продукты начали появляться около 2010 г.

Некоторые недавние исследования учитывают локальную неоднородность потока «газ–твердая частица» в ЦКС для расчета силы сопротивления. Первые подходы к учету структуры потока на подсеточном масштабе были сделаны в [29] и [30]. Последние два коллектива вычисляли сопротивление на основе теории мульти尺度ного минимума потенциальной энергии (EMMS – Energy-Minimization Multi-Scale) [31].

В статье [32] уделяется внимание модели стационарного процесса в котле с ЦКС на основе гидродинамики, теплообмена и горения. Эта модель прогнозирует температуру дымовых газов, концентрацию компонентов (O_2 , H_2O , CO , CO_2 и SO_2) и распределение концентрации продуктов сгорания как в осевых, так и радиальных местах вдоль топки, включая нижнюю и верхнюю части. Модель была верифицирована на основе экспериментальных данных, полученных в котле мощностью 35 т/ч с низким коэффициентом циркуляции.

А. Гунгор [33] представил свои исследования по разработке динамической двумерной модели с учетом гидродинамического поведения ЦКС. Моделирование производится на подъемной трубе, имитирующей ЦКС, с анализом в двух зонах: нижняя зона в режиме турбулентной флюидизации моделируется как двухфазный поток, который подразделяется на пузырьковую твердую фазу (без включения твердых частиц) и твердую эмульсионную фазу (с включениями твердых частиц). Моделирование учитывает осевое и радиальное распределение пустотности, скорости и перепада давления для газа и твердой фазы, а также объем твердой фракции и распределения частиц для твердой фазы. Результаты моделирования сравниваются и подтверждаются на основании экспериментальных данных, приведенных в литературе.

Х. Накамура в своем исследовании [34] представил результаты моделирования поведения частицы во вращающемся псевдоожиженном слое. Предложенная численная модель была основана на модели, объединяющей DEM (метод дискретных элементов) и CFD. Движение жидкости вычислялось двумя измерениями путем решения локальных усредненных базовых уравнений. В предложенной модели были одновременно проведены расчеты движения жидкости по методу CFD и движения частиц по методу DEM.

А. Хадаванд [35] описал математическую модель сжигания в ЦКС на основе уравнений сохранения массы и энергии. Используя эти зависимости, на основе подпространственного метода получена динамическая модель фазового пространства, ориентированная на температуру слоя. Температура слоя, которая влияет на общую эффективность котла и уровень выбросов загрязняющих веществ, является одним из наиболее значимых параметров в работе этого типа систем. Из-за наличия динамической и параметрической неопределенности в модели был применен надежный алгоритм управления на основе линейных матричных неравенств (ЛМН) для того, чтобы контролировать температуру слоя с использованием исходных данных, например величины расхода угля и скорости псевдоожижения.

Л. Конг и П. Ходжсон [36] работали над улучшением понимания и поиском надежной и простой модели теплопередачи. Поток газа и теплоперенос между псевдоожиженными слоями и поверхностями погруженного объекта численно моделируются на основе парной модели «частица–слой» и «пористая среда». Парная модель позволяет моделировать течения газа и теплообмен вблизи поверхности погруженного объ-

екта в псевдоожженном слое и успешно применяется при расчете динамических характеристик газовой фазы, изменения температуры частиц и радиационных параметров групп частиц.

Ж. Бастос в своем исследовании [37] изучал радиальные профили скорости частиц, которые были разбиты на семь осевых уровней в подъемной трубе высоконапорного циркулирующего кипящего слоя (HFCFB), используя двухфазную 3D модель вычислительной гидродинамики (CFD).

Д. Корнелиссен [38] в своем исследовании применял многожидкостную модель Эйлера в модели CFD с расширением гранулированного потока для моделирования жидкотвердого циркулирующего кипящего слоя. Численное моделирование оценивается качественно по экспериментальным данным из литературы и количественно по сравнению с новыми экспериментальными данными. Исследован эффект размежа сетки, временного шага и критериев сходимости.

На примере котла с ЦКС, установленного на ТЭЦ Лагижка в Польше, предлагаются два подхода решения задачи моделирования – ЭЭ и ЭЛ, с расширенным методом мультифазной частицы в ячейке (MR-PIC), а также их сравнение [39]. Модели, основанные на кинетическом представлении потока частиц, описывают взаимодействие между частицами [40]. Лучистый теплообмен моделировался с помощью метода дискретных ординат. Излучающие свойства CO₂ и H₂O были рассчитаны с использованием модели взвешенной суммы серых газов (WSGGM – weighted sum of gray gases model) с использованием различных модельных подходов, в том числе модели, предложенной М. Бордбаром в [41].

Метод мультифазной частицы в ячейке, или гибридный метод Эйлера–Лагранжа, использует М. Вэнг в [42] для моделирования котла с ЦКС мощностью 250 МВт. Данная модель предполагает мономентальное испарение влаги и выход летучих топлива. В состав реакций данной модели входят газификация и горение угля (углерода), реакция конверсии окиси углерода в двуокись углерода, сжигание нелетучих гидрокарбонатов и горение окиси углерода. Также представлены профили температуры, а применяемые модели теплопередачи не описаны.

В своей работе [43] Н. Жанг неоднократно показывает применение метода EMMS для расчета процесса горения в котле блока мощностью 150 МВт. Система реакций была упрощена горением углерода, а тепловой эффект испарения влаги и выхода летучих считался как средний теплоотвод, что повлияло на нижнюю часть топки.

В настоящее время опубликованы только несколько полуэмпирических моделей, которые позволяют решать ЦКС в трех измерениях. Одна из таких моделей разработана Т. Хуппаненом и позднее доработана К. Миоханеном в [44] (далее модель CFB3D). Другие аналогичные комплексные 3D-модели были представлены Р. Вишневским и Л. Ратшоу в [45], а также Д. Палларесом в [46]. В этих моделях моделирование гидрогазодинамики упрощается, но описание химии горения представлено детальным образом вместе с

различными неоднородными и однородными реакциями газификации и горения. Решение уравнения энергии, как правило, использует понятия, связанные с тепловым эффектом реакции, конвекцией газа и твердых частиц, теплопередачей к стенам и диффузионным перемешиванием в турбулентном потоке.

Палларес реализовал простую модель радиационного теплообмена в модели полуэмпирического процесса [46]. Лучистый теплообмен моделировался как серое излучение, в то время как перенос излучения между ячейками ограничивался тремя ортогональными направлениями граней ячейки для каждой шестигранной ячейки расчета. Влиянием излучающих газов пренебрегли. Модель была применена для моделирования промышленного образца котла с ЦКС мощностью 12 МВт, для которого подобных исходных данных не указано. Также сообщается, что в области с низкой концентрацией твердых частиц, таких как верхняя часть топки, количество тепла, выделенное в среду, существенно зависит от близлежащих областей [46]. Это доказывает потребность в более сложных излучающих моделях, которые учитывают эффект дальнего действия в данных видах систем.

Завершая вышеизложенный анализ, можно констатировать, что высокая трудоемкость натурных экспериментов, а в российской реальности иногда даже их недоступность, в сочетании с отсутствием обобщенных расчетных методик оставляет для разработки новых эффективных котлов с ЦКС путь использования надежного программного продукта для многопараметрического анализа конструктивных схем и соответствующих технологических решений.

Метод Эйлера–Эйлера

Как уже было подчеркнуто, необходимость решения большого количества взаимосвязанных дифференциальных уравнений, описывающих физико-химические процессы в камерах горения котельных агрегатов, относит их математическое моделирование к весьма сложным вычислениям. Поэтому от инженеров, занятых конструкторскими задачами, требуется высокая фундаментальная подготовка не только в области теории горения, тепло- и массообмена, гидрогазодинамики, но и дифференциального исчисления и вычислительной математики. На практике при решении инженерных задач это зачастую становится ограничивающим фактором для широкого использования методов математического моделирования. Ситуация стала меняться к лучшему, когда в последней четверти двадцатого века появились компьютерные программные продукты, доступные широкому кругу исследователей (например, зарубежные ANSYS Fluent & CFX, отечественные FIRE 3D, σ-flou и др.).

В данном исследовании решение поставленных задач проведено с применением пакета прикладных программ Ansys v.12.1. Данный программный продукт непосредственно включает в себя расчетный модуль Fluent, позволяющий проводить численные исследования на основе встроенных или подключаемых математических моделей физических процессов.

Первым шагом в решении любой многофазной задачи является определение того, какой из методов обеспечивает общие рекомендации к определению соответствующих моделей для каждого режима и степени межфазной связи для потоков, включающих пузырьки, капли или частицы, и соответствующую модель для различных количеств связей. Многофазные модели ЭЭ представлены в Ansys Fluent следующими моделями: моделью объема жидкости (VOF), модель смеси (The Mixture Model), моделью Эйлера (The Eulerian Model) [47].

Из перечисленных многофазных моделей ЭЭ модель представляет наибольшую сложность, поскольку в ней решаются уравнения импульса и неразрывности для каждой из сред из большого количества N уравнений. Взаимодействие достигается через давление и коэффициенты межфазного обмена. Способ, которым эта связь достигается, зависит от типа участвующих фаз: зернистые (жидкость-твердое тело) потоки обрабатываются иначе, чем негранулярные (жидкость-жидкость). Основные свойства гранулированных потоков приняты исходя из применения кинетической теории. Передача импульса при межфазовом взаимодействии зависит от математического описания среды. Пользовательские функции Ansys Fluent позволяют настроить расчет импульсного обмена [47].

В многофазной модели Эйлера фазы могут быть газами, жидкостями или твердыми телами в разнообразном сочетании. Она подходит для расчетов многофазных систем при взаимодействии фаз, в частности, таких как псевдоожженные слои и суспензии частиц. Для каждой фазы используется Эйлеров подход, в отличие от ЭЛ подхода, который используется для дискретной фазовой модели. С многофазной моделью Эйлера количество вторичных фаз ограничено только требованиями к ресурсам вычислительной техники и требованиями сходимости. Можно смоделировать любое количество вторичных фаз при условии наличия достаточного объема памяти [47].

Как уже было отмечено, метод ЭЭ является одним из основных методов при моделировании котлов с ЦКС в научных исследованиях и промышленных масштабах. Для настоящего исследования в соответствии с рекомендациями также применена модель ЭЭ.

Сохранение массы, импульса и энергии записывается нижеследующими основными уравнениями.

Уравнение неразрывности для фазы q :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) = \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) + S_q,$$

где \vec{v}_q – скорость для фазы q ; \dot{m}_{pq} – перенос массы от фазы p до фазы q ; \dot{m}_{qp} – перенос массы от фазы q до фазы p . При этом источниковый член S_q в правой части уравнения обычно равен нулю, но источник массы для каждой фазы можно задать постоянным или определяемым пользователем.

Уравнение баланса импульса для фазы q :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q \vec{v}_q) =$$

$$= -\alpha_q \nabla p + \nabla \cdot \vec{\tau}_q + \alpha_q \rho_q \vec{v}_q + \sum_{p=1}^n \left(\vec{R}_{pq} + \dot{m}_{pq} \vec{v}_{pq} - \dot{m}_{qp} \vec{v}_{qp} \right) + \\ + \left(\vec{F}_q + \vec{F}_{lift,q} + \vec{F}_{vm,q} \right),$$

где $\vec{\tau}_q$ – тензор деформации напряжения фазы q .

$$\vec{\tau}_q = \alpha_q \mu_q \left(\nabla \vec{v}_q + \nabla \vec{v}_q^T \right) + \alpha_q \left(\lambda_q - \frac{2}{3} \mu_q \right) \nabla \vec{v}_q \vec{I},$$

где μ_q и λ_q – сдвиговая и объемная вязкость фазы q ; \vec{F}_q – сила внешнего тела; $\vec{F}_{lift,q}$ – подъемная сила; $\vec{F}_{vm,q}$ – виртуальная массовая сила; \vec{R}_{pq} – сила взаимодействия между фазами; p – давление, распределенное между фазами; \vec{v}_{pq} – межфазовая скорость.

В многофазной модели Эйлера сохранение энергии записывается для каждой фазы отдельным уравнением энталпий:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q h_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{u}_q h_q) = \alpha_q \frac{\partial p_q}{\partial t} + \vec{\tau}_q : \vec{u}_q + \\ + \nabla \cdot \vec{u}_q - \nabla \cdot \vec{q}_q + S_q + \sum_{p=1}^n \left(Q_{pq} + \dot{m}_{pq} h_{pq} - \dot{m}_{qp} h_{qp} \right),$$

где h_q – удельная энталпия q -й фазы; \vec{q}_q – тепловой поток; S_q – источниковый член уравнения, который включает источники энталпии (например, из-за химической реакции или излучения); Q_{pq} – интенсивность теплообмена между фазами q и p ; h_{pq} – межфазная энталпия.

Кварцевый песок используется в большинстве опытов при проведении моделирования процессов в ЦКС, так как он подобен золе топлива по плотности и полидисперсности. Диапазон средних размеров составляет 0,1–0,3 мм при истинной плотности около 2000–2500 кг/м³ [48].

При определении влияния массы слоя и скорости газа характерная для режимов ЦКС масса слоя зависит от первоначальной засыпки, составляющей обычно 0,4–1 м. Насыпная плотность и гранулометрия слоя определяют перепад давлений в модели топки от 4 до 15 кПа, а диапазон скоростей газа на уровне от 3 до 7 м/с [46].

Для моделирования процессов в котлах с ЦКС важен корректный подход к подаче вторичного воздуха, расход которого составляет 30–60 % от всего расхода воздуха. При любой схеме ввода вторичного воздуха его взаимодействие с продуктами сгорания с аэродинамической точки зрения можно классифицировать как систему струй, внедряющихся в сносящий поток. При этом система имеет ряд особенностей, которые отличают ее от классических и в известной степени хорошо изученных такого рода течений [41]:

- высокое содержание взвешенных частиц в газовом потоке (50–100 кг/м³ и более) на отметке ввода струй в топочный объем;
- изменение по высоте топки величины плотности и скорости сносящего потока;
- неравномерность полей плотности и скорости сносящего потока по сечению топки, соответ-

- ствующему плоскости ввода струй вторичного воздуха;
- организация процесса смешения, обеспечивающего догорание топливных частиц, вынесенных из плотного слоя, и доокисление продуктов химического недожога, образующегося в турбулентном слое при коэффициенте избытка первичного воздуха меньше единицы;
 - обеспечение наряду с процессами догорания топлива условий для снижения генерации вредных веществ, и прежде всего NO_x ;
 - наличие условий для влияния струй вторичного воздуха на турбулентный слой вплоть до возникновения переменных полей концентрации частиц и скоростей газа на участке, прилегающем снизу к плоскости смешения [45].

В качестве геометрической модели для исследования была выбрана модель, представленная на рис. 2: топка с ЦКС, оборудованная двумя вводами топливных и инертных частиц на тыльной стене и десятью соплами вторичного дутья на фронтовой стене в два яруса. Данный котельный агрегат рассчитан с учетом установки двух циклонов на выходе из топочной камеры. Предполагается, что объем частиц, улавливаемых циклоном и вернувшихся в топку, равняется 90 %. С учетом данного фактора вводится поправка на количество частиц, подаваемых в топку.

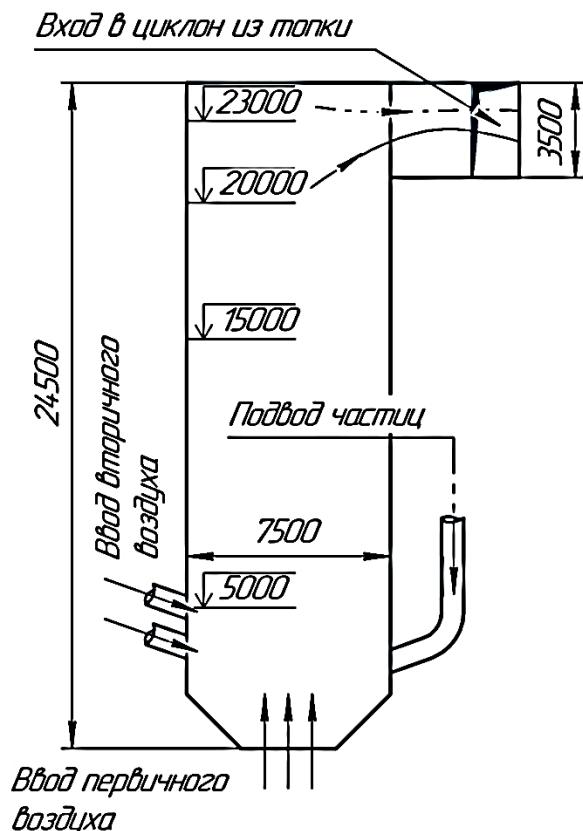


Рис. 2. Объект исследования
 Fig. 2. Object of research

Предполагается, что моделирование не является реактивным и представляет собой систему псевдоожижения холодного потока, поэтому условия работы в данном случае определяются температурой 300 К и давлением 1 атм.

В процессе моделирования используются две фазы, которые поступают в топку через описание граничных и начальных условий входа и взаимодействуют посредством обмена массой и импульсом.

Газовая фаза представляется первичной. В процессе моделирования учитывает граничные условия входа и выхода потоков. Песок – вторичная фаза. Представляет локальный объем псевдоожиженного слоя. При моделировании песок представляется зернистым с постоянным размером 385 мкм и плотностью 2650 кг/м³, принадлежа к группе частиц Гелдарт Б (Geldart B) [49–51].

В таблице приведен краткий список основных параметров, которые использовались при моделировании. Используемые параметры являются значениями, по умолчанию используемыми в Fluent, а также встречаются в работах других авторов [43–45] в качестве апробированных.

Таблица. Список используемых параметров с называнием моделей

Table. List of used parameters with model name

| Параметр/Parameter | Модель/Model |
|--|-------------------------------------|
| Вязкость твердой частицы Solid particle viscosity | Гидаспов Gidaspow |
| Насыпная вязкость твердой частицы Solid particle bulk viscosity | Лун и соавт. Lun et al. |
| Фрикционная вязкость Friction viscosity | Шеффер Sheffer |
| Давление твердой частицы Solid particle pressure | Лун и соавт. Lun et al. |
| Радиальная функция распределения Radial distribution function | Лун и соавт. Lun et al. |
| Закон трения (газ – твердая частица) Friction law (gas – solid particle) | Гидаспов Gidaspov |
| Закон трения (твердая частица – твердая частица) Friction law (solid particle – solid particle) | Сиамлал–О'Брайен Syamlal–O'Brien |

На рис. 3 представлен контурный график распределения частиц песка (кг/кг) по высоте топки. Наблюдаются повышенное содержание частиц в нижней части топки, поэтому принципиальным является результат взаимодействия частиц между собой, а также внутренняя циркуляция дисперсного материала. В средней части топки наблюдается пристенное опускное течение, интенсивность которого уменьшается с высотой. Низкая концентрация твердой фазы вверху топки, как показано в [48], соответствует течению двухфазной среды в режиме пневмотранспорта.

На рис. 4 отображены контурные графики скорости частиц песка, где наблюдается следующая зависимость – увеличение скорости от низа (циркулирующий слой) к верху (выход в циклоны). Средняя скорость по сечениям топочной камеры 7 м/с.

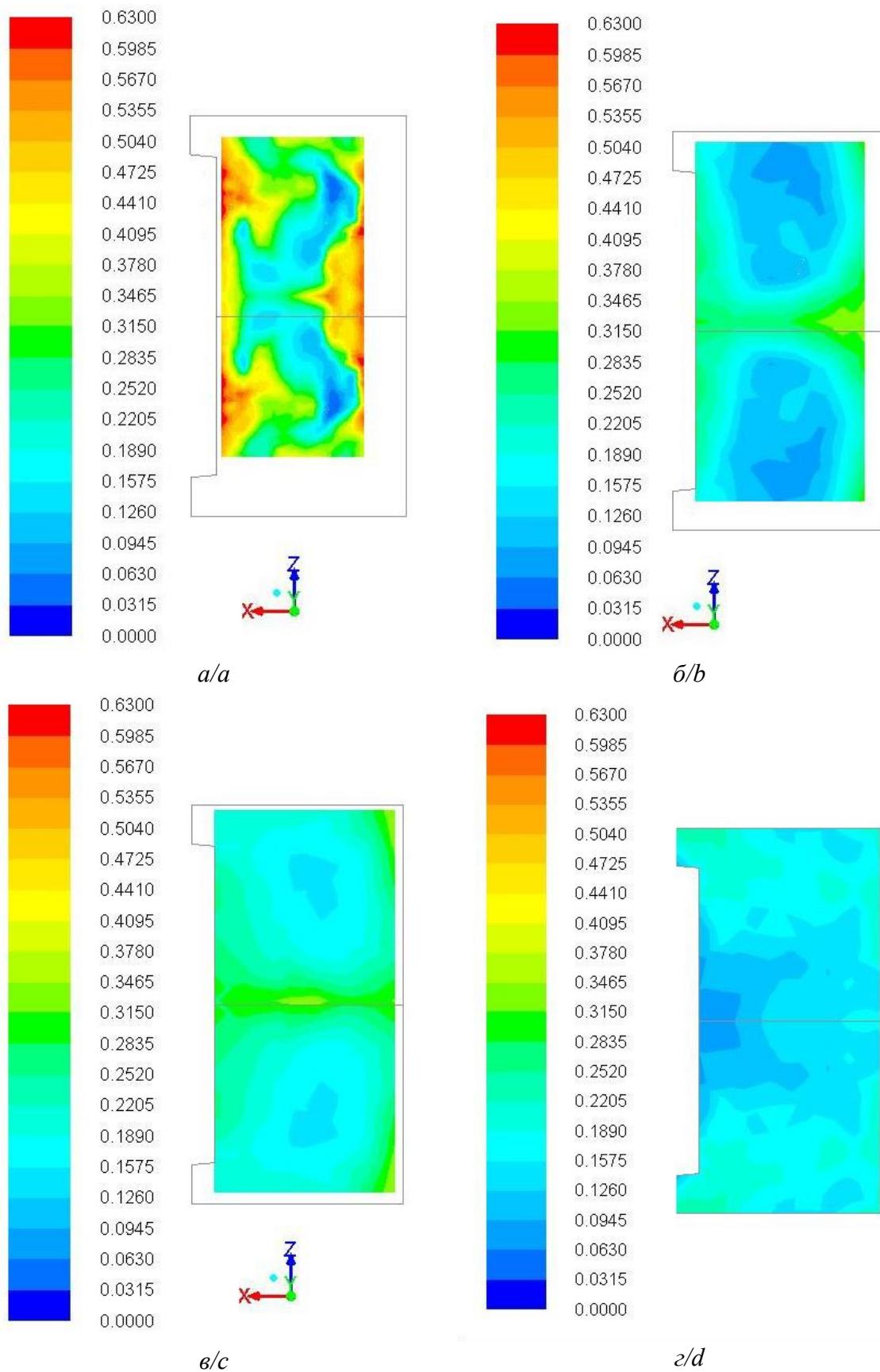


Рис. 3. Контурный график распределения частиц песка (кг/кг): *a–г* – распределение в горизонтальных плоскостях (5, 15, 20 и 23 метров по высоте топки соответственно)

Fig. 3. Contours of sand particles distribution (kg/kg): *a–d* – distribution in horizontal planes (5, 15, 20 and 23 meters in height of the furnace, respectively)

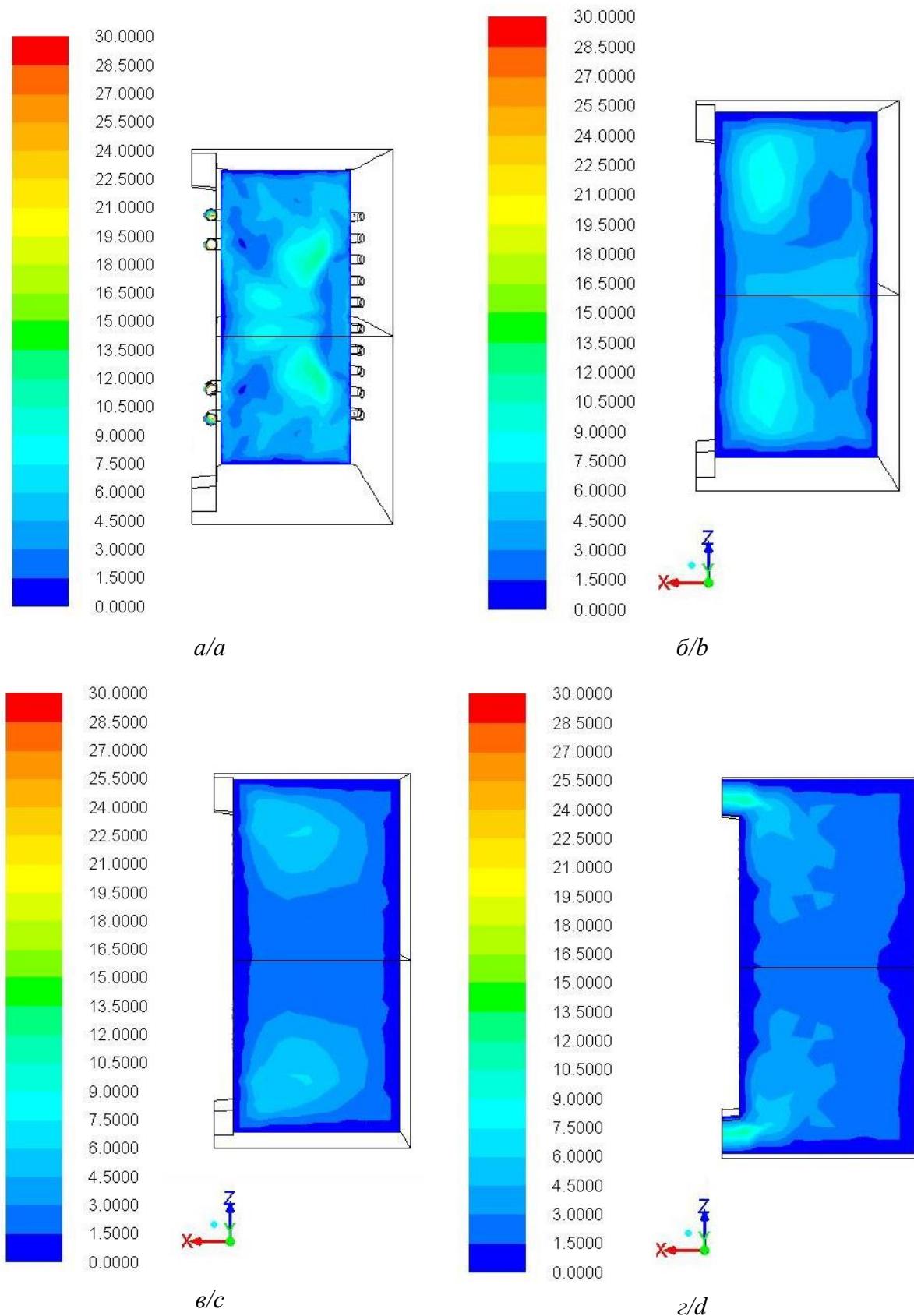


Рис. 4. Контурный график распределения скорости частиц песка по объему топки с циркулирующим кипящим слоем (м/с): а–г) распределение в горизонтальных плоскостях (5, 15, 20 и 23 метра по высоте топки соответственно)

Fig. 4. Contours of sand particles velocity distribution over the furnace volume with circulating fluidized bed (m/s): a–d) distribution in horizontal planes (5, 15, 20 and 23 meters in height of the furnace, respectively)

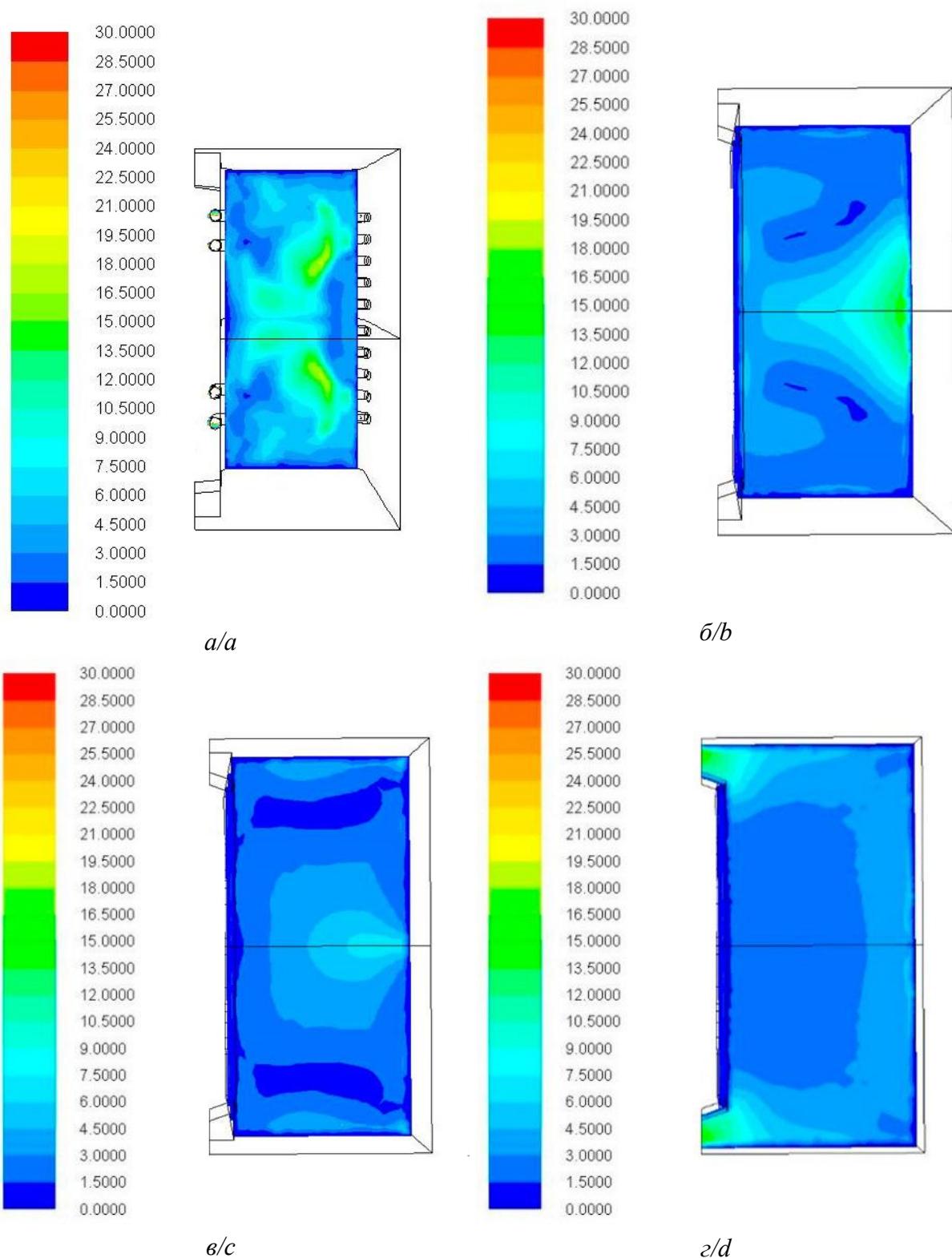


Рис. 5. Контурный график распределения скорости частиц песка по объему топки с ЦКС (м/с): *a–ε* распределение в горизонтальных плоскостях (5, 15, 20 и 23 метров по высоте топки соответственно)

Fig. 5. Contours of sand particles velocity distribution over the furnace volume with CFB (m/s): *a–d* distribution in horizontal planes (5, 15, 20 and 23 meters in height of the furnace, respectively)

Метод Эйлера–Лагранжа

В методе ЭЛ уравнения сохранения решаются для непрерывной фазы, а фаза частиц отслеживается путем решения уравнений движения для каждой частицы.

Уравнения непрерывности, импульса, энергии и переноса частиц для газовой фазы представлены уравнениями:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_f \rho_f) + \nabla \cdot (\varepsilon_f \rho_f \vec{v}_f) &= S_{mas}; \\
 \frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_f \rho_f h_f) + \nabla \cdot (\varepsilon_f \rho_f \vec{v}_f h_f) &= -\varepsilon_f \frac{\partial p}{\partial t} + \tau_f; \\
 \nabla \vec{v}_f - \nabla \vec{q}_f - \nabla \left[\varepsilon_f \sum_{k=1}^m h_{f,k} \vec{J}_k \right] &+ S_{f,rad} + S_{f,rea} + S_{en}; \\
 \frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_f \rho_f Y_{f,k}) + \nabla \cdot (\varepsilon_f \rho_f \vec{v}_f Y_{f,k}) &= \nabla \varepsilon_f \vec{J}_k + \varepsilon_f R_{f,k} + S_{sp},
 \end{aligned}$$

где ρ – плотность; ε – объемная доля; \vec{v} – вектор скорости; p – давление; τ_f – тензор касательных напряжений; g – вектор ускорения свободного падения; s – индекс твердой фазы; K_{DPM} – коэффициент межфазного обмена в результате сопротивления, рассчитанный для объемной доли твердых частиц в Эйлеровой сетке; h – удельная энталпия; k – индекс частиц; $Y_{f,k}$ – массовая доля частицы k ; m – число частиц в газовой фазе; \vec{J}_k – диффузионный поток частиц k ; q – тепловой поток. Исходный термин $S_{f,rad}$ составляет вклад в уравнение энергии за счет излучения, $S_{f,rea}$ определяет энергию, выделяемую в гомогенных реакциях. $R_{f,k}$ представляет собой темп образования однородных частиц k . S_{mas} , S_{mom} , S_{en} , S_{sp} – коэффициенты, вызванные обменом массы, импульсом, энергии и частиц между непрерывной и дискретной фазами соответственно.

Расчетная скорость оживления при реальных физических параметрах эксплуатации котла с ЦКС (температура слоя 850 °C) составляет 4,6 м/с, однако максимальная скорость в топке по расчетам принимается

с 50 % запасом и равна 7 м/с [52]. Как видно из рис. 5, скорость среды, определенная по сечению топочной камеры, составляет 7 м/с. На выходе из топки она возрастает до 20 м/с.

Анализ полученных результатов

Для сравнения двух выбранных методов (ЭЭ и ЭЛ) оценкой на сходимость результатов моделирования аэродинамики топки котла с ЦКС построен график распределения скорости потока воздуха по высоте топочной камеры (рис. 6). Математическое усреднение показаний произведено в программе Microsoft Excel линией тренда. По графику видно линейное увеличение скорости на всем интервале увеличения высоты для обоих методов. Максимальная скорость проявляется в области выходного окна из топки. Также на графике наблюдается участок падения скоростей при достижении высоты 5–15 м в области циркуляции частиц, когда недогоревшие частицы возвращаются обратно в слой в связи с увеличением сопротивления, за счет взаимного столкновения частиц и контакта со стенами топочной камеры, а также из-за недостатка кинетической энергии для выноса крупных частиц. В данном исследовании возврат частиц связан лишь с увеличением сопротивления на данной высоте. Согласно контурным графикам рис. 3–5 можно сделать заключение о том, что в области циркуляции недогоревшие частицы возвращаются вниз преимущественно в околостенных зонах. На основании этого можно прогнозировать условия надежности в эксплуатации топочных экранов. Согласно статистике [53] одна из часто выводимых из работы систем в котлах с ЦКС – это оборудование, находящееся под давлением.

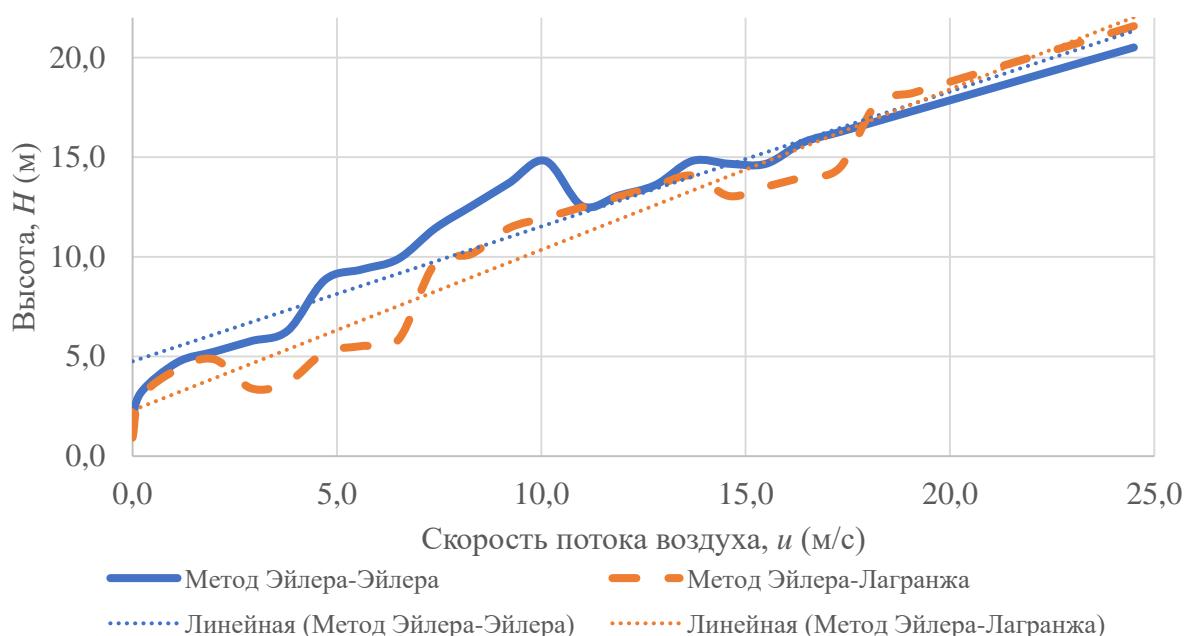


Рис. 6. График распределения скорости потока воздуха по высоте топочной камеры по методам Эйлера-Эйлера и Эйлера-Лагранжа

Fig. 6. Graph of air flow rate distribution by the combustion chamber height according to the Euler-Euler and Euler-Lagrange methods

В связи с большим накоплением частиц возможны налипания, которые приводят к непроектным режимам в части теплопередачи и дальнейшим разрывам труб. Поэтому необходимо размещать устья вторичного воздуха по высоте топки таким образом, чтобы развивались внутритопочные течения, которые будут располагать к надежной гидродинамике.

Заключение

Псевдоожижение является хорошо зарекомендованной технологией, используемой во многих промышленных процессах. Однако точное моделирование сложных явлений, происходящих в системах с псевдоожиженным слоем, по-прежнему является большой проблемой как для ученых, так и для инженеров. Исходя из изложенного в статье обзора различных подходов к моделированию, используемых для псевдоожиженного слоя, можно сделать вывод о том, что псевдоожижение возможно смоделировать на различных уровнях детализации. В зависимости от того, насколько детально требуется описать мультифазный поток, необходимо применять соответствующие стратегии.

Например, при моделировании методом Computational Fluid Dynamics используется уравнение Эргуна, так как пустотность всегда меньше 0,8 (значение, предложенное Д. Гидасповым). Однако уравнение Вена и Ю дает более точный результат и должно использоваться вместо него. Поэтому стараются использовать данные корреляции совместно. Тем не менее такие выводы не могут быть обобщены на все системы, необходимо рассматривать каждый случай отдельно. Все сводится к тому, чтобы понимать, когда необходимо применять то или иное уравнение.

В настоящей работе методы Эйлера-Эйлера и Эйлера-Лагранжа приведены в формате тестового сравнения, что дает представление и о их взаимном применении в зависимости от цели моделирования. В ходе численного исследования решались задачи приведения геометрических размеров, граничных условий и методов в соответствие к тем, которые приводятся в литературных источниках в качестве апробированных.

Для расчета аэродинамики исследуемого объекта был применен метод Эйлера-Эйлера. Однако данный метод имеет ряд недостатков, например, отсутствие пост-анализа по распределению частиц по диаметрам

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Research trends and recent advances of oxyfuel combustion of solid fuels in fluidized beds / Q. Liu, W. Zhong, Y. Shao, A. Yu // CIESC Journal. – 2019. – V. 3. – P. 1–23.
2. Распоряжение Правительства Российской Федерации № 1715-р «Энергетическая стратегия России на период до 2030 года» от 13 ноября 2009 г // Министерство Энергетики РФ. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/1026> (дата обращения 12.11.2019).
3. Myöhänen K. Modelling of combustion and sorbent reactions in three-dimensional flow environment of a circulating fluidized bed furnace: Dr. Sc. Diss. – Lappeenranta, 2011. – 164 p.
4. The role of mesoscale structures in rapid gas–solid flow / K. Agrawal, P.N. Loezos, M. Syamlal, S. Sundaresan // Journal of Fluid Mechanics. – 2001. – V. 445. – P. 151–185.
5. Reh L. Development potentials and research needs in circulating fluidized bed combustion // China Particuology. – 2003. – V. 1. – № 5. – P. 185–200.
6. Comparison of multifluid and discrete particle modelling in numerical predictions of gas particle flow in circulating fluidised beds / C.H. Ibsen, E. Helland, B.H. Hjertager, T. Solberg, L. Tadrist, R. Occelli // Powder Technology. – 2004. – V. 149. – № 1. – P. 29–41.
7. Andrews A.T., Loezos P.N., Sundaresan S. Coarse-grid simulation of gas-particle flows in vertical risers// Industrial & Engineering Chemistry Research. – 2005. – V. 44. – P. 6022–6037.
8. Kallio S. Comparison of simulated and measured voidage and velocity profiles and fluctuations in a CFB riser // Proc. of the 8th International Conference on Circulating Fluidized Beds. – Hangzhou, China, 2005. – P. 105–112.

в исследуемом объекте (отсюда необходимость в задании нескольких фракций), а также отсутствие задания условий горения угольных частиц. В результате моделирования по методу Эйлера-Эйлера были получены контурные графики распределения частиц и скорости по высоте топки. График распределения частиц песка схож с тем, что представлен в [44], соответствующим особенностям функционирования в топочном устройстве с циркулирующим кипящим слоем, к которым относится неравномерное распределение концентрации твердых частиц по высоте топки. Наблюдается высокая концентрация частиц в нижней части топки, которая уменьшается с высотой и распределяется в околостенных зонах.

В подходе Эйлера-Лагранжа частицы моделируются как дискретные объекты с индивидуальными диаметрами. Данный метод находит редкое применение при моделировании объектов промышленного назначения, так как требователен к вычислительным затратам и наличию значительного временного запаса. Эти факторы негативно отражаются на исследований, в особенности на начальных этапах расчета, когда имеет важное значение скорость анализа влияния применяемых конструктивных решений. Также метод применяется только в сильно разбавленных системах с небольшим числом частиц и требует усреднения значений, полученных с помощью математического моделирования для получения качественных результатов. Изменение значений скорости потоков в сечении топочной камеры по методу Эйлера-Лагранжа совпадает с методом Эйлера-Эйлера и равняется 7 м/с.

Обсуждение выделенных в настоящей работе ключевых результатов, полученных в ходе моделирования по методу Эйлера-Эйлера и Эйлера-Лагранжа топки с ЦКС, подчеркивает следующие задачи. В частности, для дальнейшей проработки вопросов моделирования топок с циркулирующим кипящим слоем целесообразно изучать по методу Эйлера-Эйлера закономерности выноса твердой фазы из плотного слоя в зависимости от скорости псевдоожижения, расположения и взаимной работы устьев ввода вторичного воздуха по высоте топки, а также от добавления системы возврата в нижнюю часть топки для накопления частиц.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-38-00775_мол_а).

9. Filtered two-fluid models for fluidized gas-particle suspensions / Y. Igci, A.T. Andrews, S. Sundaresan, S. Pannala, T. O'Brien // AIChE Journal. – 2008. – V. 54. – № 6. – P. 1431–1448. URL: <https://doi.org/10.1002/aic.11481> (дата обращения 10.02.2020).
10. CFD-DEM study of the effect of cyclone arrangements on the gas-solid flow dynamics in the full-loop circulating fluidized bed / S. Wang, K. Luo, C. Hu, J. Fan // Chemical Engineering Science. – 2017. – V. 172. – P. 199–215.
11. Tu Q., Wang H. CFD study of a full-loop three-dimensional pilot-scale circulating fluidized bed based on EMMS drag model // Powder Technology. – 2018. – V. 323. – P. 534–547.
12. Crowe C., Sommerfeld M., Tsuji Y. Multiphase flows with droplets and particles. – Boca Raton: CRC Press, 1998. – 496 p.
13. Review of discrete particle modeling of fluidized beds / N.G. Deen, M. van Sint Annaland, M.A. van der Hoef, J.A.M. Kuipers // Chemical Engineering Science. – 2008. – V. 62. – P. 28–44.
14. Numerical investigation of particle transport hydrodynamics and coal combustion in an industrial-scale circulating fluidized bed combustor: effects of coal feeder positions and coal feeding rates / M. Massoudi Farid, H.J. Jeong, K.H. Kim, J. Lee, D. Kim, J. Hwang // Fuel. – 2017. – V. 192. – P. 187–200.
15. Numerical simulation of circulating fluidized bed oxy-fuel combustion with Dense Discrete Phase Model / Y. Wu, D. Liu, D. Zheng, J. Ma, L. Duan, X. Chen // Fuel Processing Technology. – 2019. – V. 195. – P. 1–14.
16. Goldschmidt M.J.V. Hydrodynamic modelling of fluidised bed spray granulation. Doctoral dissertation. – Netherlands, 2001. – 303 p.
17. A model for improving the Euler-Euler twophase flow theory to predict chemical reactions in circulating fluidized beds / B. Hou, X. Wang, T. Zhang, H. Li // Powder Technology. – 2017. – V. 321. – P. 13–30.
18. Improved numerical approaches to predict hydrodynamics in a pilot-scale bubbling fluidized bed biomass reactor: a numerical study with experimental validation / J. Cardoso, V. Silva, D. Eusébio, P. Brito, L. Tarelho // Energy Conversion and Management. – 2018. – V. 156. – P. 53–67.
19. Kallio S., Kilpinen P., Hupa M. Advanced modeling of nitrogen oxide emissions in circulating fluidized bed combustors: parametric study of hydrodynamics // 6th Int. Conference on Circulating Fluidized Beds. – Würzburg, 1999. – P. 659–664.
20. Kilpinen P., Kallio S., Hupa M. Advanced modeling of nitrogen oxide emissions in CFBC: parametric study of coal combustion and nitrogen compound chemistries // Proc. of the 15th International Conference on FBC. – Savannah, GA, USA, 1999. – Paper No. FBC99-0155.
21. Chapman S., Cowling T. G., Burnett D. The mathematical theory of non-uniform gases: an account of the kinetic theory of viscosity, thermal conduction and diffusion in gases. – Cambridge: Cambridge university press, 1990. – 423 p.
22. Simulation of particles and gas flow behavior in the riser section of a circulating fluidized bed using the kinetic theory approach for the particulate phase / S. Benyahia, H. Arastoopour, T.M. Knowlton, H. Massah // Powder Technology. – 2000. – V. 112, – № 1–2. – P. 24–33.
23. Bird R.B., Stewart W.E., Lightfoot E.N. Transport phenomena (2nd ed.). – New York: Wiley, 2002. – 885 p.
24. Taghipour F., Ellis N., Wong C. Experimental and computational study of gas-solid fluidized bed hydrodynamics // Chemical Engineering Science. – 2005. – V. 60. – P. 6857–6867.
25. Ergun S. Fluid flow through packed columns // Chemical Engineering Progress. – 1952. – V. 48. – P. 89–94.
26. Wen C.Y., Yu Y.H. Mechanics of fluidization // Chemical Engineering Progress Symposium Series. – 1966. – V. 62. – P. 100–111.
27. Eulerian simulation of gas–solid two-phase flow in a CFB-riser under consideration of cluster effects / H. Qi, C. You, A. Boemer, U. Renz // Fluidization 2000: Science and Technology / Eds. D. Xu, S. Mori. – Xi'an: Xi'an Publ. House, 2000. – P. 231–237.
28. Numerical study of segregation using a new drag force correlation for polydisperse systems derived from lattice-Boltzmann simulations / R. Beetstra, M.A. van der Hoef, J.A.M. Kuipers // Chemical Engineering Science. – 2007. – V. 62. – № 1–2. – P. 246–255.
29. CFD simulation of concurrent upgas solidflow in circulating fluidized beds with structure-dependent drag coefficient / N. Yang, W. Wang, W. Ge, J. Li // Chemical Engineering Journal. – 2003. – V. 96. – P. 71–80.
30. Modeling of drag with the Eulerian approach and EMMS theory for heterogeneous dense gas–solid two-phase flow / H. Qi, F. Li, B. Xi, C. You // Chemical Engineering Science. – 2007. – V. 62. – P. 1670–1681.
31. Li J., Kwauk M. Particle–fluid two-phase flow: the energy-minimization multi-scale method. – Beijing: Metallurgical Industry Press, 1994. – 215 p.
32. Guangbo Z. A coal combustion model for circulating fluidized bed boilers // Fuel. – 2000. – V. 79. – P. 165–172.
33. Gungor A. Hydrodynamic modeling of a circulating fluidized bed // Powder Technology. – 2007. – V. 172. – P. 1–13.
34. Nakamura H. Numerical modeling of particle fluidization behavior in a rotating fluidized bed // Powder Technology. – 2007. – V. 171. – P. 106–117.
35. Hadavand A. An innovative bed temperature-oriented modeling and robust control of a circulating fluidized bed combustor // Chemical Engineering Journal. – 2008. – V. 140. – P. 497–508.
36. Kong L.X., Hodgson P.D. Computational simulation of gas flow and heat transfer near an immersed object in fluidized beds // Advances in Engineering Software. – 2007. – V. 38. – P. 826–834.
37. Bastos J.C.S.C. Modelling and simulation of a gas–solids dispersion flow in a high flux circulating fluidized bed (HFCFB) riser // Catalysis Today. – 2008. – V. 130. – P. 462–470.
38. Cornelissen J.T. CFD modelling of a liquid–solid fluidized bed // Chemical Engineering Science. – 2007. – V. 62. – P. 6334–6348.
39. Modeling of particle transport and combustion phenomena in a large-scale circulating fluidized bed boiler using a hybrid Euler–Lagrange approach / W.P. Adamczyk, G. Wecel, M. Klajny, P. Kozolub, A. Klimanek, R.A. Bialecki // Particulology. – 2014. – V. 16. – P. 29–40.
40. Bordbar M.H., Myohanen K., Hyppanen T. Coupling of a radiative heat transfer model and a three-dimensional combustion model for a circulating fluidized bed furnace // Applied Thermal Engineering. – 2015. – V. 76. – P. 344–356.
41. Bordbar M.H., Wecel G., Hyppanen T. A line by line based weighted sum of gray gases model for inhomogeneous CO₂–H₂O mixture in oxy-fired combustion // Combustion and Flame. – 2014. – V. 161. – P. 2435–2445.
42. Nies M., Plackmeyer J. Computer-aided optimisation of gas–particle flow and combustion at the duisburg circulating fluidised bed furnace // VGB PowerTech Journal. – 2011. – V. 8. – P. 64–69.
43. Zhang N., Wang W., Li J. CFD simulation of combustion in a 150 MWe circulating fluidized bed boiler // Cleaner Combustion and Sustainable World – Proc. of the 7th International Symposium on Coal Combustion / Eds. H. Qi, B. Zhao. – Berlin: Springer-Verlag, 2013. – P. 65–67.
44. Myöhänen K., Hyppänen T. A three-dimensional model frame for modelling combustion and gasification in circulating fluidized bed furnaces // International Journal of Chemical Reactor Engineering. – 2011. – V. 9. – № 1. – P. 1–55.
45. Reactive gas–solids flows in large volumes – 3D modeling of industrial circulating fluidized bed combustors / R. Wischnewski, L. Ratschow, E.U. Hartge, J. Werther // Particulology. – 2010. – V. 8. – P. 67–77.
46. Modeling of the heat transfer in large-scale circulating fluidized bed furnaces / D. Pallares, M. Palonen, V. Yla-Outinen, F. Johnson // Proc. of the 21st International Conference on Fluidized Bed Combustion / Eds. U. Arena, R. Chirone, M. Miccio, P. Salatino. – EnzoAlbanoEditore, Naples, 2012. – P. 867–874.
47. ANSYS FLUENT 12.0, Theory Guide. 2009.
URL: <https://www.ansys.com/Products/ANSYS-FLUENT/Documentation/12.0/Theory-Guide> (дата обращения 12.11.2019).
48. Численное исследование влияния дисперсного состава на характеристики скижания угольного топлива в циркулирующем кипящим слоем / В.В. Саломатов, А.В. Гиль, А.В. Старченко, Р.Ю. Архипов // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Физика. – 2016. – Т. 11. – № 3. – С. 53–61.
49. Modelling of particle flow in a dual circulation fluidized bed by a Eulerian-Lagrangian approach / J. Gu, Y. Shao, X. Liu, W. Zhong,

- A. Yu // Chemical Engineering Science. – 2018. – V. 192. – P. 619–633.
50. Experimental study and CFD modelling of minimum fluidization velocity for Geldart A, B and D particles / S. Amarasinghe, K. Jayarathna, S. Ahangama, M.E. Moldestad, L.-A. Tokheim // International Journal of Modeling and Optimization. – 2017. – V. 7. – P. 152–156.
51. Bandara J.C., Eikeland M.S., Moldestad B.M.E. Analyzing the effects of particle density, size, size distribution and shape for minimum fluidization velocity with Eulerian-Lagrangian, CFD simulation // Proc. of the 58th Conference on Simulation and Modelling. – Reykjavik, Iceland, 2017. – P. 60–65.
52. Кокшарев О.М. Анализ применимости численных алгоритмов для моделирования процессов в топке котла с циркулирующим кипящим слоем: магистерская диссертация. – Томск, 2017. – 125 с.
53. Suik H., Pihu T. Warranty reliability of CFB boiler burning oil shale // Oil Shale. – 2009. – V. 26. – № 2. – P. 99–107.

Поступила 22.02.2020 г.

Информация об авторах

Гиль А.В., кандидат технических наук, доцент научно-образовательного центра И.Н. Бутакова, Национальный исследовательский Томский политехнический университет.

Заворин А.С., доктор технических наук, профессор, руководитель научно-образовательного центра И.Н. Бутакова, Национальный исследовательский Томский политехнический университет.

Кокшарев О.М., аспирант научно-образовательного центра И.Н. Бутакова, Национальный исследовательский Томский политехнический университет.

UDC 621.18

APPROACHES TO COMPUTATIONAL STUDY OF COMBUSTION CHAMBERS WITH CIRCULATING FLUIDIZED BED

Andrey V. Gil,
angil@tpu.ru

Alexander S. Zavorin,
kotel@tpu.ru

Oleg M. Koksharev,
omk2@tpu.ru

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

The relevance. In modern scientific research the computing experiment is one of the most productive means of studying complex tasks where the outcome depends on simultaneous influence of aerodynamics, heat transfer and combustion. Numerical calculations allow not only explaining correctly the physical phenomena noted at experimental installations, but quite often considerably extending expensive and labor-consuming physical or full-scale experiment with computer simulation. In this regard, the relevance of the research aimed at improving the methods of numerical analysis of furnace processes in boilers with circulating fluidized bed on the basis of computer mathematical modeling is very high to justify the basic design and technological decisions taken when creating boilers with circulating fluidized bed. In addition to practical significance, the research has a high scientific component, since the fundamental laws of physical and chemical processes in the circulating fluidized bed are the basis of the task.

The aim of the research is to determine the approaches and applicability of numerical algorithms with satisfactory level of detail and convergence for modeling furnace processes in boilers with circulating fluidized bed.

Object: furnace with circulating fluidized bed, equipped with two inputs of fuel and inert particles on the rear wall and ten secondary air inlets on the front wall in two decks.

Methods: mathematical modeling of physical and chemical processes in a furnace chamber with circulating fluidized bed based on Euler-Euler and Euler-Lagrangian approaches using RANS models. Differential equations for conservation of mass, momentum, energy and particle transport are written. The numerical study was carried out using the Ansys Fluent V. 12.1 software package.

Result. The initial and boundary conditions for numerical simulation of processes in the furnace chamber of a boiler unit with circulating fluidized bed using Euler-Euler and Euler-Lagrangian approaches are determined.

Key word:

Circulating fluidized bed boiler, mathematical modeling, Euler-Euler method, Euler-Lagrange method, physical and chemical processes.

The research was financially supported by the RFBR (project no. 18-38-00775_mol_a).

REFERENCES

1. Liu Q., Zhong W., Shao Y., Yu A. Research trends and recent advances of oxyfuel combustion of solid fuels in fluidized beds. *CIESC Journal*, 2019, vol. 3, pp. 1–23.
2. *Energeticheskaya strategiya Rossii na period do 2030 goda* [Energy Strategy of Russia for the period up to 2030 (ES-2030)] approved by decree №1715-r of the Government of the Russian Federation dated 13 November 2009]. Ministry of Energy of the RF. Available at: <https://minenergo.gov.ru/node/1026> (accessed 12 November 2019).
3. Myöhänen K. *Modelling of combustion and sorbent reactions in three-dimensional flow environment of a circulating fluidized bed furnace*. Dr.Sc. Diss. Lappeenranta, 2011. 164 p.
4. Agrawal K., Loezos P.N., Syamlal M., Sundaresan S. The role of mesoscale structures in rapid gas–solid flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 2001, vol. 445, pp. 151–185.
5. Reh L. Development potentials and research needs in circulating fluidized bed combustion. *China Particulology*, 2003, vol. 1, no. 5, pp. 185–200.
6. Ibsen C.H., Helland E., Hjertager B.H., Solberg T., Tadrist L., Occelli R. Comparison of multifluid and discrete particle modelling in numerical predictions of gas particle flow in circulating fluidised beds. *Powder Technology*, 2004, vol. 149, no. 1, pp. 29–41.
7. Andrews A.T., Loezos P.N., Sundaresan S. Coarse-Grid Simulation of Gas-Particle Flows in Vertical Risers. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2005, vol. 44, pp. 6022–6037.
8. Kallio S. Comparison of simulated and measured voidage and velocity profiles and fluctuations in a CFB riser. *Proc. of the 8th International Conference on Circulating Fluidized Beds*. Hangzhou, China, 2005, pp. 105–112.
9. Igci Y., Andrews A.T., Sundaresan S., Pannala S., O'Brien T. Filtered two-fluid models for fluidized gas-particle suspensions. *AIChE Journal*, 2008, vol. 54, no. 6, pp. 1431–1448. Available at: <https://doi.org/10.1002/aic.11481> (accessed 10 February 2020).
10. Wang S., Luo K., Hu C., Fan J. CFD-DEM study of the effect of cyclone arrangements on the gas-solid flow dynamics in the full-loop circulating fluidized bed. *Chemical Engineering Science*, 2017, vol. 172, pp. 199–215.
11. Tu Q., Wang H. CFD study of a full-loop three-dimensional pilot-scale circulating fluidized bed based on EMMS drag model. *Powder Technology*, 2018, vol. 323, pp. 534–547.
12. Crowe C., Sommerfeld M., Tsuji Y. *Multiphase flows with droplets and particles*. Boca Raton, CRC Press, 1998. 496 p.
13. Deen N.G., Van Sint Annaland M., Van der Hoef M.A., Kuipers J.A.M. Review of discrete particle modeling of fluidized beds. *Chemical Engineering Science*, 2008, vol. 62, pp. 28–44.
14. Massoudi Farid M., Jeong H.J., Kim K.H., Lee J., Kim D., Hwang J. Numerical investigation of particle transport hydrodynamics and coal combustion in an industrial-scale circulating fluidized bed combustor: effects of coal feeder positions and coal feeding rates. *Fuel*, 2017, vol. 192, pp. 187–200.
15. Wu Y., Liu D., Zheng D., Ma J., Duan L., Chen X. Numerical simulation of circulating fluidized bed oxy-fuel combustion with Dense Discrete Phase Model. *Fuel Processing Technology*, 2019, vol. 195, pp. 1–14.
16. Goldschmidt M.J.V. *Hydrodynamic modelling of fluidised bed spray granulation*. Doctoral dissertation. Netherlands, 2001. 303 p.

17. Hou B., Wang X., Zhang T., Li H. A model for improving the Euler–Euler twophase flow theory to predict chemical reactions in circulating fluidized beds. *Powder Technology*, 2017, vol. 321, pp. 13–30.
18. Cardoso J., Silva V., Eusébio D., Brito P., Tarelho L. Improved numerical approaches to predict hydrodynamics in a pilot-scale bubbling fluidized bed biomass reactor: a numerical study with experimental validation. *Energy Conversion and Management*, 2018, vol. 156, pp. 53–67.
19. Kallio S., Kilpinen P., Hupa M. Advanced modeling of nitrogen oxide emissions in circulating fluidized bed combustors: parametric study of hydrodynamics. *6th Int. Conference on Circulating Fluidized Beds*. Würzburg, 1999. pp. 659–664.
20. Kilpinen P., Kallio S., Hupa M., Advanced modeling of nitrogen oxide emissions in CFBC: parametric study of coal combustion and nitrogen compound chemistries. *Proc. of the 15th International Conference on FBC*. Savannah, GA, USA, 1999. Paper No. FBC99-0155.
21. Chapman S., Cowling T.G., Burnett D. *The mathematical theory of non-uniform gases: an account of the kinetic theory of viscosity, thermal conduction and diffusion in gases*. Cambridge, Cambridge university press, 1990. 423 p.
22. Benyahia S., Arastoopour H., Knowlton T.M., Massah H. Simulation of particles and gas flow behavior in the riser section of a circulating fluidized bed using the kinetic theory approach for the particulate phase. *Powder Technology*, 2000, vol. 112, no. 1–2, pp. 24–33.
23. Bird R.B., Stewart, W.E., Lightfoot E.N. *Transport phenomena* (2nd ed.). New York, Wiley, 2002. 885 p.
24. Taghipour F., Ellis N., Wong C. Experimental and computational study of gas–solid fluidized bed hydrodynamics. *Chemical Engineering Science*, 2005, vol. 60, pp. 6857–6867.
25. Ergun S. Fluid flow through packed columns. *Chemical Engineering Progress*, 1952, vol. 48, pp. 89–94.
26. Wen C.Y., Yu Y.H. Mechanics of fluidization. *Chemical Engineering Progress Symposium Series*, 1966, vol. 62, pp. 100–111.
27. Qi H., You C., Boemer A., Renz U. Eulerian simulation of gas–solid two-phase flow in a CFB-riser under consideration of cluster effects. *Fluidization 2000: Science and Technology*. Eds. D. Xu, S. Mori. Xi'an, Xi'an Publishing House, 2000. pp. 231–237.
28. Beetstra R., Van der Hoef M.A., Kuipers J.A.M. Numerical study of segregation using a new drag force correlation for polydisperse systems derived from lattice-Boltzmann simulations. *Chemical Engineering Science*, 2007, vol. 62, no. 1–2, pp. 246–255.
29. Yang N., Wang W., Ge W., Li J. CFD simulation of concurrent upgas solidflow in circulating fluidized beds with structure-dependent drag coefficient. *Chemical Engineering Journal*, 2003, vol. 96, pp. 71–80.
30. Qi H., Li F., Xi B., You C. Modeling of drag with the Eulerian approach and EMMS theory for heterogeneous dense gas–solid two-phase flow. *Chemical Engineering Science*, 2007, vol. 62, pp. 1670–1681.
31. Li J., Kwauk M. *Particle–fluid two-phase flow: the energy-minimization multi-scale method*. Beijing, Metallurgical Industry Press, 1994. 215 p.
32. Guangbo Z. A coal combustion model for circulating fluidized bed boilers. *Fuel*, 2000, vol. 79, pp. 165–172.
33. Gungor A. Hydrodynamic modeling of a circulating fluidized bed. *Powder Technology*, 2007, vol. 172, pp. 1–13.
34. Nakamura H. Numerical modeling of particle fluidization behavior in a rotating fluidized bed. *Powder Technology*, 2007, vol. 171, pp. 106–117.
35. Hadavand A. An innovative bed temperature-oriented modeling and robust control of a circulating fluidized bed combustor. *Chemical Engineering Journal*, 2008, vol. 140, pp. 497–508.
36. Kong L.X., Hodgson P.D. Computational simulation of gas flow and heat transfer near an immersed object in fluidized beds. *Advances in Engineering Software*, 2007, vol. 38, pp. 826–834.
37. Bastos J.C.S.C. Modelling and simulation of a gas–solids dispersion flow in a high flux circulating fluidized bed (HFCFB) riser. *Catalysis Today*, 2008, vol. 130, pp. 462–470.
38. Cornelissen J.T. CFD modelling of a liquid–solid fluidized bed. *Chemical Engineering Science*, 2007, vol. 62, pp. 6334–6348.
39. Adamczyk W.P., Wecl G., Klajny M., Kozolub P., Klimanek A., Bialecki R.A. Modeling of particle transport and combustion phenomena in a large-scale circulating fluidized bed boiler using a hybrid Euler–Lagrange approach. *Particulology*, 2014, vol. 16, pp. 29–40.
40. Bordbar M.H., Myohanen K., Hyppanen T. Coupling of a radiative heat transfer model and a three-dimensional combustion model for a circulating fluidized bed furnace. *Applied Thermal Engineering*, 2015, vol. 76, pp. 344–356.
41. Bordbar M.H., Wecl G., Hyppanen T. A line by line based weighted sum of gray gases model for inhomogeneous CO₂–H₂O mixture in oxy-fired combustion. *Combustion and Flame*, 2014, vol. 161, pp. 2435–2445.
42. Nies M., Plackmeyer J. Computer-aided optimisation of gas–particle flow and combustion at the duisburg circulating fluidised bed furnace. *VGB PowerTech Journal*, 2011, vol. 8, pp. 64–69.
43. Zhang N., Wang W., Li J. CFD simulation of combustion in a 150 MWe circulating fluidized bed boiler. *Cleaner Combustion and Sustainable World – Proc. of the 7th International Symposium on Coal Combustion*. Eds. H. Qi, B. Zhao. Berlin, Springer-Verlag, 2013. pp. 65–67.
44. Myöhänen K., Hyppänen T. A three-dimensional model frame for modelling combustion and gasification in circulating fluidized bed furnaces. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 2011, vol. 9, no. 1, pp. 1–55.
45. Wischnewski R., Ratschow L., Hertge E.U., Werther J. Reactive gas–solids flows in large volumes–3D modeling of industrial circulating fluidized bed combustors. *Particulology*, 2010, vol. 8, pp. 67–77.
46. Pallares D., Palonen M., Yla-Outinen V., Johnsson F. Modeling of the heat transfer in large-scale circulating fluidized bed furnaces. *Proc. of the 21st International Conference on Fluidized Bed Combustion*. Eds. U. Arena, R. Chirone, M. Miccio, P. Salatino. Enzo-AlbanoEditore, Naples, 2012. pp. 867–874.
47. ANSYS FLUENT 12.0, *Theory Guide*. 2009. Available at: <https://www.ansys.com/Products/ANSYS-FLUENT/Documentation/12.0/Theory-Guide> (accessed 12 November 2019).
48. Salomatov V.V., Gil A.V., Starchenko A.V., Arkhipov R.Yu. Chislennoe issledovaniye vliyanija dispersnogo sostava na harakteristiki szhiganiya ugoľnogo topliva v tsirkuliruyushchem kipyashchem sloe [Numerical study of the influence of disperse composition on the characteristics of coal fuel combustion in a circulating fluidized bed]. *Vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Fizika*, 2016, vol. 11, no. 3, pp. 53–61.
49. Gu J., Shao Y., Liu X., Zhong W., Yu A. Modelling of particle flow in a dual circulation fluidized bed by a Eulerian–Lagrangian approach. *Chemical Engineering Science*, 2018, vol. 192, pp. 619–633.
50. Amarasinghe S., Jayarathna K., Ahangama S., Moldestad M.E., Tokheim L.-A. Experimental study and CFD modelling of minimum fluidization velocity for Geldart A, B and D particles. *International Journal of Modeling and Optimization*, 2017, vol. 7, pp. 152–156.
51. Bandara J.C., Eikeland M.S., Moldestad B.M.E. Analyzing the effects of particle density, size, size distribution and shape for minimum fluidization velocity with Eulerian–Lagrangian, CFD simulation. *Proc. of the 58th Conference on Simulation and Modelling*. Reykjavik, Iceland, 2017. pp. 60–65.
52. Koksharev O.M. *Analiz primenimosti chislennykh algoritmov dlya modelirovaniya protsessov v topke kotla s tsirkuliruyushchim kipyashchim sloem*. Diss. magistra [Analysis of the applicability of numerical algorithms for modeling processes in the furnace of a boiler with a circulating fluidized bed. Master's thesis]. Tomsk, 2017. 125 p.
53. Suik H., Pihu T. Warranty reliability of CFB boiler burning oil shale. *Oil Shale*, 2009, vol. 26, no. 2, pp. 99–107.

Received: 22 February 2020.

Information about the authors

Andrey V. Gil, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

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

Oleg M. Koksharev, postgraduate, National Research Tomsk Polytechnic University.

UDC 624.139.22:625.066/068:661.42:546.32

POTASSIUM CHLORIDE EFFECT ON EFFICIENCY OF FINE SLAG USED FOR TREATMENT OF EXPANSIVE SOIL

Rajesh Prasad Shukla¹,
rpshukla.2013@iitkalumni.org

Niraj Singh Parihar²,
singhpariharniraj@gmail.com

Ashok Kumar Gupta²,
ashok.gupta@juit.ac.in

¹ Department of Civil & Infrastructure Engineering, Adani Institute of Infrastructure Engineering, Ahmedabad, 382427, India

² Department of Civil Engineering, Jaypee University of Information Technology, Waknaghat, Himachal Pradesh, 173234, India

The article presents the results of a preliminary investigation carried out to determine the effect of a small amount of potassium chloride (KCl) on the efficiency of fine slag used for treatment of expansive soil. The quantity of KCl has been varied from 0,5 to 1,5 %, while fine slag was varied from 5 to 15 % of the soil weight. It is found that the plasticity and differential free swell of the soil reduces with the addition of KCl as well as fine slag. KCl is more competent in reducing the plasticity and swelling of soil compared to fine slag. Whereas, the enhancement in strength and maximum dry density is relatively large in case of fine slag as compared to KCl added to the soil. The efficiency of fine slag to alter the properties of expansive soil increases significantly in the presence of a small quantity of KCl. The predictive models were also developed to find out the improved properties of expansive soil.

Key words:

Potassium chloride, fine slag, expansive soil, index properties, unconfined compressive strength.

Introduction

Expansive soil, also known as black cotton soil in India, is spread over more than 20 % land cover of India [1]. However, all expansive soils are not black cotton soils and vice versa. These soils suffer from volume expansion and shrinkage in wet and dry state, respectively. Within the last two decades, India has gone through significant advancement and growth in the road network and various other construction activities. Presence of expansive soils often affects the construction activities and performance of structures [2, 3]. In India, these soils have affected the functioning of roads and have hammered construction activities severely. Therefore, it is required to enhance the expansive soil properties before starting any construction activity.

It has been revealed in earlier studies that chemical stabilisation is a relatively more efficient and economical solution to change and enhance the properties of expansive soils [4–6]. The chemical stabilisation using materials like Portland cement, KCl, NaCl, lime, and various other conventional stabilisers are very common. The chemicals undergo cation exchange with the clay minerals; and consequently, reduce the shrinkage and swelling of soils [7]. Many researchers used various combination of chemicals, and some studies used solid waste materials to improve the properties of chemically treated soil [8–10]. Solid waste material improves the strength of soil, and chemical additives reduce the swelling and shrinkage of soil. The solid material interrupts the free flow of moisture and in its turn, reduces the swelling of soil.

R.K. Katti [11] used a number of chemicals to stabilize the expansive soil and revealed that potassium chlo-

ride (KCl) is relatively more efficient than other additives such as sodium chloride, barium chloride, calcium chloride, and magnesium chloride. Various other studies have also found KCl to be an effective additive for enhancement of properties of expansive soils [12–14]. A few studies used fine slag (FS) to enhance the strength of the soil. It was found that the addition of FS increased the strength of cohesive soils [1, 15]. The combined effect of FS and KCl is missing in the literature. The main aim of the study is to explore the influence of a small quantity of KCl on the FS efficiency to modify the properties of expansive soil. The soil properties considered in the present study include Atterberg limits, the unconfined compressive strength of soil, water content – dry density relationship, and differential free swell of expansive soil.

Materials used in the present study

The soil used in the present study was collected from Guna city, India. Fig. 1 shows the sampling location (red circle within a square) and the area where the study result can be implemented (blue area). Soils of similar characteristics are spread over more than 40 % area of Madhya Pradesh and a large part of Maharashtra and Rajasthan states of the country. Therefore, the outcome of this study can be utilized for a large area of the country. The properties of soil are presented in Table 1. The finer content is found to be more than 65 %. A small amount of organic materials was also witnessed in the collected soil samples.

FS was used as a primary additive to enhance the soil properties. Potassium chloride was used as secondary material to increase the effectiveness of FS. KCl is available at a very low cost. The description of KCl and FS are

presented in Table 2. The powder form of KCl, which has a white crystalline appearance, is used in the study. FS used in the present study is produced through the controlled granulation and possesses good cementitious properties. It has a specific gravity of 2,8.

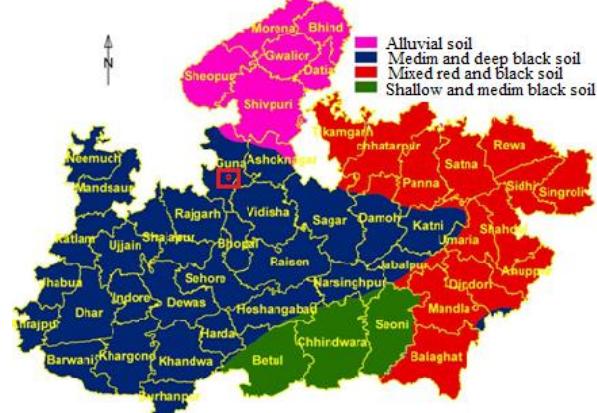


Fig. 1. Distribution of Expansive soil and sampling location (remodified after, MP land report, [16])

Рис. 1. Распределение обширного грунта и места отбора проб (ремодифицировано после отчета МП по земле [16])

Table 1. Properties of expansive soil used in the study

Таблица 1. Свойства экспансивной почвы, использованной в исследовании

| Properties/Свойства | Description/Описание |
|---|----------------------|
| Specific gravity (G)/Удельный вес (г) | 2,42–2,44 |
| Liquid limit (LL)/Предел текучести | 53–58 % |
| Plastic limit (PL)/Предел пластичности | 30–35 % |
| Plasticity index (PI)/Индекс пластичности | 23–26 % |
| Optimum moisture content (OMC) | 19–21 % |
| Оптимальное содержание влаги | |
| Shrinkage limit (SL)/Предел усадки | 10,5–11,5 % |
| Maximum dry density | 1,51 gm/cc |
| Максимальная сухая плотность | |

Table 2. Description of KCl and FS used in the study

Таблица 2. Описание KCl и FS, используемых в исследовании

| Properties of KCl Свойства хлористого калия | Description Описание | Chemical constituent of FS Химический состав ФС | Amount Сумма (%) |
|--|-------------------------|--|---------------------|
| Molar mass Молярная масса | 74,56 g/mol | CaO | 62,5 |
| Density/Плотность | 1,98 gm/cm ³ | SiO ₂ | 22 |
| Solubility in water Растворимость в воде | 344 g/L | Al ₂ O ₃ | 5,2 |
| Boiling point Температура кипения | 1420 °C | Fe ₂ O ₃ | 4,25 |
| Odour/Aромат | Odorless Без запаха | SO ₃ | 2,25 |
| Melting point Температура плавления | 770 °C | MgO | 1,2 |

Method of testing

The liquid limit of untreated expansive soil and modified soil were determined using the Casagrande apparatus. The plastic limit of soil was evaluated by the thread rolling method. The detailed procedure to determine the LL

and PL is given in IS:2720:Part-V [17]. Shrinkage limit of soil samples was determined using the mercury displacement method by following a procedure specified in IS:2720:Part-VI [18]. To determine the Atterberg limits of modified soil, sufficient time was provided to allow the uniform mixing of water within the soil samples. Following the plasticity chart given in the Indian standard, IS 1498 [19], this soil is classified as silt of high plasticity (MH).

The different testing approaches were used to determine the relationship between moisture content and dry density of untreated soil and stabilized soil. For untreated soil samples, Indian standard IS:2720:Part-VII [20] was used, while for the stabilized soil samples, IS:4332:Part III [21] was used. The stabilized soil and water mixture were compacted in the mould of size 1000 ml. The stabilized soil sample added with the varying amount of water content was compacted in the three layers. Each layer was compacted with a hammer (weight of 2,6 kg) falling through a height of 310 mm. The compaction of the stabilized soil sample was completed within 20 minutes as specified in the Indian standard. After this, the compacted soil sample was removed from the mould. To determine the moisture content of compacted soil, the soil samples were taken from the top, center, and bottom of the compacted soil specimen.

The unconfined compressive strength of untreated soil and stabilized soil samples were determined using a method specified in IS 2720:Part X [22]. Soil samples with a diameter of 38 mm and length of 76 mm were used to determine the UCS of soil. All soil samples were made at optimum moisture content and maximum dry density. All samples were compacted and tested under a constant strain of 1,25 mm/min. Stress-strain curves were plotted to determine the peak strength of the soil sample. Indian standard code IS 2720-40 [23] was used to determine the differential free swell of expansive soil. As suggested in the IS code, 10 grams of oven-dried soil sample passing through a 425-micron sieve were poured into two graduated cylinders each of 100 ml capacity. One cylinder was filled with kerosene oil as a non-polar liquid, and the other was filled with distilled water up to the 100 ml mark. The entrapped air was removed from both the cylinders through gentle shaking. After sufficient time (48 hours), when soil samples attained equilibrium condition, the final volume of the soil grains was measured. The differential free swell was determined by the following formula given in IS code IS 2720-40 [23]: differential free swell (DFS) = $[(V_w - V_k)/V_k] \times 100$, where V_k and V_w are the final volumes of soil samples in kerosene and distilled water.

Result and discussion

To determine the optimum quantity, the amount of potassium chloride was varied from 0,5 to 1,5 % with an interval of 0,5 %. The amount of KCl at which the properties (in plots) showed a slight crest or displayed a reversal as compared to the previous amounts was considered as optimum quantity. The results of the study show that the optimum quantity of KCl for this particular soil is approximately found to be 1 % of soil weight. The evaluated optimum amount of potassium chloride is also close

to the other studies [24, 25] carried out on expansive soils found in India. This amount was added to the soil samples to be treated with FS. To differentiate between the distinct effect of FS and combine effect of KCl and FS, the results are presented in the normalized form as a ratio of the initial value of index property for untreated soil (with a subscript 'i') to the final value of the same property after treatment (with a subscript 'f').

Effect on consistency limit

Liquid limit and plastic limit are crucial index properties to classify finer soils, and it can be correlated with a number of engineering properties and behaviour of soil. The variation in Atterberg limit with KCl and FS is presented in Fig. 2. Fig. 2, a shows that the LL of the soil decreases with the increase in the KCl content as well increase in FS content.

The liquid limit indirectly designates the compressibility of soil. Therefore, furthermore reduction in liquid limit with the addition of FS in the KCl treated soil stipulates the additional reduction in soil compressibility. Fig. 2, b shows that the plastic limit increases and decreases with the increase in the quantity of KCl and FS, respectively. In the case of KCl, the plastic limit is in-

creased by 25 %, whereas in the case of FS, it decreases by 12 %. A number of other studies used KCl and FS separately to stabilize expansive soil, and made similar observation [12–14, 26].

Fig. 2, c, d shows the affect of 1 % KCl on FS efficiency to improve LL and PL, respectively. Fig. 2, c depicts that the efficiency of FS to reduce the LL enhances due to the presence of KCl. In case of FS added soil, the LL initially decreases with increase in the FS and increase for any quantity greater than 10 %. However, LL reduces continuously, when FS was added along with KCl. However, the PL of soil treated with FS and KCl together always remains more than untreated soil and soil treated with FS alone (Fig. 2, d).

The effect of KCl and FS on PI of soil is shown in Fig. 3. Fig. 3, a shows that PI reduces significantly in both cases, but the efficiency of KCl is relatively more as compared to FS to reduce the PI of soil. The higher efficiency of KCl shows that it is relatively more flocculation than FS. It can be explained as the better ability of KCl solution to perform electrolytic behaviour where the ions can easily be imparted for better stability of soil grain surface charge.

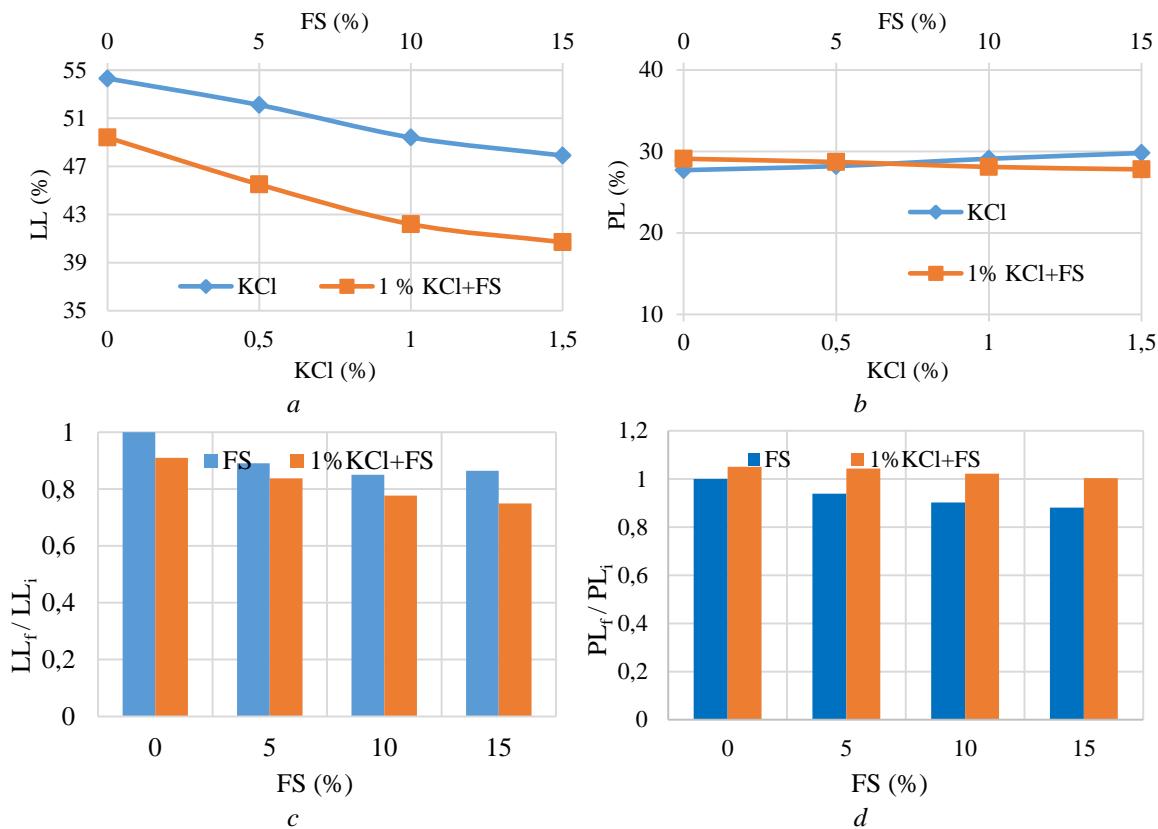


Fig. 2. Variation in Atterberg limit: a) LL with KCl and FS; b) PL with KCl and FS; c) distinct effect of FS and combine effect of KCl and FS on LL ratio; d) distinct effect of FS and combine effect of KCl and FS on LL ratio and on PL ratio

Рис. 2. Изменение предела Амтерберга: a) LL с KCl и FS; b) PL с KCl и FS; c) индивидуальное влияние FS и комбинированное влияние KCl и FS на отношение LL; d) индивидуальное влияние FS и комбинированное влияние KCl и FS на отношение LL и на отношение PL

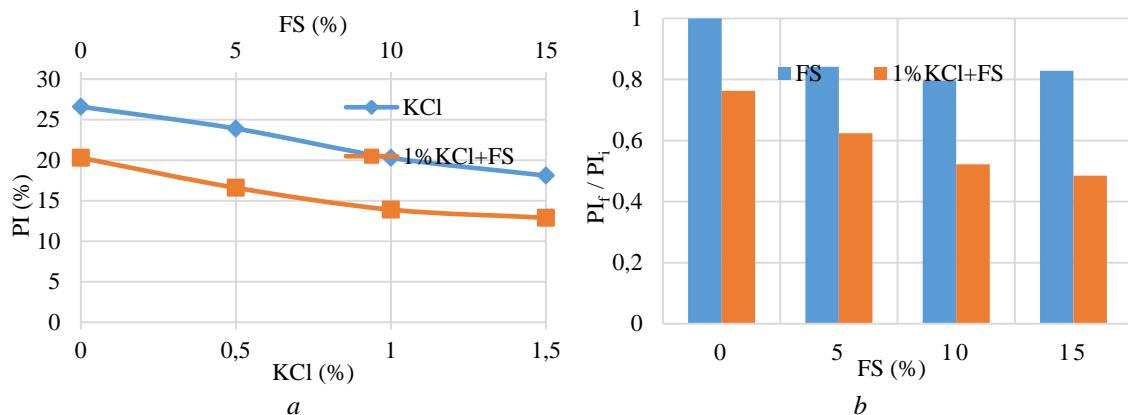


Fig. 3. Variation in plasticity index: a) with KCl and FS ; b) distinct effect of FS and combine effect of KCl and FS on PI ratio
Рис. 3. Изменение индекса пластичности: а) с KCl и FS ; б) индивидуальное влияние FS и комбинированное влияние KCl и FS на отношение PI

The addition of FS to KCl treated soil reduces the PI from the 14,7 to 11,2 % for FS content of 10 %, and furthermore, the addition of FS does not have any influence on PI of soil. The stabilized soil became low plastic with the addition of FS in KCl treated soil. Fig. 3, b shows a significant reduction in PI in case of KCl and FS added to soil as compared to the soil in which only FS was added. Presence of small amount of KCl increases the efficiency of FS approximately two times. In stabilized soil, FS acts as a diluent, and decreases LL. The presence of 1 % KCl in expansive soil increases the efficiency of FS significantly, which indicates the increase of diluent factor. Addition of coarser particles as additives decreases the thickness of diffused double layer and flocculation of clay particles and contributes to reduction of soil PI [27].

Effect on density and optimum moisture content

The effect of FS and KCl on soil dry density is presented in Fig. 4. The increase in maximum dry density is very nominal with the addition of KCl and FS. However, the increase in the density is comparatively more noteworthy in case of FS added soil due to the higher specific gravity of FS. Moreover, the FS particles are believed to form a dense cohesive matrix with the finer ones. The density increases due to change in soil gradation and a decrease in soil surface due to the addition of relatively coarser particle

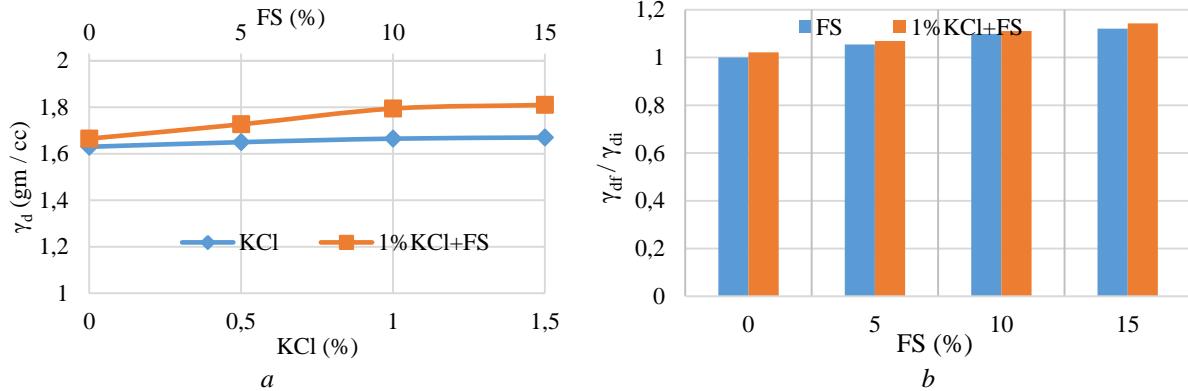


Fig. 4. Variation in maximum dry density: a) with KCl and FS ; b) distinct effect of FS and combine effect of KCl and FS on γ_d ratio
Рис. 4. Изменение максимальной сухой плотности: а) с KCl и FS ; б) индивидуальное влияние FS и комбинированное влияние KCl и FS на соотношение γ_d

of FS. It decreases the micro-pores in expansive soil and decreases water holding capacity of expansive soil [1, 29]. Therefore, there is a reduction in OMC, and it can be observed in Fig. 5. The OMC of soil is reducing with the increase of KCl. It also decreases with the addition of FS content in KCl added to the soil. The reduction in the OMC is quite significant when FS is added to KCl treated soil. Fig. 5, b shows that the change in OMC of soil is insignificant in FS-treated soil. However, the OMC reduced significantly when the soil is treated with KCl and FS together.

The affinity of soil for water reduces with the addition of KCl, and the addition of FS further reduces the ability of expansive soil to absorb moisture from the surroundings. This reduces the moisture content in the soil admixture matrix and causes a significant increase in the density of soil. Earlier studies found that the chemical reduces the thickness of water around the soil particles, which also helps in higher concentration and better packing of grains, and hence OMC reduces and density increases with the addition of chemicals [13]. The reaction between anions of additives and cations of soil creates a condition in which the small soil particles group together to the bulky particle, and it finally increases the density of soil. The decrease in concentration of cations in expansive soil causes the reduction in affinity of soil particles to water [30].

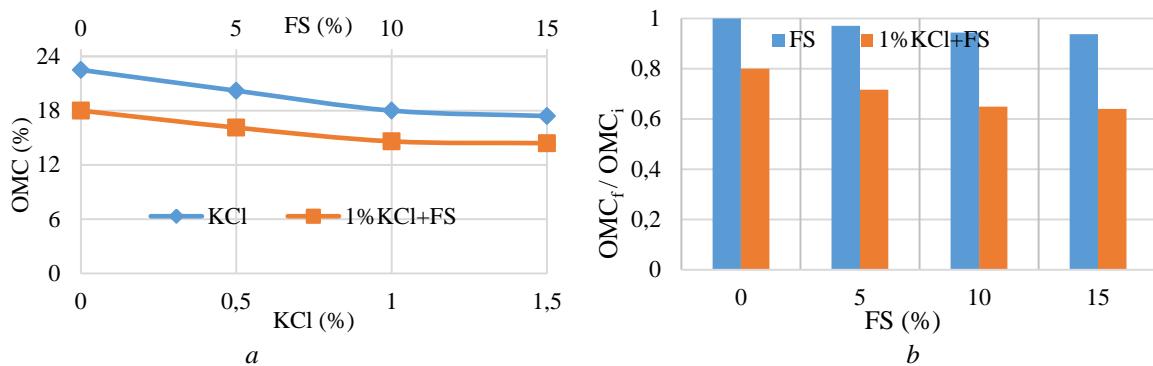


Fig. 5. Variation in optimum moisture content: a) with KCl and FS; b) distinct effect of FS and combine effect of KCl and FS on OMC ratio

Рис. 5. Изменение в оптимальном содержании влаги: a) с KCl и FS; b) индивидуальное влияние FS и комбинированное влияние KCl и FS на коэффициентом OMC

Effect on soil strength

The effect of KCl and FS on the strength of expansive soil is shown in Fig. 6. The strength of soil increases with an increase in KCl and FS quantity. The strength increases by the 1.3 times of the unaltered soil for the KCl content of 1.5 %. The addition of FS increases the strength of untreated soil by 2.4 times when added at 5 % of the soil content and beyond. However, the strength of the soil increases by 3.5 times after addition of FS with KCl. The strength of soil increases due to reduction in the thickness of double layer of water around the soil particles [1, 14, 29]. It causes the increase in shearing resistance between soil particles [28–31].

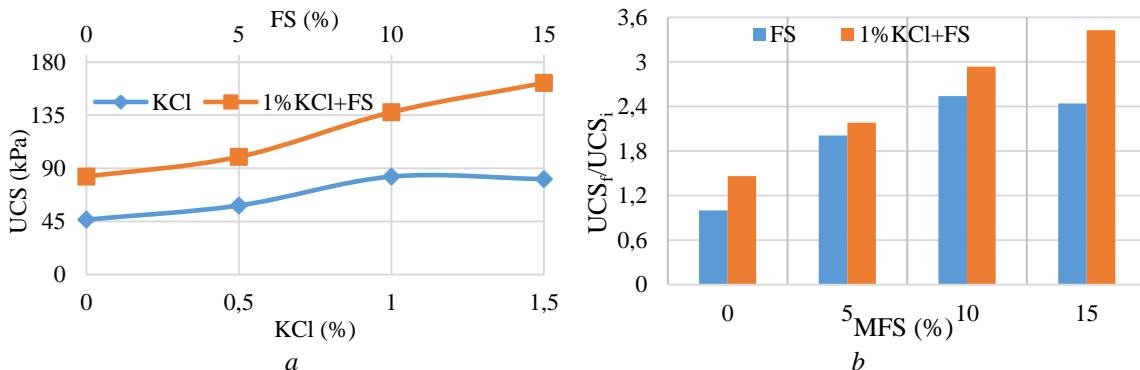


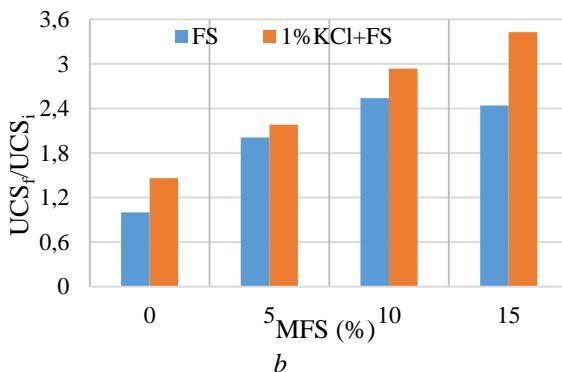
Fig. 6. Variation in unconfined compressive strength: a) with KCl and FS; b) distinct effect of FS and combine effect of KCl and FS on UCS ratio

Рис. 6. Изменение в неограниченной удельной работе разрыва: a) с KCl и FS; b) индивидуальное влияние FS и комбинированное влияние KCl и FS на коэффициентом UCS

Effect on soil differential free swell

The effect of FS and KCl on differential free swell (DFS) is presented in Fig. 7. The differential free swell of plain soil lies close to 80 %, which shows that the soil belongs to the very high expansive group [32]. Fig. 7, a shows that the differential free swell reduces significantly with an increase in KCl and FS quantity. However, the rate of decrease in the DFS is nominally higher in KCl as in solution form it has a better reactivity with the mineral content in the soil. Fig. 7, b shows that the addition of 1 % KCl increased the efficiency of FS significantly. The formation of cementitious leads to decrease of soil swelling [33, 34].

The distinct effect of potassium chloride on the strength of expansive soil is relatively small as compared to FS. However, a small amount of potassium chloride influences the efficiency of FS significantly (Fig. 6, b). It may be attributed to the competency of KCl to decrease the double layer repulsive force significantly [28]. Strength enhancement can also be noted due to FS alone seizes after 10 % concentration, but the same continues rising with the increasing content of FS when used in combination with KCl. It indicates the significance of using two different natures of additives to the soil.



The quantity of cementitious products increases with the increase of FS and KCl content. However, the rate of formation of the cementitious product reduces at higher contents of FS and KCl. Therefore, the differential free swell of the soil decreases with an increase in the amount of FS and KCl, but the rate of decrease in DFS reduces with an increasing amount of these additives. The DFS also decreases due to decrease in thickness of the diffused double layer of water due to the supply of cations by FS and KCl in the soil structure. It can be noted that the soil became low expansive after modification with KCl and FS as the DFS reduces to 50 % after treatment with KCl and further reduces to 25 % on the combined effect of both additives.

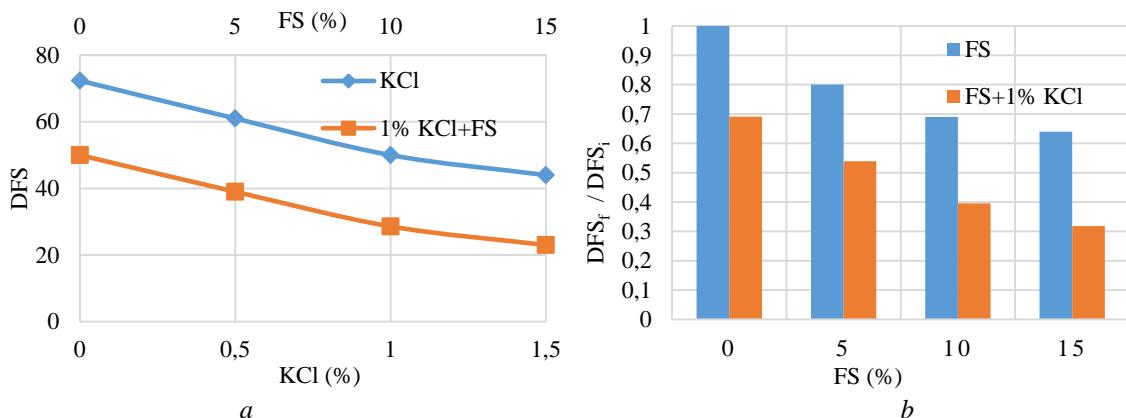


Fig. 7. Variation in differential free swell: a) with KCl and FS; b) distinct effect of FS and combine effect of KCl and FS on DFS ratio

Рис. 7. Различия в дифференциальной бесплатные отекать: а) с KCl и FS; б) индивидуальное влияние FS и комбинированное влияние KCl и FS на коэффициентом DFS

The addition of chemicals and FS causes cation exchange and flocculation of particles and consequently increases the strength of soil [1, 12–14]. The enhancement in strength of swelling soil might be observed due to reduction in plasticity of swelling soil (liquid limit and plasticity index). However, the overdose of chemicals and FS increases the cation concentration and reduces the efficiency of chemical and FS. It is also possible that the excess compound formation due to excessive addition of FS (content >10 %) would have caused the weakening of bonds between the soil particles and the formed cementitious compound as observed from the various previous studies [32, 34].

Predictive models

Nowadays, regression analysis is very popular in civil engineering to predict the influence of various parameters on soil properties. From the experimental study, it is observed that the liquid limit, plastic limit and compaction parameters are varying more or less linearly with change in FS content, while, plasticity index, unconfined compressive strength and free swelling are varying nonlinearly with the change in amount of FS. However, to accurately predict the variation in soil properties with addition of FS, the relationship between FS content and soil properties was assumed to be varying nonlinearly. The equation (1) was used to predict the modified soil properties due to FS addition. Though the equation (1) is nonlinear, it can be changed to linear equation by changing the form of equation (1) to equation (2).

$$\frac{\text{Index properties of treated soil}}{\text{Index properties of untreated soil}} = 1 \quad (1)$$

$$= A_0 + A_1(FS) + A_2(FS)^2 + \dots + A_n(FS)^n;$$

$$\frac{\text{Index properties of treated soil}}{\text{Index properties of untreated soil}} = 2 \quad (2)$$

$$= A_0 + A_1(FS_1) + A_2(FS_2) + \dots + A_n(FS_n).$$

Table 3 shows the predictive models, developed to predict various index properties of treated expansive soil with R^2 . These models use the index properties in dimen-

sionless forms as a ratio of initial value of index property for untreated soil (with a subscript 'i') to the final value of the same property after treatment (with a subscript 'f').

Table 3. Predictive models to predict the Index properties of soil

Таблица 3. Прогностические модели для прогнозирования индекса свойств почвы

| Index properties Свойства | KCl (%) | Model/Модель | R^2 |
|------------------------------|------------|--------------------------------|-------|
| LL_f/LL_i | 0 | $1-0.275(FS)+0.0012(FS)^2$ | 0,999 |
| | 1 | $0.91-0.0175(FS)+0.0004(FS)^2$ | 0,998 |
| PL_f/PL_i | 0 | $1-0.0031(FS)$ | 0,985 |
| | 1 | $0.98-0.0079(FS)$ | 0,951 |
| PI_f/PI_i | 0 | $1-0.04(FS)-0.002(FS)^2$ | 0,997 |
| | 1 | $0.75-0.034(FS)+0.001(FS)^2$ | 0,999 |
| MDD_f/MDD_i | 0 | $1+0.013(FS)-0.003(FS)^2$ | 0,999 |
| | 1 | $1.02+0.11(FS)-0.0001(FS)^2$ | 0,998 |
| OMC_f/OMC_i | 0 | $1+0.25(FS)-0.01(FS)^2$ | 0,998 |
| | 1 | $0.80-0.024(FS)^2+0.001(FS)$ | 0,991 |
| UCS_f/UCS_i | 0 | $1-0.04(FS)-0.002(FS)^2$ | 0,999 |
| | 1 | $1.43+0.16(FS)-0.001(FS)^2$ | 0,998 |
| FS_f/FS_i | 0 | $1-0.1(FS)+0.005(FS)^2$ | 0,998 |
| | 1 | $1.625-0.4(FS)-0.0012(FS)^2$ | 0,978 |

These models are developed using Microsoft excel. The coefficient of determination (R^2) was used as a criterion to define the best fit. The R^2 value close to 1 shows the good predictive capacity and 0 shows low predictive capacity. From Table 1, it can be observed that the R^2 value is ranging from 0,95 to 0,999, which shows good capacity of the developed model. However, a large number of tests are needed to be carried out in order to increase the reliability of the predictive model. The presented model may predict the variation in index properties for other expansive as well. However, there are chances that the accuracy might not be similar to the present case as the test are carried out on particular soil. This limitation can be omitted by carrying out the tests for other expansive soils with different plasticity.

Conclusions

The efficiency of FS increases with the presence of a small quantity of potassium chloride. The plasticity index,

flow index, liquid limit and OMC of potassium chloride treated expansive soil reduces significantly with the addition of FS. The plasticity of soil is reduced from high to low due to the combined effect of potassium chloride and FS. Potassium chloride is found to be more efficient in improving the Atterberg limits and reducing the optimum moisture content of the soil, whereas the FS is more efficient in improving the density and unconfined compressive strength of soil. The addition of potassium chloride alone increases the strength of soil by nearly 30 % of the initial strength of the soil. The addition of FS with KCl treated soil

results in increase in the strength to 300 % of untreated soil. The differential free swell of soil reduces to 50 and 25 % respectively for soils treated with FS alone and FS with KCl as compared to that of untreated soil. The efficiency of FS to modify the soil properties enhances with KCl addition to expansive soil. The significant improvement in soil behaviour supports the use of a small quantity of KCl with FS. Finally, based on experimental results, the predictive models are developed to determine the influence of FS on index properties of soil used in the present study.

REFERENCES

- Shukla R.P., Parihar N.S. Stabilization of black cotton soil using micro-fine slag. *Journal of the Institution of Engineers (India): Series A*, 2016 vol. 97, Iss. 3, pp. 299–306.
- Mohamed B., Mekhti D., Abdelhamid C.A. Method for predicting the deformation of swelling clay soils and designing shallow foundations that are subjected to uplifting. *Acta Geotechnica Slovenica*, 2016, vol. 13, Iss. 1, pp. 65–75.
- Wray W.K., Meyer K.T. Expansive Clay Soil. A widespread and costly geohazard. *Geo-Strata*, 2004, vol. 4, Iss. 4, pp. 24–28.
- Reddy N.G., Tahasildar J., Rao B.H. Evaluating the influence of additives on swelling characteristics of expansive soils. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 2015, vol. 1, Iss. 1, pp. 1–13.
- Buhler L.R., Cerato B.A. Stabilization of Oklahoma expansive soil using lime and class C flyash. *Problematic soils and rocks an in-situ characterization*, 2007, pp. 1–10.
- Emeh C., Igwe O. The combined effect of wood ash and lime on the engineering properties of expansive soils. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, vol. 10, Iss. 3, pp. 246–256.
- Show K.Y., Tay J.H., Goh A.T.C. Reuse of incinerator fly ash in soft soil stabilization, *Journal of materials in civil engineering*, 2003, vol. 15, Iss. 4, pp. 335–343.
- Anggraini V., Huat B.B.K., Asadi A., Nahazanan H. Relationship between the compressive and tensile strengths of lime treated clay containing coconut fibres. *Acta Geotechnica Slovenica*, 2015, vol. 12, Iss. 1, pp. 49–57.
- Ismaiel H.A.H. *Treatment and improvement of the geotechnical properties of different soft fine-grained soils using chemical stabilization*. PhD thesis. Germany, 2006. 171 p.
- Shukla R.P., Parihar N., Tiwari R.P., Agrawal B.K. Black cotton soil modification using sea salt. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, vol. 19, Iss. Y, pp. 8807–8816.
- Katti R.K., Kulkarni R.R., Radhakrishnan: research on expansive soils without and with Inorganic Additives. *Road Research Bulletin, Indian Roads Congress*, 1966, Iss. 10, pp. 1–97.
- Frydman S., Ravina I., Ehrenreich T. Stabilization of heavy clay with potassium chloride. *Geotechnical Engineering*, 1977, vol. 8, pp. 95–108.
- Al-Omari R., Ibrahim S., Al-Bayati I. Effect of potassium chloride on cyclic behavior of expansive clays. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, vol. 4, Iss. 2, pp. 231–239.
- Shukla R.P., Parihar N.S., Gupta A.K. Stabilization of expansive soil using potassium chloride. *Civil Engineering Journal*, 2018, vol. 12, Iss. 1, pp. 25–33.
- Patel B.K., Joshi N.H. *Fine Slag Cement Grout*. 5th Indian Young Geotechnical Engineers Conference. Vadodara, March 14–15, 2015, pp. 171–174.
- Madhya Pradesh land report*. Department of land Resource report, Govt. of India, Delhi. Available at: http://dolr.nic.in/dolr/downloads/spsp/Madhya%20Pradesh_SPSP.pdf (accessed 3 June 2020).
- Soil science and agricultural chemistry*. Available at: http://jnkvv.org/Departments/Dep_SoilScience_About.aspx (accessed 3 June 2020).
- Indian Standard, IS:2720 (Part-V)-1985: *Methods of test for soils: Part 5 Determination of liquid and plastic limit*. India, Bureau of Indian Standards, 2006.
- Indian Standard, IS:1498 (1970): *Classification and identification of soils for general engineering purposes*. India, Bureau of Indian Standards, 1970.
- Indian Standard, IS: 2720 (Part-VII)-1980: *Methods of test for soils: Part 7 Determination of water content-dry density relation using light compaction*. India, BIS, 2011.
- Indian Standard, IS: 4332 (Part-III)-1967 Edition 11: *Methods of test for stabilized soils: part 3 test for determination of moisture content dry density relation for stabilized soil*. India, BIS, 2010.
- Indian Standard, IS:2720 (Part X)-1991: *Methods of test for soils: Part 10 Determination of unconfined compressive strength*. India, BIS, 2010.
- Indian Standard, IS:2720 (Part XL)-1977: *Methods of test for soils: Part 40 Determination of free swell index of soils*. India, BIS, 2002.
- Srinivas M., Raju G.V.R.P. *Effect of strong chemicals on the swell properties of an expansive clay*. Indian Geotechnical Conference-2010, GEOTrendz. Mumbai, Maharashtra, India, December 16–18, 2010. pp. 613–616.
- Subramanyam L.S., Babu Y.G.G., Raju G.V.R.P. Evaluation of efficacy of chemical stabilizers on expansive soil. *International Journal of Current Engineering and Technology*, 2015, vol. 5, Iss. 6, pp. 3888–3895.
- Akinwumi I. Soil modification by the application of steel slag. *Periodica Polytechnica. Civil Engineering*, 2014, vol. 58, Iss. 4, pp. 371–377.
- Durotoye T.O., Akinmusuru J.O., Ogbije S.A., Bamigboye G. Effect of common salt on the engineering properties of expansive soil. *International Journal of Engineering and Technology*, 2016, Iss. 6 (7), pp. 233–241.
- Sivapullaiah P.V., Prashanth J.P., Sridharan A. Effect of fly ash on the index properties of black cotton soil. *Soils and foundations*, 1996, Iss. 36 (1), pp. 97–103.
- Akinwumi I., Ojuri O., Ogbije A., Booth C. Engineering properties of tropical clay and bentonite modified with sawdust. *Acta Geotechnica Slovenica*, 2017, vol. 14, Iss. 2, pp. 47–56.
- Mallela J., Quintus H.V., Smith K. *Consideration of lime-stabilized layers in mechanistic-empirical pavement design*. USA, The National Lime Assoc., 2004. 208 p.
- Venkatappa R.G., Rekhi T.S. Physico-chemical mechanism governing the plasticity behavior of soil, *Indian Geotechnical Journal*, 1977, vol. 7, Iss. 4, pp. 261–282.
- Snethen D.R. *A review of engineering experience with expansive soils in highway sub-grades*. Washington, DC, Interim Report, FHWA, 1975. 20590.
- Mohan D., Goel R.K. Swelling pressures and volume expansion in Indian black cotton soils. *Journal of the Institution of Engineers (India): Series A*, 1959, vol. 40, Iss. 2, pp. 58–62.
- Bell F.G. Stabilisation and treatment of clay soils with lime. Part 1 – Basic principles. *Ground Engineering*, 1988, vol. 21, Iss. 1, pp. 10–15.

Received: 16 June 2020.

Information about the authors

Rajesh P. Shukla, PhD, assistant professor, Adani Institute of Infrastructure Engineering.

Niraj S. Parihar, M. Tech, assistant professor, Jaypee University of Information Technology.

Ashok K. Gupta, PhD, professor, head of department, Jaypee University of Information Technology.

УДК 624.139.22:625.066/068:661.42:546.32

ВЛИЯНИЕ ХЛОРИДА КАЛИЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ МЕЛКОГО ШЛАКА, ИСПОЛЬЗУЕМОГО ДЛЯ ОБРАБОТКИ ДОРОЖНЫХ ПОЧВ

Шукла Раджеш Прасад¹,
rpshukla.2013@iitkalumni.org

Парихар Нирадж Сингх²,
singhpariharniraj@gmail.com

Гупта Ашок Кумар²,
ashok.gupta@juit.ac.in

¹ Департамент гражданского строительства и инженерной инфраструктуры,
Институт инженерной инфраструктуры Адани,
Ахмедабад, 382427, Индия

² Строительный факультет, Университет информационных технологий им. Джайпи,
Вакнахат, Химанчал Прадеш, 173234, Индия

Представлены результаты предварительного исследования, проведенного для определения влияния небольшого количества хлорида калия (KCl) на эффективность мелкого шлака, используемого для обработки обширных почв. Количество KCl варьировалось от 0,5 до 1,5 %, в то время как количество мелкого шлака варьировалось от 5 до 15 % от веса почвы. Установлено, что пластичность и дифференциальное свободное набухание почвы снижается при добавлении KCl, а также мелкого шлака. KCl более компетентен в снижении пластичности и набухания почвы по сравнению с мелким шлаком. Увеличение прочности и максимальной сухой плотности относительно велико в случае с мелким шлаком по сравнению с KCl, добавленным в почву. Эффективность мелкозернистого шлака для изменения свойств обширного грунта значительно возрастает в присутствии небольшого количества KCl. Прогнозные модели также разрабатываются, чтобы выяснить улучшенные свойства обширной почвы.

Ключевые слова:

Хлорид калия, мелкий шлак, экспансивная почва, индексные свойства, неограниченная прочность на сжатие.

Информация об авторах

Шукла Р.П., доктор философии, доцент, Институт инженерии инфраструктуры Адани.

Парихар Н.С., M. Tech, доцент, Университет информационных технологий им. Джайпи.

Гупта А.К., доктор философии, профессор, заведующий кафедрой, Университет информационных технологий им. Джайпи.

ПЕРСПЕКТИВЫ ТИПИЗАЦИИ ЗАПАСОВ УГЛЕЙ ДЛЯ ЕДИНОГО УЧЕТА

Охотников Константин Владимирович,
Ohotnikow@mail.ru

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, Томск, ул. Ленина, 30.

Актуальность. Исследование проблем и существующих предпосылок в создании единого учета угольной массы в виде запасов в недрах, сырья при добыче и товара при реализации показало допустимость решения данной задачи. Единый учёт позволит достоверно оценивать ресурсный потенциал угольных бассейнов и отдельных недропользователей, делая его открытым и понятным для международных инвестиций. С другой стороны, устраняется несогласованность в государственном регулировании налогообложения за пользование недрами.

Цель: предложить подход к формированию единой классификации углей для типизации запасов.

Объекты: месторождения каменного, бурого угля и антрацита. Апробация проводилась на углях разного марочного состава действующих участков угольной компании «Ресурс», расположенных в Ерунаковском, Прокопьевско-Киселевском геолого-экономических районах. Предлагаемый подход опирается на существующую нормативную базу стандартов стран СНГ, в частности ГОСТ 25543-2013.

Методы: сравнительный анализ существующих подходов классификации углей, применение марок, технологических групп и направления использования как критерии для типизации запасов.

Результаты. Показана проблема понимания глубокой переработки как критерия оценки ценности углей, необходимость внесения данного критерия в виде требования для правильного проведения геологоразведочных работ, направленных на выявление и оконтуривание углей с различными технологическими свойствами. Данный критерий, наряду с другими показателями ценности угольного сырья, необходим для деления углей по типам в зависимости от глубокой их переработки. Даны рекомендации по ранжированию углей на основе технологических групп, и представлена типизация запасов углей. Дифференциация угольных запасов по направлениям использования углей, как критерий оценки, обеспечивает правильное обоснование и проектирование разведки в границах лицензионного участка.

Ключевые слова:

Бурые угли, каменные угли, антрациты, типизация, марки, бренды, налогообложение, критерии ценности.

Введение

На мировом рынке в настоящее время сложилась неблагоприятная обстановка, связанная с устойчивым падением цен на уголь. У большинства отечественных добывающих компаний это обстоятельство приводит к значительному экономически неоправданному снижению себестоимости угольной продукции.

Отметим, что эти проблемы коснулись не всех участников рынка, поэтому указанные трудности по-разному отразились на экономике угледобывающих предприятий. В частности, угольные компании, которые добывают востребованные технологические, коксующиеся угли либо отгружают подготовленную угольную продукцию с высокими показателями качества, не так остро ощутили изменения цены и спроса на свою продукцию [1, 2].

Получается, что рынок стимулирует производителей угля реализовывать ценное угольное сырье с выдержаным качественным составом при наличии та-ковых в недрах, а при их отсутствии готовить ликвидную угольную продукцию с заданными параметрами качества. В мире на биржевых площадках идет торговля брендами, под которыми понимается определенный набор качественных характеристик, а также, как правило, привязка к географическому объекту, угольной компании. А это значит, что в ценообразовании чувствуют репутационные риски, надежность качественной продукции, понимание объемов затрат на глубокую переработку.

Конечно, отечественные компании, прежде чем стать участником международной торговли, проходят международные оценки разными методами: JORC, CRIRSCO и другие. По ним выявляются слабые места в ресурсной обеспеченности предприятия устойчивым качеством товара. В связи с этим возникает вопрос: почему наша государственная система внутренней оценки угольного сырья не способна выявить его ценность, определить уголь в соответствии с международной номенклатурой, выступить в качестве организатора единого учета углей для недр, налогов, биржи?

Проблема вполне очевидна – нет критерии ценности угольного сырья и единого подхода к созданию классификаций, определяющих направления использования углей (табл. 1). Несогласованность существующих классификаций освещалась в разных геологических изданиях [3–7], но обозначенная проблема затрагивает существующую типизацию запасов.

Рассмотрим основные подходы к классификации углей, представленные в табл. 1. Основным классификатором разделения углей по маркам является ГОСТ 25543-2013 [8], а с 2011 г. он еще стал регулятором ценности углей, т. к. на него опирается классификация углей по налогообложению. Видно, что существующие классификации для разделения углей в различных системах учета имеют ряд несоответствий.

Во-первых, не согласуются марки в рекомендуемых направлениях использования ГОСТ 25543-2013. Более того, сами направления использования звучат

некорректно, например, что за направление «производство строительных материалов» или «прочие».

Во-вторых, отсутствуют основания для выделения в классификации по налогам вида «уголь за исключе-

нием антрацита, коксующегося, бурого, ценные коксующиеся», и это не согласуется с рекомендуемыми ГОСТ 25543 направлениями использования.

Таблица 1. Классификация углей

Table 1. Coal classification

| Вид систематизации Type of systematization | ГОСТ (SS) 25543-2013 | Постановление № 429 о налогообложении Tax Ordinance No. 429 | | | Государственный баланс запасов State balance of stocks | | Предлагаемая типизация Suggested typing | | | |
|---|---|--|---|---|--|---|--|--|---|--|
| Критерии деления Division criteria | По направле- ниям исполь- зования By directions of use | Марка Mark | Вид угля Type of coal | Марка Mark | Налого- вая ставка Tax rate | Виды запасов Kind of stocks | Марка Mark | Типы запасов Stock types | Марка Mark | Технологи- ческие группы Technology groups |
| Наименование позиций Name of positions | Коксование Coking | ДГ, Г, ГЖО, ГЖ, Ж, КЖ, К, КО, КСН, КС, ОС, ТС | Уголь коксую- щийся Coking coal | ГЖО, ГЖ, Ж, КЖ, К, КО, КС, ОС | 57 | ценные коксующиеся valuable coking | ГЖ, Ж, КЖ, К, ОС | коксообра- зующие coke- forming | ГЖ, Ж, КЖ, К, КО, ОС | 1ГЖ, 2ГЖ, 2Ж, КЖ, 1К, 2К, 1КО, 2КО, 1ОС |
| | Технологиче- ские и энер- гетические цели Technological and energy goals | Б, Д, СС, Т, А | Антрацит Anthracite | А | | 47 | антрацит anthracite | А | технологи- ческие technolo- gical | 2Г, 1ГЖО, 2ГЖ О, 1Ж, 1КС, 2КС, 2ОС, 1А, 2А, 3А |
| | Производство строительных материалов и прочие Production of building materials and other | Б, Д, ДГ, Г, ГЖО, ГЖ, Ж, К, КСН, КС, ТС, СС | Уголь, за исключени- ем антраци- та, угля коксующе- гося и угля бурого Coal, excluding anthracite, coking coal and brown coal | Д, ДГ, Г, КСН, ТС, СС, Т | 24 | энергетиче- еские energy | Д, ДГ, Г, ГЖО, КСН, КО, ТС, СС, Т | топливные fuel | Б, Д, ДГ, Г, КСН не удовлетво- ряют глу- бокой переработке do not satisfy deep processing | 3Б, Д, ДГ, 1Г, 1ГЖО, 2ГЖО, КСН |
| | | ТС, СС | Уголь бурый Brown coal | Б | | 11 | Бурые brown | Б | | 1Б, 2Б, ТС, СС, Т |

Такой порядок не понятен за рубежом, и международные инвесторы вынуждены проводить международную оценку каждого предприятия. Таким образом, очевидно, что давно назрела острая необходимость в создании универсальной классификации для единого учета угля. По мнению автора, основным критерием ценности для углей должно стать направление их использования для глубокой переработки.

В международной практике в основе деления углей лежит дифференциация по типам переработки: *hardcoking coal* (*HCC*), *semi-softcoking coal* (*SSCC*), *pulverized coal for injection* (*PSI*), *thermal coal*. По этому критерию они становятся товарными брендами с узкими колебаниями определяющих для глубокой переработки значимых параметров качества угля [9]. Например, в табл. 2 показаны некоторые бренды и их параметры на рынке углей Австралии.

Из неё видно, что введение новой классификации твердых полезных ископаемых (ТПИ) при существующей несогласованности классификаций, ГОСТ 25543 с налогами на добычу полезных ископаемых (НДПИ) и Государственным балансом запасов (ГБЗ), а также отсутствие единого критерия ценности –

направления использования углей – добавит противоречий в понимании угольных запасов, но главное – обострит взаимоотношения между государством и недропользователем.

Таблица 2. Мировая практика торговли брендами углей на примере Австралии [10]

Table 2. World practice of trade in coal brands on the example of Australia [10]

| Бренд/Brand | <i>HCC</i> | <i>SSCC</i> | <i>PSI</i> |
|---------------------------------------|------------|-------------|------------|
| Зола/Ash, % | 10,5 | 9,25 | 8,5 |
| GAD, ккал/кг | – | – | 7800 |
| HGI | – | – | 78 |
| CSR, % | 74 | – | – |
| Летучие/Volatile VM, % max | 20,7 | 34 | 13 |
| Влага/Moisture, ТМ | 9,5 | 9,5 | 10 |
| Сера/Sulfur, % max | 0,6 | 0,58 | 0,55 |
| Фосфор/Phosphorus, % max | 0,03 | 0,025 | – |
| Фиксированный углерод/Fixed carbon, % | – | 53 | – |
| Общий углерод/Carbon, % | – | – | 90,5 |
| Макс текучесть/Maximum fluidity | 400 | 200 | – |
| Индекс свободного вспучивания CSN/FSI | 8,5 | 5,5 | – |
| Витринит/Vitrinit, % | 71 | – | – |
| <i>Ro</i> , max | 1,42 | – | – |
| Крупность/Coarseness, мм max | 50 | – | – |

В современных условиях единственное, на что ориентируется продавец угля, – это контракты и договора с установленными ограничениями по показателям качества. Как это сделать, чтобы соответствовать государственному учету? Он вынужден подстраиваться различными доступными способами.

По мнению автора, решение проблемы должно идти по двум направлениям. Первое – это выверенная и надёжная оценка полезного ископаемого в недрах. Для этого необходимо пересмотреть основные принципы ведения геологоразведочных работ на угольных месторождениях, которые представляют собой раскрыку в виде лицензионных участков. Оценка свойств и качества углей пластов больше нацелена на получение высоколиквидного товара.

Второе – решить проблему по вводу критерии ценности и параметров углей в недрах, и один из них – это направление использования углей для глубокой переработки, обуславливающий типизацию запасов. Только ввод целевых параметров, определяющих однозначную принадлежность к конкретному направлению глубокой переработки, гарантирует правильное дифференцирование углей и применение ценности запасов в качестве инвестиционного инструмента.

Создание системы учета запасов каменного угля является продолжением развития методической базы угольной отрасли. За прошедший период многочисленными советскими институтами создавались методики исследований, государственные стандарты и классификации по углям, которые ориентировались на угли конкретных бассейнов [11]. Создание бассейновых стандартов для установления направления использования углей в современных условиях стали источником их несогласованности по типизации углей, например, появились энерготехнологические угли (Печорский и Восточные бассейны), но они почему-то не выделены в Кузбассе наряду с коксующимися и энергетическими углами [12].

Ранее ГОСТ 8162-79 объединял бассейновые стандарты для выделения коксующихся углей и являлся главным для определения направления использования в сравнении с другими стандартами. В настоящее время угли гумусового происхождения также систематизированы по маркам (ГОСТ 25543), но дополнительно выделяются технологические группы и подгруппы. Разработчики стандарта предполагали, что марки способны отражать однотипность углей в классификации, образуя чёткую систему для понимания и использования, а в целом отражать уровень унификации углей для учёта запасов, переработки (сыревая угольная база) и налогообложения (экономический учёт за пользование недрами) [13].

Практика показала, и это отмечено многими учёными [7, 14–16, 20], что ГОСТ 25543 оказался в этой части не доработан и по маркам рекомендуемые направления использования углей не всегда соответствуют реальным условиям рынка. Обоснованно установлено, что это является скрытой причиной несовершенства методического обеспечения геологоразведочных работ [17, 18].

Отметим, что в работах [3–7, 14, 18], авторы опирались на особенности условий образования углей. Исходя из этого были предопределены основные виды глубокой переработки:

- 1) коксование (слоевое и кусковое);
- 2) металлургическое производство (пылеугольное топливо (ПУТ), восстановление);
- 3) индустрия и энергогенерация (неметаллургическое производство, электростанции);
- 4) топливное хозяйство (коммунальный сектор).

Видно, что выявление технологических свойств, в частности коксаемости, и коксующей способности является приоритетным по отношению к другим свойствам. В связи с этим необходимы критерии ценности и параметры для выделения среди коксующихся углей: *коксообразующих* и *технологических* углей, среди энергетических углей – *энерготехнологических* и *топливных* углей. Для этого задействуются существующие параметры деления углей по классу, типу и подтипу и на их основе предлагается следующий подход унификации углей для типизации запасов. Но основной упор при ранжировании углей для указанной цели делается на их деление по технологическим группам (табл. 3).

Таблица 3. Ограничительные величины для типизации запасов

Table 3. Limit values for typing coal reserves

| Класс Class, R_0 , % | Тип Type, V_{draf} , % | Подтип Subtype, у, мм | Технологиче- ские группы Technology groups | Марочный состав запасов Brand composition of stocks |
|----------------------------------|--------------------------------|------------------------------|---|--|
| 08–10 11–14 | 30–36 20–30 | 18–26 10 и выше | 1ГЖ, 2ГЖ, 2Ж, КЖ, 1К, 2К, 1КО, 2КО, 1ОС | Коксующиеся (коксообразующие) Coke-forming ГЖ, Ж, КЖ, К, КО, ОС |
| 06–07 08–09 11–13 14–19 | 36–40 13–17 16–28 | 13–17 08–09 | 2Г, 1ГЖО, 2ГЖО, 1Ж, 1КС, 2КС, 2ОС | Коксующиеся (технологические) Technological Г, ГЖО, Ж, КС, ОС |
| 09 и ниже 10 и выше | | 12 и ниже 07 и ниже | Д, ДГ, 1Г, 1ГЖО, 2ГЖО, КСН, ТС, СС, Т | Энергетические Д, ДГ, Г, КСН, ТС, СС, Т – энерготехнологические Energytechnology (зола, серы, фосфор, азот) – топливные/fuel coal |

В этом случае в коксующихся углях выделяются коксообразующие и технологические угли, а в энергетических углях – энерготехнологические и топливные. При таком подходе *класс*, *тип* и *подтип* углей, по сути, становятся *качественными кондициями* для деления запасов по типам: коксующиеся и энергетические угли, и группам: коксообразующие, технологические, энерготехнологические и топливные (табл. 4). То есть данные критерии увязываются с основными направлениями глубокой переработки.

Таким образом, применение технологической систематизации показывает путь решения проблемы единого деления углей по направлению глубокой переработки. Решив ее, можно на этой основе разработать требования для проведения геологоразведочных работ, направленных на выявление и оконтуривание углей с различными технологическими свойствами.

Таблица 4. Номенклатура запасов для учёта [7]

Table 4. Stock inventory for accounting [7]

| | | |
|----------------------------------|------------------------------|---|
| Коксующиеся Coking | Вид запасов Kind of stock | Энергетические Energy |
| Коксообразующие Coke forming | Тип запасов Type of stock | Энергетоэнергетические Energy technology |
| Технологические Technological | | Топливные/Fuel |

Лицензионное районирование угольных залежей отличается от площадного деления, направленного на поиск и выделение ценных коксующихся углей в прошлом столетии. Разведка происходила в следующей последовательности: установление марки на месторождении, затем, по возможности, выделение марочных границ по пластам и только на прилегающих участках прирезки к шахтам или разрезам выделялись технологические группы углей (т. е. сортность) после полузаводского коксования.

Лицензирование участков под разработку – это разделение месторождения для действующих угольных компаний. Здесь также требуется проведение локальной разведки для подтверждения марки одновременно с выделением технологических свойств, которые обуславливают сортность углей.

Отметим, площадная методика разведки не предполагала выделения марочных блоков и технологических групп, потому что её основная задача – марочное районирование месторождений и бассейнов с выделением коксующихся углей для нужд коксохимического производства Министерства черных металлов

СССР. В связи с этим редко выходили на запасы категории В, которые касались в основном коксующихся углей [19, 20].

Эти подходы нашли отражение в современной нормативной документации, регламентирующей методику разведки каменных углей с последующим подсчётом запасов. Она не претерпела особых изменений, что стало проблемой частого неподтверждения марочного состава и технологических свойств углей пластов на стадии эксплуатации при движении запасов и переходе ископаемого угля в угольную продукцию и в объект налогообложения [21].

По мнению автора, в методических документах не просматривается алгоритм действий, включающий:

- систематизацию углей по технологическим группам;
- определение количества точек с достоверными данными по результатам предыдущей разведки;
- порядок заложения новых точек в разведочной сети для выделения марочных блоков;
- последовательность их увязки с подсчётыми блоками на основе корреляционных связей геологических факторов и маркирующих классификационных параметров, по которым устанавливаются градиенты их изменения в углях пластов по простирианию, падению и в разрезе угленосной толщи.

Вышеизложенное можно обобщить в виде составных частей решения проблемы в создании единого учёта (рисунок).

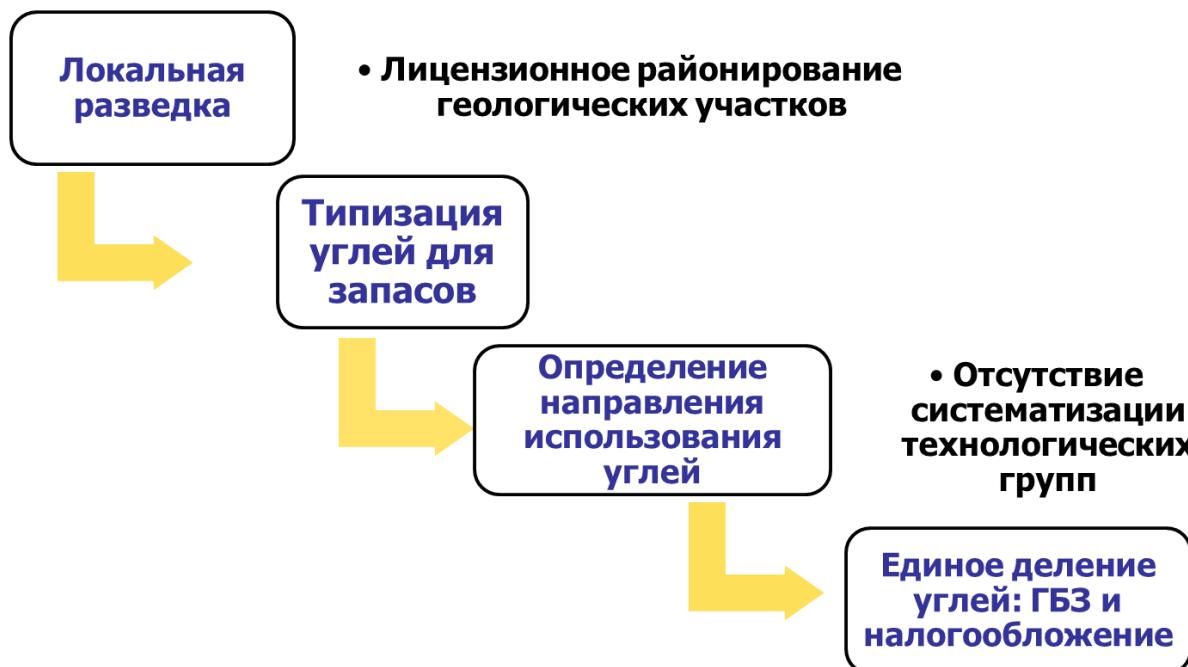


Рисунок. Составные части единого учета углей и проблемы для решения

Figure. Components of a unified coal accounting and problems to solve

Заключение

Обозначены проблемы, решение которых предлагаемым подходом даёт продвижение по урегулированию производственно-экономических отношений

между государством и недропользователем. Данный подход увязывается с новыми требованиями новой классификацией твердых полезных ископаемых в части категорийности запасов и их ранжирования.

Деление угольных запасов по *направлениям использования углей*, применяемого как критерия оценки, обеспечивает правильное обоснование и проектирование разведки в границах лицензионного участка.

Выполнение данных условий обеспечит:

- достоверное выделение марочных блоков, а в них установление технологических границ;
- существующий марочный подсчёт запасов, характеризуемый как учёт природных типов углей, опирается на марочные блоки, которые увязываются с категорией геологической изученности,

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Таразанов И.Г., Губанов Д.А. Итоги работы угольной промышленности России за январь–сентябрь 2019 года // Уголь. – 2019. – № 12. – С. 40–48.
2. BP Statistical Review of World Energy June 2015 // Coal. – 2015. URL: <https://www.resourcADATA.org/dataset/rgi-bp-statistical-review-of-world-energy-2015> (дата обращения: 19.09.2019).
3. Иванов В.П. Промышленно-энергетическая классификация углей для типизации запасов // Недропользование XXI век. – 2015. – № 5. – С. 116–123.
4. Иванов В.П., Охотников К.В. Особенности выделения технологических групп в марках при подсчёте запасов углей // Разведка и охрана недр. – 2017. – № 6. – С. 42–48.
5. Иванов В.П. Промышленно-энергетическая классификация для оценки рационального использования углей // Известия вузов. Физика. – 2015. – № 7. – С. 104–111.
6. Bielowicz B.A. New technological classification of low-rank coal on the basis of Polish deposits // Fuel. – 2012. – V. 96. – P. 497–510.
7. Иванов В.П., Торгунаков А.А., Охотников К.В. Роль промышленно-энергетической классификации ископаемых углей в новой классификации геологических запасов ТПИ // Недропользование XXI век. – 2017. – № 6. – С. 104–112.
8. ГОСТ 25543-2013. Угли бурые, каменные и антрациты. Классификация по генетическим и технологическим параметрам. – М.: Стандартинформ, 2014. – 18 с.
9. Mazumder B. Coal structure and classification // Coal Science and Engineering. – 2012. – P. 76–99.
10. Specifications guide Metallurgical coal // S&P Global Platz-2019, November – P. 6. URL: https://www.spglobal.com/platts/plattscontent/_assets/_files/en/our-methodology/methodology-specifications/metcoalmethod.pdf (дата обращения 11.12.2019).
11. Методические рекомендации по применению Классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов твёрдых горючих ископаемых. Угли и горючие сланцы. URL: http://gkz-rf.ru/sites/default/files/docs/met_rek_tpi_teo_ugli.pdf (дата обращения 19.09.2019).
12. Юзвицкий А.З. Методика разведки угольных месторождений Кузнецкого бассейна. – Кемерово: Книжное издательство, 1978. – 235 с.
13. Ercegovac M. Genetic-industrial classification of brown coals in Serbia // Int. J. Coal Geol. – 2006. – V. 68. – Iss. 1–2. – P. 39–56.
14. CIM Standing Committee on Reserve Definitions. Adopted by CIM Council, November 14, 2004. URL: http://www.cirisco.com/cim_definition_standards_2010.pdf (дата обращения 19.09.2019).
15. JORC standard and access to global financial markets. Overview and practical aspects. URL: <http://geomar.ru/articles/mineral-resources/403-jorc-codex-and-classification-mineral-resources.html> (дата обращения 19.09.2019).
16. Еремин И.В., Броновец Т.М. Марочный состав углей и их рациональное использование: справочник. – М.: Недра, 1995. – 254 с.
17. Охотников К.В., Иванов В.П. Роль опорных точек разведочной сети и достоверность оценки свойств и качества углей пластов // Разведка и охрана недр. – 2018. – № 6. – С. 21–25.
18. Охотников К.В. Влияние классификации угольных запасов на формирование сырьевой базы добывающего предприятия // Кокс и химия. – 2019. – № 9. – С. 8–12.
19. Кодекс Австралии для составления отчётов о результатах геологоразведочных работ, минеральных ресурсах и рудных запасах (Кодекс JORC). Подготовлен Объединённым Комитетом по Запасам Института Горной Промышленности и Металлургии Австралии, Австралийским Институтом Наук о Земле и Советом по Полезным Ископаемым Австралии (JORC). – 2014. URL: <https://imcmontan.ru/files/jorc.pdf> (дата обращения 19.09.2019).
20. Хрусталёва Г.К., Ерёмин И.В., Броновец Т.М. Качество и направление использования углей. Принципы современной промышленной классификации углей // Угольная база России. – М.: Геоинформмарк, 2004. – Т. 1. – С. 353–357.
21. Mineral Reserves Reporting Standards. URL: <http://technology.infomine.com/reviews/report-ingstandards/welcome.asp?view=full>. (дата обращения 11.07.2019).

тем самым контролируется степень готовности запасов к проектированию и разработке по группам или отдельным маркам углей.

- предлагаемый учёт запасов по технологическим группам, характеризуемый как учёт сортности углей, позволяет вести учёт движения запасов углей в недрах при формировании сырьевой базы их добычи и переработки и объективного определения объёмов налогов за пользования недрами, что в конечном счёте и есть единый учёт для эффективного освоения недр.

Поступила 16.01.2020 г.

Информация об авторах

Охотников К.В., аспирант отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 552.574

PROSPECTS OF COAL RESERVES TYPIFICATION FOR CONSOLIDATED RECORDING

Konstantin V. Ohotnikov,
Oxotnikow@mail.ru

National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

Relevance. Investigation into the issues and existing prerequisites for development of a system of consolidated recording of the bulk of coal in the form of the reserves in place, the mined raw material and the goods to be sold proved the implementability of the task. The consolidated recording will facilitate a proper assessment of the country's resource potential, as well as that of individual mineral developers, making it transparent and comprehensive for international investors. On the other hand, the recording eliminates the discrepancies in the governmental regulation of taxes imposed for the use of subsoil.

The aim of the research is to offer an approach to development of a consolidated classification of coals for the typification of reserves.

Objects: the fields of mineral, brown and anthracite coal. The approbation was performed using coal of different grade compositions mined by «Resurs» Company from the existing mine sites located in Ernakovsky and Prokopievsk-Kiselevsk geological and economic districts. The approach offered is based on the existing regulatory frame work containing the standards used in the CIS countries, including GOST 25543-2013.

Methods: comparative analysis of the existing approaches to coal classification, use of grades, process groups and types of usage as the criteria for typification of reserves.

Results. The paper demonstrates the issues of understanding the advanced processing as the criterion for evaluation of coals and the need to introduce it as a requirement for proper performance of geological prospecting intended to identify and outline the coals having different process properties. The criterion, as well as other indicators of coal value, is required to typify coals depending on the degree of their processing. The paper contains recommendations on rating of coals based on process groups, as well as the typification of coal reserves. The division of coal reserves by areas of coal use, applied as an evaluation criterion, provides the correct justification and design of exploration within the boundaries of the licensed area.

Key words:

Brown coal, mineral coal, anthracite coal, typification, grades, brands, taxation, criteria of value.

REFERENCES

1. Tarazanov I.G., Gubanov D.A. *Itogi raboty ugolnoy promyshlennosti Rossii za yanvar–sentyabr 2019 goda* [The results of the coal industry of Russia for January–September 2019]. *Coal*, 2019, no. 12, pp. 40–48.
2. BP Statistical Review of World Energy June 2015. *Coal*, 2015, Available at: <https://www.resourcADATA.org/dataset/rgi-bp-statistical-review-of-world-energy-2015> (accessed 19 September 2019).
3. Ivanov V.P. Industrial and energy classification of coal for typing reserves. *Subsoil use XXI century*, 2015, no. 5, pp. 116–123. In Rus.
4. Ivanov V.P., Okhotnikov K.V. Osobennosti vydeleniya tekhnologicheskikh grupp v markakh pri podschete zapasov ugley [Features of allocation of technological groups in brands when calculating coal reserves]. *Razvedka i okhrana nedr*, 2017, no. 6, pp. 42–48.
5. Ivanov V.P. Promyshlennno-energeticheskaya klassifikatsiya dlya otsenki ratsionalnogo ispolzovaniya ugley [Industrial and energy classification to assess the rational use of coal]. *Izvestiya vuzov. Fizika*, 2015, no. 7, pp. 104–111.
6. Bielowicz B.A. New technological classification of low-rank coal on the basis of Polish deposits. *Fuel*, 2012, vol. 96, pp. 497–510.
7. Ivanov V.P., Torgunakov A.A., Okhotnikov K.V. The role of industrial and energy classification of fossil coals in the new classification of geological reserves of TPI. *Subsoil use XXI century*, 2017, no. 6, pp. 104–112. In Rus.
8. GOST 25543-2013. *Ugli burye, kamennye i antratsity. Klassifikatsiya po geneticheskim i tekhnologicheskim parametram* [State Standard 25543-2013. Coals are brown, stone and anthracite. Classification by genetic and technological parameters]. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 18 p.
9. Mazumder B. Coal structure and classification. *Coal Science and Engineering*, 2012, pp. 76–99.
10. Specifications guide Metallurgical coal. *S&P Global Platz-2019, November*. pp. 6–8. Available at: https://www.spglobal.com/platts/plattscontent/_assets/_files/en/our-methodology/methodology-specifications/metcoalmethod.pdf (accessed 11 December 2019).
11. Guidelines for the application of the Classification of reserves of deposits and forecast resources of solid fossil fuels. *Coals and oil shale*. Available at: http://gkz-rf.ru/sites/default/files/docs/met_rek_tpi_teo_ugli.pdf (accessed 19 September 2019).
12. Yuzvitsky A.Z. *Metodika razvedki ugolnykh mestorozhdeniy Kuznetskogo basseyna* [Methodology of exploration of coal deposits of the Kuznetsk basin]. Kemerovo, Knizhnoe izdatelstvo Publ., 1978. 235 p.
13. Ercegovac M. Genetic-industrial classification of brown coals in Serbia. *Int. J. Coal Geol.*, 2006, vol. 68, Iss. 1–2, pp. 39–56.
14. CIM Definition Standards on Mineral Resources and Mineral Reserves. Prepared by the CIM Standing Committee on Reserve Definitions. *Adopted by CIM Council*, November 14, 2004. 185 p. Available at: http://www.cirrco.com/cim_definition_standards_2010.pdf (accessed 19 September 2019).
15. *JORC standard and access to global financial markets. Overview and practical aspects*. <http://geomar.ru/articles/mineral-resources/403-jorc-codex-and-classification-mineral-resources.html> (accessed 19 September 2019)
16. Eremin I.V., Bronovets T.M. *Marochny sostav ugley i ikh ratsionalnoe ispolzovanie: spravochnik* [The vintage composition of coal and their rational use: reference book]. Moscow, Nedra Publ., 1995. 254 p.
17. Okhotnikov K.V., Ivanov V.P. Rol opornykh tochek razvedochnoy seti i dostovernost otsenki svoystv i kachestva ugley plastov [The role of reference points of the exploration network and the reliability of assessing the properties and quality of coal seams]. *Razvedka i okhrana nedr*, 2018, no. 6, pp. 21–25.
18. Okhotnikov K.V. The impact of the classification of coal reserves on the formation of the raw material base of a mining enterprise. *Coke and Chemistry*, 2019, no. 9, pp. 8–12. In Rus.
19. *Code of Australasia for the compilation of reports on the results of exploration, mineral resources and ore reserves (JORC Code)*. Prepared by the Joint Committee on Reserves of the Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Australian Institute of Geosciences and the Australasia Minerals Council (JORC). 2014. Available at: <https://imcmontan.ru/files/jorc.pdf> (accessed 19 September 2019).

20. Khrustalyova G.K., Eremin I.V., Bronovets T.M. Kachestvo i napravlenie ispolzovaniya ugley. Printsipy sovremennoy promyshlennoy klassifikatsii ugley [The quality and direction of use of coal. The principles of the modern industrial classification of coal]. *Ugolnaya baza Rossii* [Coal base of Russia]. Moscow, Geoinformmark Publ., 2004. pp. 353–357.
21. *Mineral Reserves Reporting Standards*. Available at: <http://technology.infomine.com/reviews/report-ingstandards/welcome.asp?view=full>. (accessed 11 July 2019).

Received: 16 January 2020.

Information about the authors

Konstantin V. Ohotnikov, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 551.467

ИЗМЕНЧИВОСТЬ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА МОРЕЙ ВОСТОЧНОГО СЕКТОРА АРКТИКИ (ВОСТОЧНО-СИБИРСКОЕ, ЧУКОТСКОЕ) В СОВРЕМЕННЫЙ ПЕРИОД

Плотников Владимир Викторович^{1,2},
vlad_plot@poi.dvo.ru

Вражкин Александр Николаевич³,
avrazhkin@ferhri.ru

Мезенцева Людмила Ивановна^{3,2},
festfu@mail.ru

Друль Наталья Ивановна³,
hydromet@mail.ru

Вакульская Надежда Михайловна¹,
vakulskaya@poi.dvo.ru

Дубина Вячеслав Анатольевич¹,
dubina@poi.dvo.ru

¹ Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильинова Дальневосточного отделения Российской академии наук, Россия, 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43.

² Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, Россия, 690087, г. Владивосток, ул. Луговая, 52б.

³ Дальневосточный региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт, Россия, 690091, г. Владивосток, ул. Фонтанная, 24.

Актуальность исследования. Богатая ресурсная база, большое транспортное и стратегическое значение Арктического бассейна и, в частности, морей восточной Арктики определяет актуальность и необходимость исследования изменчивости гидрометеорологического режима региона.

Целью работы является анализ изменчивости региональных показателей гидрометеорологического режима (ветровой режим, ледовые условия и характер перемешивания вод) на Восточно-Сибирском и Чукотском морях за последние несколько десятков лет (с 1979 по 2015 гг.).

Объектом исследования является комплекс наиболее значимых показателей, определяющих характер гидрометеорологических условий региона.

Методы. Для анализа изменчивости гидрометеорологического режима региона использовались методы многомерной статистики и моделирования.

Результаты. На основании всей доступной гидрометеорологической информации проведен анализ изменчивости основных региональных показателей гидрометеорологического режима.

Проведенные исследования свидетельствуют о направленных изменениях в показателях гидрометеорологического режима морей восточной Арктики:

- в характере и интенсивности атмосферной циркуляции над регионом (отмечается изменение характера и интенсивности ветрового режима);
- в ледяном покрове морей (идет активное уменьшение ледяного покрова);
- в характере и интенсивности волновой деятельности (за счет первых двух показателей наблюдается активизация волновой деятельности, выражаемой в существенном увеличении площади и глубины волнового перемешивания).

В дальнейшем полученные оценки могут быть использованы для реализации ряда вероятностно-статистических моделей изменчивости гидрометеорологического состояния, а также при решении ряда практических задач, хозяйственного освоения акваторий морей восточной Арктики.

Ключевые слова:

Гидрометеорологический режим, ледовитость, ветровое перемешивание, Чукотское и Восточно-Сибирское моря, атмосферная циркуляция.

Введение

На особенности гидрометеорологического и ледового режимов арктических морей обращали внимание многие исследователи [1–28]. При этом отмечалось, что изменения этих режимов наиболее ярко проявились в арктических широтах.

В связи с этим оценка и анализ многолетней изменчивости комплекса отмеченных показателей, а также сопряженности процессов в атмосфере, ледяном покрове и водной среде на Восточно-Сибирском и Чукотском морях в современный период представляют несомненный интерес.

Режим ветра и его тенденции

Анализ атмосферной циркуляции над Арктическим бассейном показал весьма неоднозначные результаты [1, 3–5, 8, 9, 11, 18, 20–22, 29–31]. Для детализации и обобщения сведений о характере атмосферной циркуляции над восточным сектором Арктики, на основе данных реанализа Европейского Центра среднесрочных прогнозов погоды (ECWMF) ERA-Interim [31], были рассчитаны режимные характеристики ветра над Чукотским и Восточно-Сибирским морями. Данные ERA-реанализа содержат набор параметров в узлах регулярной сетки по всему Земному шару с шагом $0,75^{\circ}$ по широте и долготе для 4-х срока за сутки с 1979 г. по настоящее время. Эти условия перенесены на приведенные здесь расчетные характеристики ветра.

В работе были рассчитаны основные параметры ветра на уровне 10 м над поверхностью моря для каждого месяца: средняя и максимальная скорости, результирующий ветер, двумерные повторяемости для построения роз ветра. Основное внимание уделялось периоду года, когда моря являются судоходными или частично судоходными, т. е. периоду с июня по ноябрь.

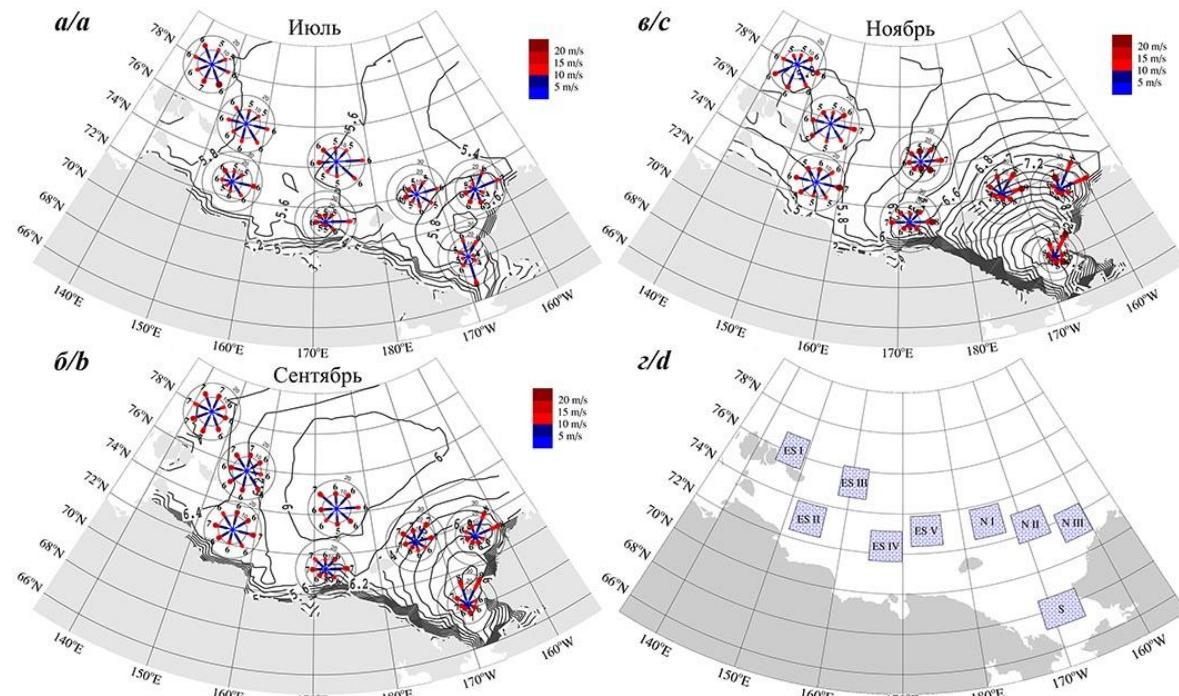


Рис. 1. Средняя скорость ветра для Чукотского и Восточно-Сибирского моря и розы ветров в июле (а), сентябре (б) и ноябре (в). Изотахи проведены через 0,2 м/с для скоростей ветра более 5 м/с и через 0,5 м/с для скоростей менее 5 м/с; на лучах роз ветров указана средняя скорость данного направления ветра. (г) Районы Чукотского и Восточно-Сибирского морей

Fig. 1. Average wind speed for the Chukchi and East Siberian Seas and wind roses in July (a), September (b) and November (c). Isotaches are drawn through 0.2 m/s for wind speeds greater than 5 m/s and through 0.5 m/s for speeds less than 5 m/s; rays of wind roses show average speed of a given wind direction. (d) Areas of the Chukchi and East Siberian Seas

Преобладающими направлениями ветра в июне и июле для большей части рассматриваемой акватории являются SE-E румбы, для северных районов Восточно-Сибирского моря – преимущественно S. В августе над южной половиной Восточно-

Сибирского моря и большей частью Чукотского моря результирующим становится NE-E ветер; на северо морей ветер крайне неустойчив, его результирующее направление зависит от периода усреднения. В сентябре Чукотское море во власти устойчивых

Средняя скорость ветра для летних месяцев по рассматриваемым акваториям распределена в пределах 5–6 м/с и слегка нарастает осенью над Восточно-Сибирским морем. Для Чукотского моря осенью характерно значимое усиление ветров, наиболее заметное для южной части моря (средняя скорость ветра в октябре–ноябре достигает 8–9 м/с). Осредненные значения максимальных значений скорости ветра в летний период близки к 12 м/с. Осенью отмечается нарастание средних максимальных скоростей ветра для Восточно-Сибирского моря до 14–15 м/с, для Чукотского моря до 15–17 м/с. Абсолютные максимумы скорости ветра за навигационный период также приходятся на конец осени, достигают штормовых значений 25–29 м/с.

NE-N и E ветров, и эта циркуляция сохраняется все осенние и зимние месяцы. Для юго-восточной части Восточно-Сибирского моря в осенние месяцы и в начале зимы характерны эти же направления ветра – N-NE-E. Для других районов Восточно-Сибирского

моря результирующий ветер зависит от периода усреднения, можно выделить преобладание E, NE ветров на северо-востоке моря в октябре–ноябре, чаще всего южных четвертей на северо-западе акватории и SW на юго-западе.

Таблица 1. Средняя и максимальная скорость ветра и преобладающие направления по районам Чукотского и Восточно-Сибирского морей

Table 1. Average and maximum wind speed and prevailing directions in the Chukchi and East Siberian Seas

| Районы Areas | Месяц/Month | | | | | | |
|---|-------------|--|--|-----------------------------------|---------------------------------|------|------|
| | VI | VII | VIII | IX | X | XI | XII |
| Чукотское море/Chukchi Sea | | | | | | | |
| Средняя скорость ветра, м/с/Average wind speed, m/s | | | | | | | |
| NI | 5,3 | 5,4 | 5,8 | 6,2 | 6,7 | 6,9 | 6,5 |
| NII | 5,3 | 5,5 | 6,1 | 6,7 | 7,4 | 7,5 | 7,0 |
| NIII | 5,5 | 5,6 | 6,1 | 6,8 | 7,5 | 7,3 | 7,1 |
| S | 5,2 | 5,5 | 6,0 | 7,1 | 8,0 | 8,8 | 8,5 |
| *Средняя из максимальных скорость ветра, м/с/Average of maximum wind speed, m/s | | | | | | | |
| NI | 11,8 | 12,1 | 12,9 | 13,3 | 14,4 | 15,2 | 14,9 |
| NII | 11,5 | 12,0 | 13,3 | 14,1 | 14,9 | 15,8 | 15,7 |
| NIII | 11,9 | 12,0 | 13,2 | 14,0 | 15,3 | 15,6 | 15,9 |
| S | 11,7 | 12,0 | 13,0 | 14,6 | 16,2 | 17,3 | 17,2 |
| **Максимальная скорость ветра, м/с/Maximum wind speed, m/s | | | | | | | |
| NI | 17 | 21 | 19 | 19 | 29 | 22 | 27 |
| NII | 15 | 20 | 19 | 20 | 22 | 23 | 27 |
| NIII | 18 | 19 | 20 | 19 | 22 | 24 | 26 |
| S | 19 | 16 | 20 | 18 | 22 | 26 | 27 |
| Повторяемость сильного ветра (≥ 17 м/с) в %/High wind repeatability (≥ 17 m/s) in % | | | | | | | |
| NI | 0,01 | 0,07 | 0,02 | 0,02 | 0,3 | 0,7 | 0,4 |
| NII | — | 0,04 | 0,1 | 0,2 | 0,4 | 0,6 | 0,7 |
| NIII | 0,00 | 0,03 | 0,1 | 0,1 | 0,4 | 0,5 | 0,7 |
| S | 0,02 | 0,7 | 0,05 | 0,4 | 0,8 | 1,7 | 2,0 |
| ***Преобладающее направление/Prevailing direction | | | | | | | |
| NI | SE | SE | ENE, последние годы last years WNW | NW, последние годы last years NE | NE, последние годы last years E | NE | NE |
| NII | SE | SE | E, последние годы last years неустойчивый unstable | NNE, последние годы last years NE | NE, последние годы last years E | NE | NE |
| NIII | E | SE и E | E и SE | NE, последние годы last years NEE | NEE | NEE | NEE |
| S | NE | Неустойчивый unstable, последние годы last years S | NE | NE | NE | NE | NE |
| Восточно-Сибирское море/East Siberian Sea | | | | | | | |
| Средняя скорость ветра, м/с/Average wind speed, m/s | | | | | | | |
| ES I | 5,9 | 5,9 | 6,1 | 6,5 | 6,3 | 5,8 | 5,9 |
| ES II | 5,7 | 5,7 | 6,0 | 6,3 | 6,0 | 5,6 | 5,5 |
| ES III | 5,8 | 5,7 | 5,9 | 6,1 | 5,9 | 5,8 | 5,8 |
| ES IV | 5,6 | 5,6 | 5,9 | 6,1 | 5,9 | 6,1 | 6,0 |
| ES V | 5,6 | 5,6 | 5,8 | 6,0 | 6,0 | 6,3 | 6,1 |
| Средняя из максимальных скорость ветра, м/с/Average of maximum wind speed, m/s | | | | | | | |
| ES I | 12,9 | 12,6 | 13,2 | 13,7 | 14,3 | 13,1 | 14,0 |
| ES II | 12,2 | 12,1 | 12,5 | 13,7 | 13,5 | 13,4 | 13,8 |
| ES III | 12,8 | 12,1 | 12,8 | 13,6 | 13,9 | 13,4 | 13,7 |
| ES IV | 11,8 | 12,1 | 12,6 | 13,2 | 13,4 | 14,1 | 14,8 |
| ES V | 11,9 | 12,1 | 12,7 | 13,1 | 13,8 | 14,6 | 14,8 |
| Максимальная скорость ветра, м/с/Maximum wind speed, m/s | | | | | | | |
| ES I | 20 | 19 | 20 | 19 | 20 | 20 | 24 |
| ES II | 18 | 17 | 17 | 21 | 21 | 22 | 25 |
| ES III | 18 | 17 | 18 | 23 | 19 | 25 | 26 |
| ES IV | 18 | 19 | 18 | 18 | 24 | 24 | 27 |
| ES V | 18 | 19 | 17 | 18 | 21 | 23 | 23 |
| Повторяемость сильного ветра (≥ 17 м/с) в %/High wind repeatability (≥ 17 m/s) in % | | | | | | | |
| ES I | 0,05 | 0,03 | 0,07 | 0,1 | 0,2 | 0,1 | 0,4 |
| ES II | 0,02 | 0,01 | 0,04 | 0,2 | 0,1 | 0,2 | 0,3 |
| ES III | 0,04 | 0,00 | 0,02 | 0,2 | 0,1 | 0,1 | 0,4 |
| ES IV | 0,03 | 0,03 | 0,01 | 0,02 | 0,3 | 0,3 | 0,5 |
| ES V | 0,06 | 0,05 | 0,00 | 0,03 | 0,4 | 0,5 | 0,5 |

| Районы Areas | Месяц/Month | | | | | | |
|--|------------------------------------|-----------------------------------|--|---|--|--|---|
| | VI | VII | VIII | IX | X | XI | XII |
| Преобладающее направление/Prevailing direction | | | | | | | |
| ES I | S, последние годы last years SE | SE | NWW, последние годы last years SE | SWW, последние годы last years SWS | S | SE, последние годы last years S | S, последние годы last years SW |
| ES II | E, SE, последние годы last years E | ESE, последние годы last years E | NE, последние годы last years E | Неустойчивые unstable разных направлений different directions | SSW, последние годы last years E и ENE | E, последние годы last years W неустойчивый unstable | S-SW, последние годы last years W |
| ES III | S, последние годы last years SE | SES, последние годы last years SE | NWW, последние годы last years E неустойчивые | NW, последние годы last years SEE | SSE, последние годы last years SE | ESE, последние годы last years ENE | SE, последние годы last years неустойчивый unstable |
| ES IV | E, последние годы last years SEE | E | NE, последние годы last years NEE | N, последние годы last years NE | E, последние годы last years ENE | E, последние годы last years NE | ENE, последние годы last years NEN |
| ES V | SE | SE, последние годы last years ESE | Разных направлений, последние годы last years NE | NW, последние годы last years NE | NE, последние годы last years E | NEE, последние годы last years NE | ENE, последние годы last years NEN |

Примечание: *Средняя из максимальных скорость ветра – максимальная скорость ветра за отдельный месяц, усредненная за период лет; **Максимальная скорость ветра – абсолютный максимум скоростей ветра для данного месяца; ***Последние годы – период позже 1996 г.

Note: * Average of the maximum wind speeds – the maximum wind speed for a single month, averaged over a period of years; ** Maximum wind speed – the absolute maximum of wind speeds for a given month; *** Last years – the period after 1996

Для проверки гипотезы об изменении атмосферной циркуляции над полярными районами в пределах периода исследования оценивались изменения результирующего ветра, в том числе исследовались временные ряды компонент (меридиональной и зональной компоненты) результирующего ветра для отдельных месяцев.

На рис. 2 представлены накопленные аномалии меридиональной (v) компоненты ветра над разными районами Чукотского моря (районы соответствуют рис. 1, г). Ход кривой вниз следует понимать как преобладание отрицательных аномалий компоненты v (усиление северной или ослабление южной составляющей ветра), вверх – преобладание положительных аномалий (ослабление северной или усиление южной составляющей ветра). При расчете аномалий в качестве нормы использованы средние многолетние значения за весь период обобщений.

Анализ кривых позволяет выявить несовпадающие от месяца к месяцу часто асинхронные периоды преобладания аномалий одного знака, равные примерно 8–12 годам (рис. 2). Так, для июля можно выделить период с 2000 по 2011 гг., для юга Чукотского моря – с 1997 по 2011 гг., когда доминировали отрицательные аномалии компоненты v – ослабевала южная составляющая ветра. На более раннем этапе, с 1983 по 1996 гг., преобладали положительные аномалии компоненты v – южная составляющая ветра часто была значительной. Для сентября за исследуемые 37 лет выделяются четыре периода с преобладанием аномалий одного знака. С 1979 по 1988 гг. преобладали положительные аномалии компоненты v, в период 1990–1996 гг. – отрицательные, с 1997 до 2010 гг. – опять положительные, и последние 5 лет над всеми районами Чукотского моря ежегодно отмечались отрицательные аномалии (что указывает на усиление ветров северной четверти).

Частое повторение сдвигов ветра на рубеже 1996–1997 гг. дало основание разбить период исследования на два почти равных временных отрезка. Результирующий ветер, рассчитанный для периодов 1979–1996 гг. и 1997–2015 гг. для акваторий Восточно-Сибирского и Чукотского морей для навигационных месяцев, представлен на рис. 3. Анализ карт позволяет выявить ряд изменений основных воздушных течений у поверхности Земли над регионом исследования от 1979–1996 гг. (период I) к 1997–2015 гг. (период II) и, следовательно, изменение положения дирахирующих барических объектов. В июне и июле, например, над северными акваториями обоих морей отмечался устойчивый по территории левый поворот результирующего ветра от периода I ко II-му периоду (рис. 3, а, б), что указывает на смещение полярного североамериканского антициклона от традиционного местоположения в восточный сектор Российской Арктики.

В августе в течение периода I над Восточно-Сибирским морем преобладал антициклонический характер циркуляции. Движение воздуха осуществлялось относительно ядер, расположенных юго-восточнее Новосибирских островов, примерно на 74°–75° с.ш., и на востоке моря на широте 73°–74°. Ось гребня, ориентированная вдоль 73-й широты, распространялась на север Чукотского моря. На северной периферии гребня преобладали ветры западных румбов, на южной – северо-восточные, восточные. Позже 1976 г. пояс повышенного давления сместился к северу, примерно на 76° с.ш.; вслед за ним результирующие ветры над большей частью акваторий обоих морей сменили направление на восточное (рис. 3, в). Похожие тенденции с большими сдвигами ветра от одного периода к другому прослеживаются и в сентябре (рис. 3, г). Можно заметить смещение цик-

лонического вихря, регулирующего воздушные течения на юге Чукотского моря в августе, на восток вдоль 67° с.ш., что определило левый поворот ветра в этом районе Чукотского моря.

В сентябре и октябре над Чукотским морем сдвиги ветра умеренные одного знака – имеет место правый поворот ветра на 20° – 30° . В этот период над морем устанавливается зимняя циркуляция с преобладанием ветров NE четверти, регулирует воздушные течения алеутский минимум. Правый поворот ветра, вероятно, объясняется наличием и преобладанием в течение II периода пояса повышенного давления к северу от моря. Сдвиги ветра в этот период сопровождались его усилением, особенно заметным в октябре. В октябре–ноябре в течение периода II над Чукотским морем севернее 68° с.ш. средние скорости ветра были больше на 0,6–1,4 м/с по отношению к периоду I (рис. 3, *d, e*).

На северо-западе Восточно-Сибирского моря в сентябре и над большей его частью в октябре имеют место сдвиги ветра другого знака, наблюдается левый поворот ветра (рис. 3, *г, д*). В октябре, кроме этого, над всей акваторией моря ветер стал сильнее на

0,4–1,0 м/с. Здесь ответственной барической системой является циклоническая система над морем Лаптевых в сочетании с полярным антициклоном.

Подводя итоги, можно отметить следующее. Частое повторение сдвигов ветра (характерно для большинства месяцев большей части выделенных акваторий) на рубеже 1996–1997 гг. дало основание разбить период исследования на два почти равных временных отрезка, 1979–1996 и 1997–2015 гг., в рамках которых положение дирижирующих барических объектов и, как следствие, результирующий ветер различаются. В теплый сезон на большей части морей российской Восточной Арктики от первого периода ко второму прослеживается тенденция к возрастанию повторяемости ветров восточной четверти, что указывает на преобладание зональных форм циркуляции. Кроме этого, в осенние месяцы отмечается значимое усиление ветров, преобладающее направление которых северо-восточное. В Восточно-Сибирском море – 14–15 м/с, в Чукотском море – до 15–17 м/с. Абсолютные максимумы скорости ветра также приходятся на конец осени и достигают штормовых значений 25–29 м/с.

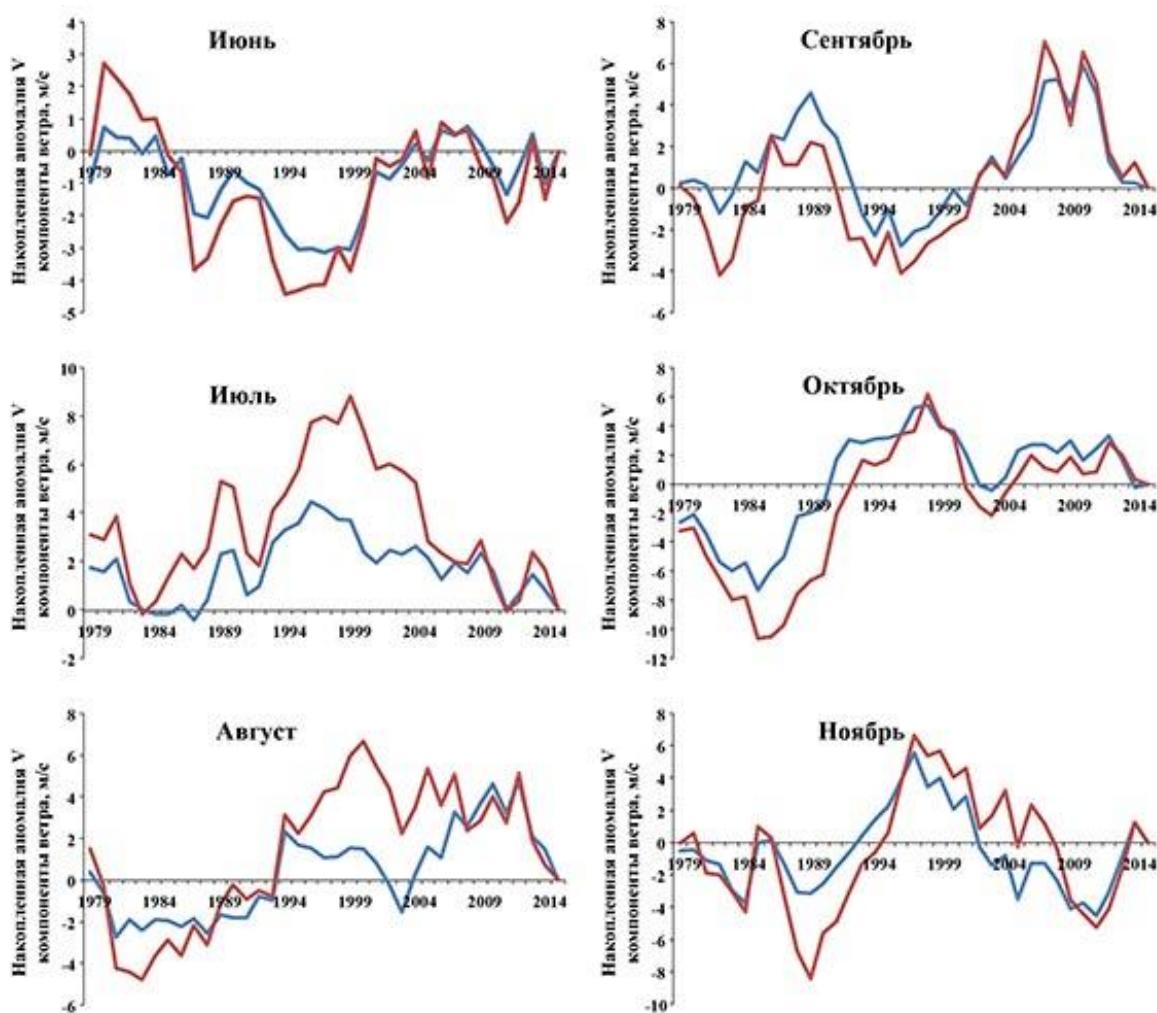


Рис. 2. Накопленные аномалии меридиональной компоненты ветра для отдельных районов Чукотского моря (сплошная линия – все районы моря, пунктирная линия – юг моря) в июне–ноябре

Fig. 2. Accumulated anomalies of the meridional wind component for some areas of the Chukchi Sea (solid line – all areas of the sea, dashed line – south of the sea) in June–November

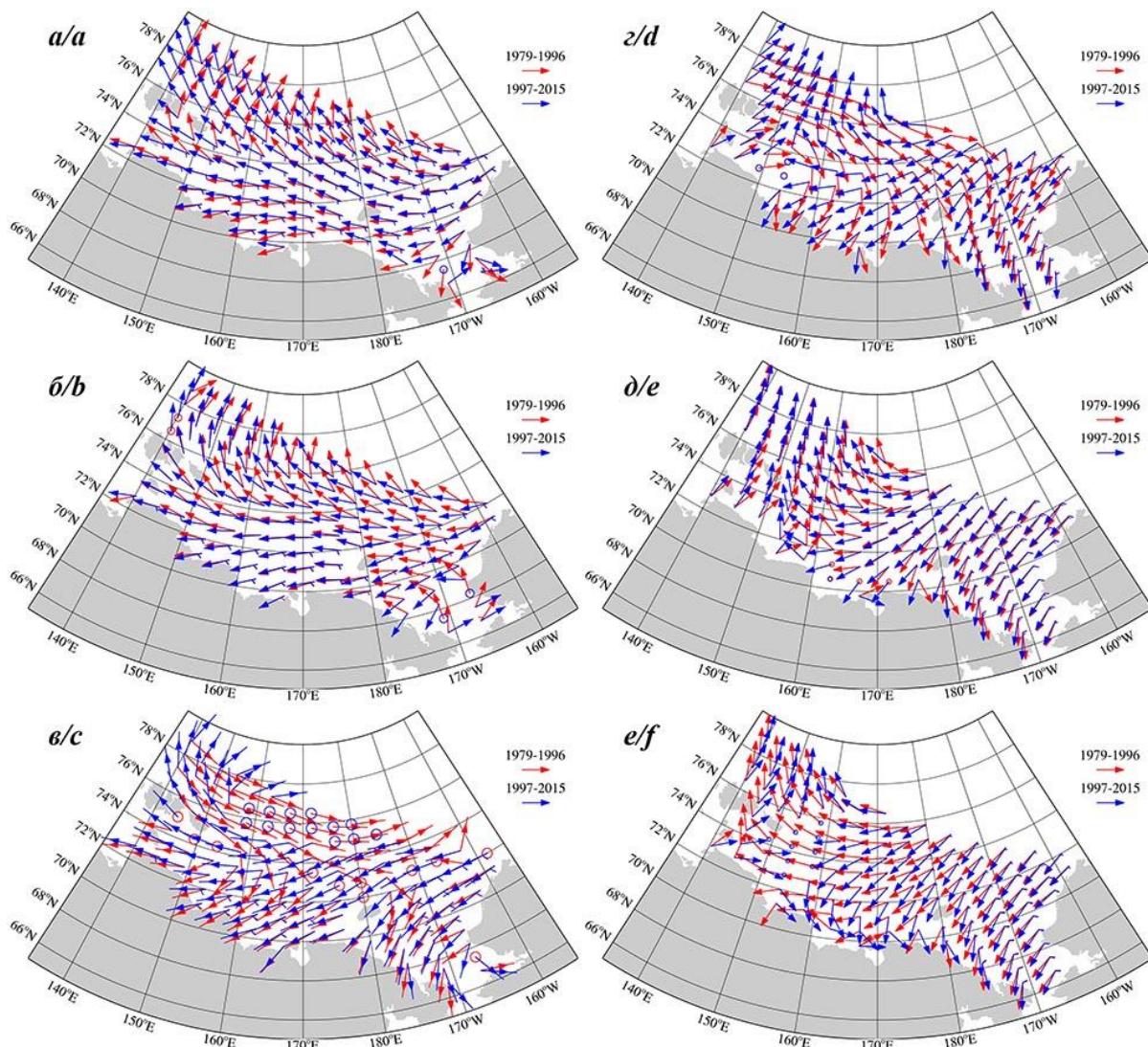


Рис. 3. Результирующий ветер над Восточной Российской Арктикой для июня (а), июля (б), августа (в), сентября (г), октября (д) и ноября (е)

Fig. 3. Resulting wind over the Eastern Russian Arctic for June (a), July (b), August (c), September (d), October (e) and November (f)

Ледовые условия

Для оценки изменчивости ледового режима в современный период привлекались данные о ледовых условиях за последние несколько десятилетий – 37 лет (1979–2015 гг.).

Изменчивость ледового режима акваторий оценивалась по характеру распределения ледовитостей за теплый период (июнь–ноябрь) (рис. 4).

Из анализа распределений (рис. 4, табл. 2) следует, что вероятность проявления тренда увеличивается с запада на восток. При этом замедление процесса разрушения льда в Восточно-Сибирском море (незначительный положительный тренд) сопровождается ускорением этого процесса в Чукотском море. Данный эффект является проявлением разницы в возрастном составе льдов в морях. В Чукотском море на начало таяния преобладают однолетние льды средней толщины (до 120 см), а в Восточно-Сибирском море в это же время преобладают однолетние толстые льды

(более 120 см). Более тонкий ледяной покров, а также разрушающее, за счет переноса, воздействие вод тихоокеанского бассейна приводит к более быстрому сокращению ледовитости в Чукотском море.

Сравнительный анализ результатов с ранее рассчитанными оценками [28] свидетельствует об интенсификации деструктивных процессов в ледяном покрове исследуемых морей с течением времени (табл. 2).

Динамическое перемешивание вод

При расчёте динамического перемешивания в морях восточного сектора Арктики (Восточно-Сибирское и Чукотское моря) использовались модельные данные, полученные по спектральной дискретной модели WAVEWATCH III [32], на сетке с шагом 20×10 минут.

В качестве входной информации использовались поля приводного ветра (Архив ERA-Interim) и распределения сплошности льда (Национальный ледовый центр США).

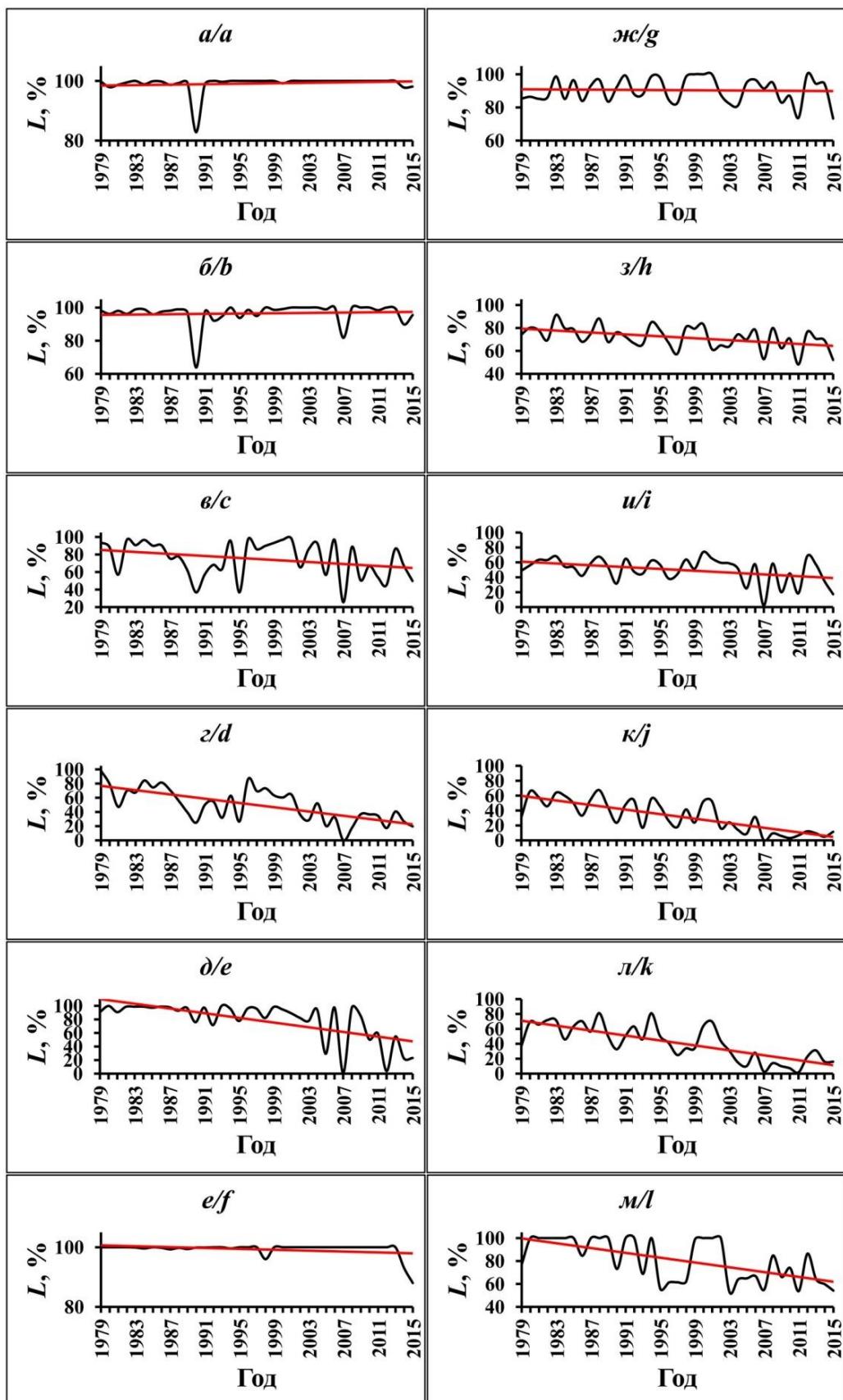


Рис. 4. Многолетние распределения ледовитостей ($L, \%$) в Восточно-Сибирском (а–е) и Чукотском (ж–м) морях и их линейный тренд (красная линия) в июне (а, ж), июле (б, з), августе (в, и), сентябре (г, к), октябре (д, л) и ноябре (е, м)

Fig. 4. Long-term distributions of ice cover ($L, \%$) in East Siberian (a–f) and Chukchi (g–l) Seas and their linear trend (red line) in June (a, g), July (b, h), August (c, i), September (d, j), October (e, k) and November (f, l)

Таблица 2. Сравнительные оценки распределений ледовитости Чукотского и Восточно-Сибирского морей за периоды 1979–2015 гг. (а) и 1950–2008 гг. (б), их трендовой составляющей и вероятности ее проявления

Table 2. Comparative estimates of ice cover distributions in the Chukchi and East Siberian seas over the periods of 1979–2015 (a) and 1950–2008 (b), their trend component and the probability of its demonstration

| Оценки Estimates | Июнь June | Июль July | Август August | Сентябрь September | Октябрь October | Ноябрь November |
|--|-----------|-----------|---------------|--------------------|-----------------|-----------------|
| а/а 1979–2015 | | | | | | |
| Восточно-Сибирское море East Siberian Sea | | | | | | |
| L_{cp} | 99,1 | 96,3 | 74,8 | 49,6 | 78,8 | 99,3 |
| σ_t | 2,8 | 6,7 | 20,7 | 23,7 | 28,5 | 2,3 |
| α | 0,029 | 0,057 | -0,478 | -1,204 | -1,383 | -0,060 |
| σ_α | 0,043 | 0,102 | 0,305 | 0,270 | 0,336 | 0,033 |
| P (%) | 50 | 42,5 | 88,4 | 99,9 | 99,9 | 93,1 |
| Чукотское море Chukchi Sea | | | | | | |
| L_{cp} | 91,7 | 71,3 | 50,2 | 31,4 | 41,3 | 80,5 |
| σ_t | 7,6 | 9,7 | 16,7 | 20,7 | 24,1 | 17,2 |
| α | -0,101 | -0,283 | -0,504 | -1,143 | -1,311 | -0,700 |
| σ_α | 0,116 | 0,137 | 0,236 | 0,213 | 0,254 | 0,222 |
| P (%) | 61,6 | 96 | 96,8 | 99,99 | 99,99 | 99,8 |
| б/б 1950–2008 | | | | | | |
| Восточно-Сибирское море East Siberian Sea | | | | | | |
| L_{cp} | 98,5 | 96,1 | 79,4 | 61,6 | 91,2 | 99,9 |
| σ_t | 3,2 | 5,8 | 17,1 | 21,7 | 16,8 | 0,5 |
| α | 0,032 | 0,005 | -0,082 | -0,528 | -0,279 | -0,005 |
| σ_α | 0,024 | 0,044 | 0,130 | 0,146 | 0,121 | 0,004 |
| P (%) | 81 | 10 | 47 | 99,9 | 98 | 78 |
| Чукотское море Chukchi Sea | | | | | | |
| L_{cp} | 92,5 | 75,8 | 57,5 | 44,4 | 56,1 | 91,0 |
| σ_t | 6,5 | 8,7 | 14,2 | 18,8 | 20,8 | 15,4 |
| α | -0,023 | -0,139 | -0,272 | -0,477 | -0,616 | -0,422 |
| σ_α | 0,049 | 0,063 | 0,100 | 0,125 | 0,130 | 0,099 |
| P (%) | 36 | 97 | 99 | 99,9 | 99,9 | 99,9 |

Примечание: L_{cp} – среднее значение ледовитости, σ_t – стандартное отклонение, α и σ_α – параметры тренда (угол наклона и среднеквадратичная погрешность оценки угла наклона, соответственно), P – вероятность проявления тренда.

Note. L_{cp} – average value of ice cover, σ_t – standard deviation, α and σ_α – the trend parameters (the angle of inclination and the root-mean-square error in estimating the angle of inclination, respectively), P – probability of trend presence.

Оценка результатов проводилась по данным инструментальных наблюдений с буёв (Shell Arctic Stations, № 48213, 48214) за 2015 г.

Анализ показал высокую степень адекватности рассчитанных и определенных в результате инструментальных наблюдений величин: для высот волн коэффициент корреляции оказался равен 0,95 при среднеквадратической ошибке 0,19 м; для периодов волн коэффициент корреляции соответствовал величине 0,91 при среднеквадратической ошибке 1,28 секунд.

Увеличение площади акваторий свободных ото льда при соответствующих синоптических условиях

(см. предшествующие разделы) способствует интенсификации волновых процессов [20–22, 29, 30]. На основе спутниковых данных [33] было получено, что начиная с 1996 г. наблюдается восходящий тренд для высот волн и скорость их роста составляет 0,1 м в десятилетие.

На морях восточного сектора Арктики с июня по ноябрь отмечаются заметные акватории, или полностью свободные ото льда, или имеющие незначительный ледяной покров со сплошностью менее трех баллов, на которых может генерироваться волнение. Наиболее активно процесс очищения ото льда, а следовательно, и процесс волнообразования происходит с августа по октябрь, где в отдельные годы на более чем 3/4 площади акваторий наблюдается волнение. Например, в ноябре в восточной части Восточно-Сибирского моря высота волн может достигать 3 м, а в южной части Чукотского моря даже в конце ноября возможны волны до 6 м. В табл. 3 приведены средние и максимальные высоты волн с 2000 г.

Таблица 3. Средние и максимальные высоты значительных волн и глубины динамического перемешивания в Восточной Арктике

Table 3. Average and maximum heights of significant waves and depths of dynamic mixing in the Eastern Arctic

| Месяц/Month | VI | VII | VIII | IX | X | XI | XII |
|---|-----|-----|------|-----|-----|-----|-----|
| Средняя высота (м) Average height (m) | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,9 | 1,1 | 1,1 | 1,6 |
| Максимальная высота (м) Maximum height (m) | 3,2 | 3,9 | 4,8 | 4,9 | 5,4 | 6,6 | 4,4 |
| Средняя глубина перемешивания (м) Average depth of mixing (m) | 5 | 7 | 8 | 10 | 12 | 12 | 15 |
| Максимальная глубина перемешивания (м) Maximum depth of mixing (m) | 29 | 35 | 45 | 46 | 53 | 64 | 44 |

При расчёте глубины волнового перемешивания использовалась теория нелинейных волн конечной амплитуды Стокса. Волнение приводит к орбитальным движениям частиц воды. На глубокой воде это окружность, на мелководье – эллипс. При увеличении амплитуды траектории частиц становятся незамкнутыми и возникает волновое течение, называемое стоксово. Средняя скорость этого течения на глубокой воде [34]:

$$u = \pi^2 \delta^2 c e^{-2\pi z}.$$

На мелкой воде стоксово волновое течение имеет вид:

$$u = \pi^2 \delta^2 c \frac{\operatorname{ch}(2k(H-z))}{2\operatorname{sh}^2(kH)},$$

где δ – крутизна волн; c – фазовая скорость; H – глубина моря; z – вертикальная координата движения частицы воды; k – волновое число. Символами ch и sh обозначены гиперболический косинус и гиперболический синус, соответственно.

Подставив в эти уравнения характеристики волнения, несложно получить глубину (z), на которой скорость равна нулю. Эта глубина и является предельной характеристикой волнового перемешивания. Макси-

мальные глубины динамического перемешивания с начала XXI в. в Восточном секторе Арктики приведены на рис. 5.

С августа перемешивание достигает 20–25 метровой изобаты и в октябре увеличивается до 35 метровой, а в Чукотском море до 40–50 м. Средняя глубина динамического перемешивания с сентября по ноябрь в Чукотском море (по нашим расчетам) составляет 10–15 м, а максимум достигает дна (более чем 40 м). Однако в расчетах не учитывается плотность воды. Орбитальное движение с глубиной вовлекает новые

частицы и способствует перемешиванию слоев воды с различной плотностью. Высокие и длинные волны способны вызвать перемешивание и на больших глубинах. Принято считать, что глубина динамического перемешивания, вызванного волнением, составляет половину длины волны, однако, как сказано в [35], толщина слоя может быть соизмерима с длиной волны. Кроме того, дополнительно необходимо учитывать то, что максимальная глубина перемешивания получена по экстремальным характеристикам волн, которые не повторяются из года в год на всей акватории моря.

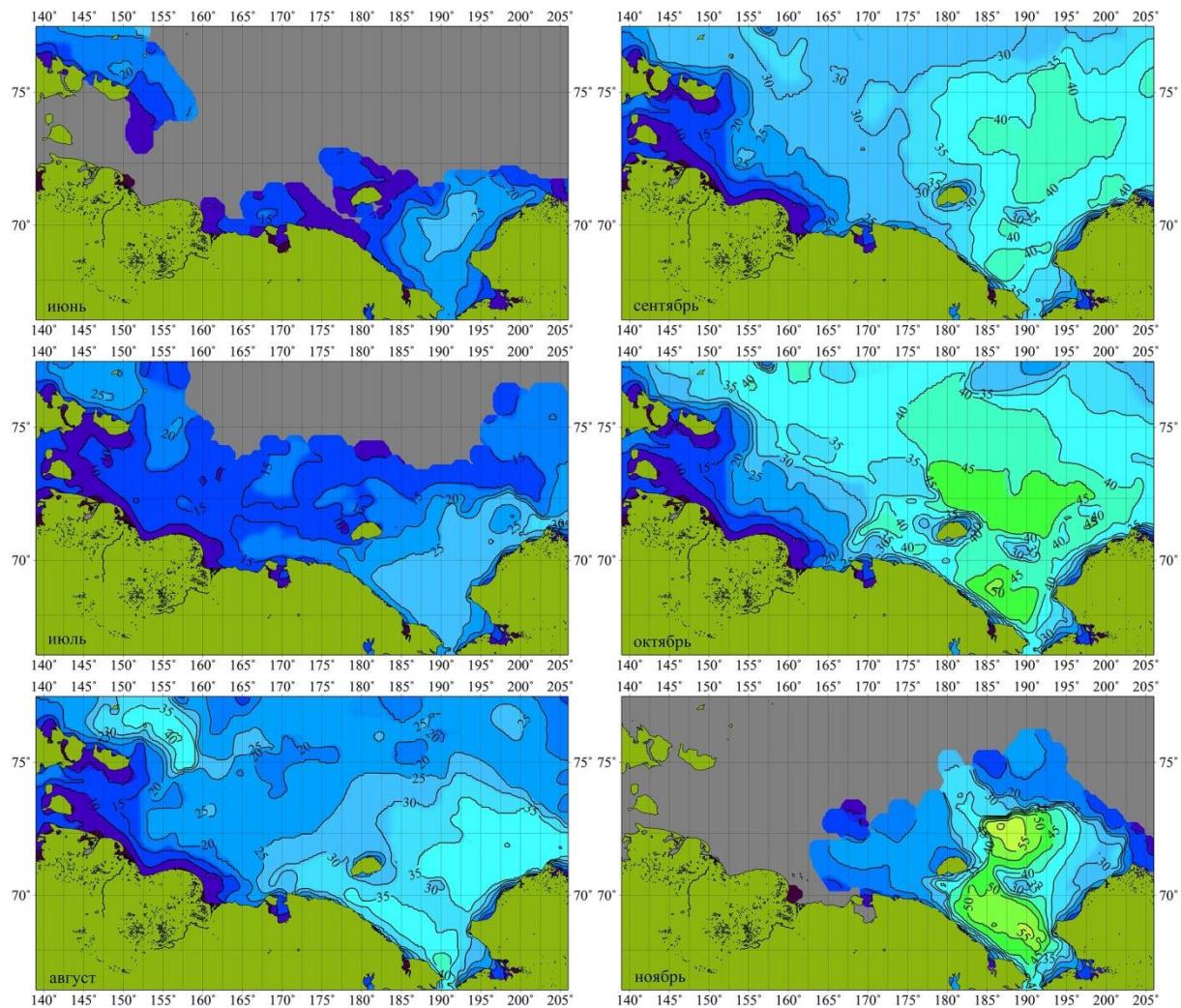


Рис. 5. Максимальная глубина волнового перемешивания в морях восточного сектора Арктики в июне–ноябре

Fig. 5. Maximum depth of wave mixing in the seas of East Arctic sector in June–November

Заключение

Проведенные исследования позволили сформулировать следующие основные выводы:

1. В морях восточного сектора Арктики происходит усиление деструктивных процессов в ледяном покрове.
2. Различия процессов разрушения льда в Восточно-Сибирском и Чукотском морях является проявлением разницы в возрастном составе льдов. В Чукотском море на начало таяния преобладают однолетние льды средней толщины (до 120 см), а в

Восточно-Сибирском море преобладают однолетние толстые льды (более 120 см). Более тонкие льды и влияние тихоокеанского бассейна приводит к более быстрому сокращению ледовитости в Чукотском море по сравнению с Восточно-Сибирским морем.

3. Частое повторение сдвигов ветра на рубеже 1996–1997 гг. дало основание разбить период исследования на два почти равных временных отрезка – 1979–1996 и 1997–2015 гг., в которых положения дирижирующих барических объектов и,

- как следствие, результирующий ветер на акваториях Восточно-Сибирского и Чукотского морей для навигационного сезона различаются.
4. За счет изменения ветрового и термического режимов, уменьшения площади ледяного покрова произошло увеличение площади и интенсивности ветрового перемешивания.
 5. Активность волновой деятельности увеличивается, и, соответственно, растет глубина волнового перемешивания от июня до октября, где она достигает максимума. К декабрю активность медленно затухает.
 6. Глубина ветрового перемешивания в морях в августе достигает 20–25 метровой изобаты, а в ок-

тябре в Восточно-Сибирском море увеличивается до 35 метровой, а в Чукотском море до 40–50 м.

Проведенные исследования свидетельствуют о заметной изменчивости региональных показателей гидрометеорологического режима морей восточной Арктики. Выявленные особенности могут быть использованы при моделировании состояния ветровой деятельности атмосферы, ледяного покрова, ветрового перемешивания, а также при решении практических задач хозяйственного освоения морей восточной Арктики.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме (№ гос. регистрации: АААА-А17-117030110042-2).

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-05-60104.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Формирование и динамика современного климата Арктики / под ред. Г.В. Алексеева. – СПб: Гидрометеоиздат, 2004. – 266 с.
2. Арктический ледяной покров становится сезонным? / В.В. Иванов, В.А. Алексеев, Т.А. Алексеева, Н.В. Колдунов, И.А. Репина, А.В. Смирнов // Исследование Земли из космоса. – 2013. – № 4. – С. 50–65.
3. Влияние атмосферных переносов тепла и влаги на усиление потепления в Арктике в зимний период / Г.В. Алексеев, С.И. Кузмина, А.В. Уразгильдеева, Л.П. Бобылев // Фундаментальная и прикладная климатология. – 2016. – Т. 1. – С. 43–63.
4. Влияние атмосферных переносов тепла и влаги на летнее потепление в Арктике / Г.В. Алексеев, С.И. Кузмина, Л.П. Бобылев, А.В. Уразгильдеева, Н.В. Гнатюк // Проблемы Арктики и Антарктики. – 2017. – № 3 (113). – С. 67–77.
5. Гудкович З.М., Захаров В.Ф., Аксенов Е.О., Позднышев С.П. Взаимосвязь современных климатических изменений в атмосфере, океане и ледяном покрове // Тр. ААНИИ. – 1997. – Т. 437. – С. 7–17.
6. Шалина Е.В. Изменение ледовитости северных морей России и оценка доступности Северного морского пути по данным спутникового мониторинга // Исследование Земли из космоса. – 2015. – № 4. – С. 67–78.
7. Изменения климата Арктики при глобальном потеплении / Г.В. Алексеев, В.Ф. Радионов, Е.И. Александров, Н.Е. Иванов, Н.Е. Харланенкова // Проблемы Арктики и Антарктики. – 2015. – № 1 (103). – С. 32–41.
8. Суркова Г.В., Крылов А.А. Изменения средних и экстремальных скоростей ветра в Арктике в конце XXI века // Арктика и Антарктика. – 2018. – № 3. – С. 26–36.
9. Катцков В.М., Порфириев Б.Н. Климатические изменения в Арктике: последствия для окружающей среды и экономики // Арктика: экология и экономика. – 2012. – № 2 (6). – С. 66–79.
10. Климатические изменения ледовых условий в арктических морях Евразийского шельфа / И.Е. Фролов, З.М. Гудкович, В.П. Карплин, Е.Г. Ковалев, В.М. Смоляницкий // Проблемы Арктики и Антарктики. – 2007. – № 1 (75). – С. 149–160.
11. Гурвич И.А., Заболотских Е.В. Мезомасштабные полярные циклоны над восточным сектором Арктики по данным мультисенсорного спутникового зондирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2015. – Т. 12. – № 3. – С. 101–112.
12. Результаты и перспективы исследований климата и климатического обслуживания в Арктике / Г.В. Алексеев, В.Ф. Радионов, В.М. Смоляницкий, К.В. Фильчук // Проблемы Арктики и Антарктики. – 2018. – Т. 64. – № 3. – С. 262–269.
13. Сезонная и межгодовая изменчивость ледяных массивов Восточно-Сибирского моря / А.В. Юлин, М.В. Шаратунова, Е.А. Павлова, В.В. Иванов // Проблемы Арктики и Антарктики. – 2018. – Т. 64. – № 3. – С. 229–240.
14. Голубева Е.Н., Платов Г.А., Якшина Д.Ф. Численное моделирование современного состояния вод и морского льда Северного Ледовитого океана // Лёд и Снег. – 2015. – Т. 55. – № 2. – С. 81–92.
15. Эволюция площади морского ледового покрова Арктики в условиях современных изменений климата / Г.В. Алексеев, Е.И. Александров, Н.И. Глок, Н.Е. Иванов, В.М. Смоляницкий, Н.Е. Харланенкова, А.В. Юлин // Исследование Земли из космоса. – 2015. – № 2. – С. 5–19.
16. Past climate variability and change in the Arctic and at high latitudes. Final report by the U.S. Climate change science program and subcommittee on global change research. SAP 1.2 / R.B. Alley, J. Brigham-Grette, G.H. Miller, L. Polyak, J.W.C. White. – Reston, VA: U.S. Geological Survey, 2009. – 257 p.
17. Arctic sea-ice-free season projected to extend into autumn / M. Lebrun, M. Vancoppenolle, G. Madec, F. Massonnet // The Cryosphere. – 2019. – V. 13. – P. 79–96.
18. Climate change 2007: synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change / Eds. L. Bernstein, P. Bosch, O. Canziani, Z. Chen, R. Christ, O. Davidson, W. Hare, S. Huq, D. Karoly, V. Kattsov, Z. Kundzewicz, J. Liu, U. Lohmann, M. Manning, T. Matsuno, B. Menne, B. Metz, M. Mirza, N. Nicholls, L. Nurse, R. Pachauri, J. Palutikof, M. Parry, D. Qin, N. Ravindranath, A. Reisinger, J. Ren, K. Riahi, C. Rosenzweig, M. Rusticucci, S. Schneider, Y. Sokona, S. Solomon, P. Stott, R. Stouffer, T. Sugiyama, R. Swart, D. Tirpak, C. Vogel, G. Yohe. – Geneva, Switzerland: IPCC, 2008. – 104 p.
19. Clues to variability in Arctic minimum sea ice extent / J.A. Francis, E. Hunter, J. Key, X. Wang // Geophysical Research Letters. – 2005. – V. 32. – P. L21501.
20. Wu B., Wang J., Walsh J.E. Dipole anomaly in the winter Arctic atmosphere and its association with sea ice motion // Journal of Climate. – 2006. – V. 19. – P. 210–225.
21. Climatic changes of the upper layer salinity of Arctic ocean / Z.M. Gudkovich, A.Y. Proshutinsky, L.A. Timokhov, A.E. Koltyshov, A.L. Garmanov // World climate research programme (WCRP), Arctic climate system study (ACSYS). Final science conference. – St. Petersburg, 2003. – WCRP-118 (CD), WMO/TD № 1232. – P. 1–3.
22. How well do we understand and evaluate climate change feedback processes? / S. Bony, R. Colman, V. Kattsov, R.P. Allan, C.S. Bretherton, J.-L. Dufresne, A. Hall, S. Hallegatte, M.M. Holland, W. Ingram, D.A. Randall, B.J. Soden, G. Tselioudis, M.J. Webb // Journal of Climate. – 2006. – V. 19. – № 15. – P. 3445–3482.
23. Remote sensing of sea ice in the Northern sea route: studies and applications / O.M. Johannessen, V. Alexandrov, I.Y. Frolov et al. – Chichester, UK: Praxis Publishing Ltd, 2007. – 472 p.
24. Liu Z., Schweiger A. Synoptic conditions, clouds, and sea ice melt onset in the Beaufort and Chukchi seasonal ice zone // Journal of Climate. – 2017. – V. 30. – № 17. – P. 6999–7016.
25. Temporal means and variability of Arctic sea ice melt and freeze season climate indicators using a satellite climate data record / G. Peng, M. Steele, A.C. Bliss, W.N. Meier, S. Dickinson // Remote Sensing. – 2018. – V. 10. – P. 1328.

26. Thinning and volume loss of the Arctic Ocean sea ice cover: 2003–2008 / R. Kwok, G.F. Cunningham, M. Wensnahan, I. Rigor, H.J. Zwally, D. Yi // Journal of Geophysical Research. – 2009. – V. 114. – P. C07005.
27. Towards seasonal Arctic shipping route predictions / N. Melia, K. Haines, E. Hawkins and J.J. Day // Environmental Research Letters. – 2017. – V. 12. – P. 084005.
28. Plotnikov V.V., Pustoshnova V.I. Variability and conjugacy of ice conditions in the system of East Arctic seas (the Laptev, East Siberian and Chukchi Seas) // Russian Meteorology and Hydrology. – 2012. – V. 37. – № 7. – P. 468–476.
29. Ветер и волны в океанах и морях. Справочные данные / под ред. И.Н. Давидан, Л.И. Лопатухина, В.А. Рожкова. – Л.: Транспорт, 1974. – 359 с.
30. Добровольский А.Д., Залогин Б.С. Моря СССР. – М.: Изд-во Московского государственного университета, 1982. – 148 с.
31. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system / D.P. Dee, S.M. Uppala, A.J. Simmons, P. Berrisford, P. Poli, S. Kobayashi, U. Andrae, M.A. Balmaseda, G. Balsamo, P. Bauer, P. Bechtold, A.C.M. Beljaars, L. van de Berg, J. Bidlot, N. Bormann, C. Delsol, R. Dragani, M. Fuentes, A.J. Geer, L. Haimberger, S.B. Healy, H. Hersbach, E.V. Holm, L. Isaksen, P. Kallberg, M. Kohler, M. Matricardi, A.P. McNally, B.M. Monge-Sanz, J.-J. Morcrette, B.-K. Park, C. Peubey, P. de Rosnay, C. Tavolato, J.-N. Thepaut, F. Vitart // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. – 2011. – V. 137 (656). – P. 553–597.
32. User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 4.18 // Technical Note 316. NOAA/NWS/NCEP/MMAB. 2014. URL: <http://polar.ncep.noaa.gov/waves/wavewatch/manual.v4.18.pdf> (дата обращения 22.11.2019)
33. User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 5.16 // Technical Note 329. NOAA/NWS/NCEP/MMAB. 2016. URL: <https://polar.ncep.noaa.gov/waves/wavewatch/manual.v5.16.pdf> (дата обращения 22.11.2019)
34. Лопатухин Л.И. Ветровое волнение. – СПб.: Изд-во СПбГУ, 2012. – 165 с.
35. Никифоров Е.Г. О связи ветрового течения с ветровым волнением // Известия АН СССР, серия геофизическая. – 1956. – № 12. – С. 1450–1460.

Поступила: 18.12.2019 г.

Информация об авторах

Плотников В.В., доктор географических наук, главный научный сотрудник лаборатории ледовых исследований Федерального агентства научных организаций Тихоокеанского океанологического института им. В.И.Ильчева Дальневосточного отделения Российской академии наук; профессор кафедры экологии и природопользования Дальневосточного государственного технического рыбохозяйственного университета.

Бражкин А.Н., кандидат технических наук, заведующий отделом долгосрочных прогнозов и изучения климата Дальневосточного регионального научно-исследовательского гидрометеорологического института.

Мезенцева Л.И., кандидат географических наук, старший научный сотрудник отдела долгосрочных прогнозов и изучения климата Дальневосточного регионального научно-исследовательского гидрометеорологического института; доцент кафедры судовождения Дальневосточного государственного технического рыбохозяйственного университета, Россия.

Друзь Н.И., ведущий инженер отдела долгосрочных прогнозов и изучения климата Дальневосточного регионального научно-исследовательского гидрометеорологического института.

Вакульская Н.М., научный сотрудник лаборатории ледовых исследований Федерального агентства научных организаций Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильчева Дальневосточного отделения Российской академии наук.

Дубина В.А., кандидат географических наук, заведующий лабораторией ледовых исследований Федерального агентства научных организаций Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильчева Дальневосточного отделения Российской академии наук.

UDC 551.467

VARIABILITY OF HYDROMETEOROLOGICAL REGIME OF SEAS OF EAST ARCTIC SECTOR (EAST SIBERIAN, CHUKCHI) IN THE MODERN PERIOD

Vladimir V. Plotnikov^{1,2},
vlad_plot@poi.dvo.ru

Alexander N. Vrazhkin³,
avrazhkin@ferhri.ru

Lyudmila I. Mezentseva^{3,2},
festfu@mail.ru

Natalya I. Druz³,
hydromet@mail.ru

Nadezda M. Vakulskaya¹,
vakulskaya@poi.dvo.ru

Vyacheslav A. Dubina¹,
dubina@poi.dvo.ru

¹ V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS,
43, Baltiyskaya street, Vladivostok, 690041, Russia

² Far Eastern State Technical Fisheries University,
52b, Lugovaya street, Vladivostok, 690087, Russia

³ Far Eastern Regional Hydrometeorological Research Institute,
24, Fontannaya street, Vladivostok, 690091, Russia.

The relevance of the research. The rich resource base, the large transport and strategic importance of the Arctic Basin and, in particular, the seas of East Arctic, determine the relevance and necessity of researching the hydrometeorological regime variability of the region.

The main aim of the work is the analysis of variability of regional indicators of the hydrometeorological regime (wind regime, ice conditions and the nature of water mixing) in the East Siberian and Chukchi Seas over the last several decades (from 1979 to 2015).

Object of the research is the complex of the most significant indicators determining the nature of the hydrometeorological conditions of the region.

Methods. Methods of multivariate statistics and modeling were used to analyze the hydrometeorological regime variability of the region.

Results. On the basis of all available hydrometeorological information the analysis of the variability of regional indicators of the hydrometeorological regime is carried out. The conducted researches indicate the directional changes in the indicators of the hydrometeorological regime of the seas of East Arctic:

- the nature and intensity of atmospheric circulation over the region (a change of the nature and intensity of the wind regime is noted);
- in the ice cover of the seas (there is an active decrease of the ice cover);
- in the nature and intensity of wave activity (at the expense of the first two indicators, intensification of the wave activity expressed in a significant increase in the area and depth of wave mixing is observed).

In the future, the obtained estimates can be used to implement a number of probabilistic-statistical models of the hydrometeorological state variability, as well as in solving a number of practical problems, the economic development of areas of the seas of East Arctic.

Key words:

Hydrometeorological regime, ice cover, wind mixing, Chukchi and East Siberian Seas, atmospheric circulation.

The study was carried out with the financial support of the Russian Foundation for basic research (RFBR) in the framework of scientific project No. 18-05-60104.

REFERENCES

1. Formirovanie i dinamika sovremenennogo klimata Arktiki [Formation and dynamics of the modern Arctic climate]. Ed. by G.V. Alekseev. St. Petersburg. Gidrometeoizdat Publ., 2004. 266 p.
2. Ivanov V.V., Alexeev V.A., Alexeeva T.A., Koldunov N.V., Repina I.A., Smirnov A.V. Does Arctic Ocean ice cover become seasonal? *Research of the Earth from space*, 2013, no. 4, pp. 50–65. In Rus.
3. Alekseev G.V., Kuzmina S.I., Urazgildeeva A.V., Bobylev L.P. Impact of atmospheric heat and moisture transport on Arctic warming in winter. *Fundamental and Applied Climatology*, 2016, vol. 1, pp. 43–63. In Rus.
4. Alekseev G.V., Kuzmina S.I., Bobylev L.P., Urazgildeeva A.V., Gnaturk N.V. Influence of the atmospheric heat and moisture transport on summer warming in the Arctic. *Arctic and Antarctic research*, 2017, no. 3 (113), pp. 67–77. In Rus.
5. Gudkovich Z.M., Zakharov V.F., Aksenov E.O., Pozdnyshhev S.P. Vzaimosvyaz sovremennykh klimaticheskikh izmeneniy v atmosfere, okeane i ledyanom pokrove [Interrelation of modern climatic changes in the atmosphere, ocean and ice cover]. *Trudy AANII*, 1997, vol. 437, pp. 7–17.
6. Shalina E.V. Ice retreat in the seas of the Russian Arctic and increased availability of the Northern sea route from satellite

- passive microwave observations. *Research of the Earth from space*, 2015, no. 4, pp. 67–78. In Rus.
7. Alekseev G.V., Radionov V.F., Aleksandrov E.I., Ivanov N.E., Harlanenkova N.E. Arctic climate change under global warming. *Arctic and Antarctic research*, 2015, no. 1 (103), pp. 32–41. In Rus.
 8. Surkova G.V., Krylov A.A. Changes in average and extreme wind speeds in the Arctic at the end of the 21st century. *Arctic and Antarctic*, 2018, no. 3, pp. 26–36. In Rus.
 9. Kattsov V.M., Porfiriev B.N. Klimaticheskie izmeneniya v Arktike: posledstviya dlya okruzhayushchey sredy i ekonomiki [Climate change in the Arctic: the consequences for the environment and the economy]. *Arktika: ekologiya i ekonomika*, 2012, no. 2 (6), pp. 66–79.
 10. Frolov I.E., Gudkovich Z.M., Karklin V.P., Kovalev E.G., Smolyanitsky V.M. Climatic changes of ice conditions in the Arctic seas of the Eurasian shelf. *Arctic and Antarctic research*, 2007, no. 1 (75), pp. 149–160. In Rus.
 11. Gurvich I.A., Zabolotskikh E.V. Mesoscale polar lows over the Eastern Arctic Sector according to multisensor satellite remote sensing. *Modern problems of remote sensing of the Earth from space*, 2015, vol. 12, no. 3, pp. 101–112. In Rus.
 12. Alekseev G.V., Radionov V.F., Smolyanitsky V.M., Filchuk K.V. Results and prospects of the climate studies and climate service in the Arctic. *Arctic and Antarctic research*, 2018, vol. 64, no. 3, pp. 262–269. In Rus.
 13. Yulin A.V., Sharaturanova M.V., Pavlova E.A., Ivanov V.V. Seasonal and interannual changes of ice massifs in East Siberian Sea. *Arctic and Antarctic research*, 2018, vol. 64, no. 3, pp. 229–240. In Rus.
 14. Golubeva E.N., Platov G.A., Iakshina D.F. Numerical simulations of the current state of waters and sea ice in the Arctic Ocean. *Ice and Snow*, 2015, vol. 55, no. 2, pp. 81–92. In Rus.
 15. Alekseev G.V., Aleksandrov E.I., Glock N.I., Ivanov N.E., Smolyanitsky V.M., Kharlanenkova N.E., Yulin A.V. Arctic sea ice cover in connection with climate change. *Research of the Earth from space*, 2015, no. 2, pp. 5–19. In Rus.
 16. Alley R.B., Brigham-Grette J., Miller G.H., Polyak L., White J.W.C. *Past climate variability and change in the Arctic and at high latitudes. Final report by the U.S. Climate change science program and subcommittee on global change research. SAP 1.2*. Reston, VA, U.S. Geological Survey, 2009. 257 p.
 17. Lebrun M., Vancoppenolle M., Madec G., Massonnet F. Arctic sea-ice-free season projected to extend into autumn. *The Cryosphere*, 2019, vol. 13, pp. 79–96.
 18. Climate change 2007: Synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Eds. Bernstein L., Bosch P., Canziani O., Chen Zh., Christ R., Davidson O., Hare W., Huq S., Karoly D., Kattsov V., Kundzewicz Z., Liu J., Lohmann U., Manning M., Matsuno T., Menne B., Metz B., Mirza M., Nicholls N., Nurse L., Pachauri R., Palutikof J., Parry M., Qin D., Ravindranath N., Reisinger A., Ren J., Riahi K., Rosenzweig C., Rusticucci M., Schneider S., Sokona Y., Solomon S., Stott P., Stouffer R., Sugiyama T., Swart R., Tirpak D., Vogel C., Yohe G. Geneva, Switzerland, IPCC, 2008. 104 p.
 19. Francis J.A., Hunter E., Key J., Wang X. Clues to variability in Arctic minimum sea ice extent. *Geophysical Research Letters*, 2005, vol. 32, pp. L21501.
 20. Wu B., Wang J., Walsh J.E. Dipole anomaly in the winter Arctic atmosphere and its association with sea ice motion. *Journal of Climate*, 2006, vol. 19, pp. 210–225.
 21. Gudkovich Z.M., Proshutinsky A.Y., Timokhov L.A., Koltyshhev A.E., Garmanov A.L. Climatic changes of the upper layer salinity of Arctic ocean. World climate research programme (WCRP). *Arctic climate system study (ACSYS). Final science conference*. St. Petersburg, 2003, WCRP-118 (CD). WMO/TD № 1232. pp. 1–3.
 22. Bony S., Colman R., Kattsov V.M., Allan R.P., Bretherton C.S., Dufresne J.-L., Hall A., Hallegatte S., Holland M.M., Ingram W., Randall D.A., Soden B.J., Tselioudis G., Webb M.J. How well do we understand and evaluate climate change feedback processes? *Journal of Climate*, 2006, vol. 19, pp. 3445–3482.
 23. Johannessen O.M., Aleksandrov V., Frolov I.Y., Sandven S., Pettersson L.H., Bobylev L.P., Kloster K., Smirnov V.G., Mironov Y.U., Babich N.G. *Remote sensing of sea ice in the Northern sea route: studies and applications*. Chichester, UK, Praxis Publishing Ltd, 2007. 472 p.
 24. Liu Z., Schweiger A. Synoptic conditions, clouds, and sea ice melt onset in the Beaufort and Chukchi seasonal ice zone. *Journal of Climate*, 2017, vol. 30, no. 17, pp. 6999–7016.
 25. Peng G., Steele M., Bliss A.C., Meier W.N., Dickinson S. Temporal means and variability of Arctic sea ice melt and freeze season climate indicators using a satellite climate data record. *Remote Sensing*, 2018, vol. 10, pp. 1328.
 26. Kwok R., Cunningham G.F., Wensnahan M., Rigor I., Zwally H.J., Yi D. Thinning and volume loss of the Arctic Ocean sea ice cover: 2003–2008. *Journal of Geophysical Research*, 2009, vol. 114, pp. C07005.
 27. Melia N., Haines K., Hawkins E., Day J.J. Towards seasonal Arctic shipping route predictions. *Environmental Research Letters*, 2017, vol. 12, pp. 084005.
 28. Plotnikov V.V., Pustoshnova V.I. Variability and conjugacy of ice conditions in the system of East Arctic seas (the Laptev, East Siberian and Chukchi Seas). *Russian Meteorology and Hydrology*, 2012, vol. 37, no. 7, pp. 468–476.
 29. *Veter i volny v okeanakh i moryakh. Spravochnye dannye* [The winds and waves at oceans and seas. Reference data]. Eds. I.N. Davidan, L.I. Lopatukhin, V.A. Rozhkov. Leningrad, Transport Publ., 1974. 359 p.
 30. Dobrovolsky A.D., Zalogin B.S. *Morya SSSR* [Seas of USSR]. Moscow, Moscow State University Publ., 1982. 148 p.
 31. Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J., Berrisford P., Poli P., Kobayashi S., Andrae U., Balmaseda M.A., Balsamo G., Bauer P., Bechtold P., Beljaars A.C.M., van de Berg L., Bidlot J., Bormann N., Delsol C., Dragani R., Fuentes M., Geer A.J., Haimberger L., Healy S.B., Hersbach H., Holm E.V., Isaksen L., Kallberg P., Kohler M., Matricardi M., McNally A.P., Monge-Sanz B.M., Morcrette J.-J., Park B.-K., Peubey C., de Rosnay P., Tavolato C., Thepaut J.-N., Vitart F. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2011, vol. 137 (656), pp. 553–597.
 32. *User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 4.18. Technical Note 316. NOAA/NWS/NCEP/MMAB*. 2014. Available at: <http://polar.ncep.noaa.gov/waves/wavewatch/manual.v4.18.pdf> (accessed 22 November 2019).
 33. *User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 5.16. Technical Note 329. NOAA/NWS/NCEP/MMAB*. 2016. Available at: <https://polar.ncep.noaa.gov/waves/wavewatch/manual.v5.16.pdf> (accessed 22 November 2019).
 34. Lopatukhin L.I. *Vetrovoe volnenie* [Wind wave]. St. Petersburg, St. Petersburg State University Publ., 2012. 165 p.
 35. Nikiforov E.G. O syazi vetrovogo techeniya s vetrovym volneniem [On relation between the wind current and wind wave]. *Izvestiya AN SSSR. Seriya: geofizicheskaya*, 1956, no. 12, p. 1450–1460.

Received: 18 December 2019.

Information about the authors

Vladimir V. Plotnikov, Dr. Sc., chief researcher, V.I. Ilichev Pacific Oceanological Institute; professor, Far Eastern State Technical Fisheries University.

Alexander N. Vrazhkin, Cand. Sc., head of the department, Far Eastern Regional Hydrometeorological Research Institute.

Lyudmila I. Mezentseva, Cand. Sc., senior scientist, Far Eastern Regional Hydrometeorological Research Institute; associate professor, Far Eastern State Technical Fisheries University.

Natalya I. Druz, leading engineer, Far Eastern Regional Hydrometeorological Research Institute.

Nadezda M. Vakulskaya, scientist, V.I. Ilichev Pacific Oceanological Institute.

Vyacheslav A. Dubina, Cand. Sc., head of the laboratory, V.I. Ilichev Pacific Oceanological Institute.

УДК 553.98; 550.4

СОСТАВ БИОМАРКЕРОВ И ПРОИСХОЖДЕНИЕ НЕФТЕЙ АРЫСКУМСКОГО ПРОГИБА (ЮЖНЫЙ КАЗАХСТАН)

Мадишева Рима Копбосынкызы¹,
rimma_kz@mail.ru

Серебренникова Ольга Викторовна,
ovs49@yahoo.com

Исаев Валерий Иванович³,
isaevvi@tpu.ru

Портнов Василий Сергеевич¹,
vs_portnov@mail.ru

Оздоев Султан Мажитович⁴,
ozdoyevsultan@mail.ru

¹ Карагандинский Государственный Технический Университет,
Казахстан, 100027, г. Караганда, пр. Н. Назарбаева, 56.

² Институт химии нефти СО РАН,
Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 4.

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

⁴ Институт геологических наук имени К.И. Сатпаева,
Казахстан, 050010, г. Алматы, ул. Кабанбай батыра, 69/94.

На основании данных анализа индивидуального состава биомаркеров нефти из нижнего мела, нижней юры, палеозоя и протерозоя Арыскумского прогиба Южно-Торгайского нефтегазоносного бассейна реконструируются условия формирования нефтематеринских отложений, генерировавших нефти рассматриваемой территории. Исследование актуально для обоснования стратегии поисков нефтегазовых залежей с учетом тектоники фундамента Южного Казахстана.

Цель: выявить сходство и различие состава нефти залежей доюрского фундамента и состава нефти залежей в перекрывающих юрско-меловых осадочных толщах, определить особенности фациальных условий накопления нефтематеринского вещества на территории Арыскумского прогиба.

Объекты и методы: нефти из нижнего мела, нижней юры, палеозоя и протерозоя Арыскумского прогиба Южно-Торгайского нефтегазоносного бассейна. Состав нефти проанализирован методами газо-жидкостной хроматографии и хромато-масс-спектрометрии.

Результаты и выводы. Определено распределение в нефтях и индивидуальный состав алканов, н-алкилбензолов, нафталинов, фенантренов, хейлантанов, пентациклических тритерпанов и стеранов, рассчитаны геохимические параметры, отражающие особенности условий формирования нефтематеринских отложений. Полученные данные продемонстрировали генетическое единство нефти из нижнего мела и протерозоя Акшабулакской грабен-синглиниали, а также единый генезис нефти из нижнего мела и палеозоя Аксайской горст-антклиниали и отличие в фациальных условиях накопления нефтематеринских пород на этих территориях. В соответствии с данными о составе стеранов и пентациклических тритерпанов породы, продуцировавшие нефти в пределах Акшабулакской грабен-синглиниали, отличаются повышенным содержанием карбонатов и накапливаются в более глубокой части моря и в менее окислительных условиях, чем на территории Аксайской горст-антклиниали, где нефтематеринская толща содержит больше глинистой составляющей и отлагалась, видимо, в условиях засоленной лагуны. Нефть из нижней юры Бозингенской грабен-синглиниали генерирована отложениями, сформированными в опресненной дельтовой зоне.

Ключевые слова:

Состав нефти, углеводородные биомаркеры, нефтематеринские породы, доюрские отложения, Арыскумский прогиб, Южно Торгайский бассейн.

Введение

Промышленная нефтегазоносность Южно-Торгайской впадины, относящейся по толщине осадочного чехла, особенностям тектонических и литолого-стратиграфических характеристик к внутренним тектоническим осадочным бассейнам [1], была установлена в 1984 г. открытием месторождения Кумколь [2].

Впадина является крупной отрицательной структурой первого порядка, в строении которой участвуют три

структурные – Жиланшикский прогиб на севере, Арыскумский прогиб на юге и разделяющая их Мынбулакская седловина. Все месторождения (более 30) промышленной значимости открыты в Арыскумском прогибе.

Тектоническая характеристика Арыскумского прогиба подробно освещена в работах А.А. Абдуллина, С.Ж. Даукеева, Б.М. Куандыкова, А.Ш. Нажметдинова, У.А. Акчулакова, Р.Б. Сапожникова, Э.С. Воцалевского, З.Е. Булекбаева и др. [3–5].

Геодинамика, геологическое строение и нефтегазоносность впадины в разные годы были изучены В.И. Корчагиным и др. (1996), Г.Ж. Жолтаевым (1992, 2004), Т.Х. Парагульговым (2013), которые установили, что мезо-кайнозойский осадочный чехол перекрывает промежуточный комплекс средне-верхнепалеозойских отложений, который в свою очередь залегает на протерозойском плитном фундаменте [1, 6].

Нефтегазоносность Арыскумского прогиба связана с литолого-стратиграфическими комплексами юрско-меловых отложений, девонско-нижнекаменноугольными образованиями квазиплатформенного комплекса и дезинтегрированными выступами фундамента [1].

Исследования геохимической характеристики осадочного чехла показали, что юрско-меловые образования обладают превышающим кларковые значения содержанием различного типа органического вещества, преимущественно сапропелевого. В результате чего в качестве наиболее вероятной генерационной толщи приняты нижняя и среднеюурская, которые в совокупности с термобарическим условием бассейна генерировали жидкие углеводороды (УВ) [4, 7].

Предполагается наличие определенного потенциала нефтегазоносности доюрских отложений (промышленные притоки на месторождениях Акшабулак, Кызылкия, Кенлык) [8].

Ю.А. Волож с соавторами [9] относят палеозой Южно-Тургайской впадины к мало перспективным отложениям по причине дислоцированности и отсутствия хороших перекрывающих флюидоупоров. По их мнению, небольшие залежи УВ возможны в выветрелых и трещиноватых образованиях палеозоя при примыкании к ним нефтегазоносных мезозойских толщ.

М.К. Нуkenов и Е. Болат [10], в свою очередь, связывают перспективы палеозоя с развитием трещиноватости эрозионных поверхностей, благоприятной для аккумуляции углеводородов, мигрировавших из мезозойских толщ.

Цель настоящего исследования – методами газожидкостной и хромато-масс-спектрометрии выявить черты сходства и различия между составом УВ нефти, залегающих в доюрских отложениях фундамента Арыскумского прогиба, и нефти из перекрывающих их осадочных толщ, определить особенности фациальных условий накопления нефтематеринского вещества на территории Арыскумского прогиба.

Изотопный состав углерода нефти был изучен методом изотопной масс-спектрометрии на предыдущем этапе исследований.

Краткий обзор биомаркеров источника нефти

Об источнике нефти, условиях накопления и преобразования исходного органического вещества (ОВ) позволяют судить данные о составе углеводородных биомаркеров, представленных в нефтях такими соединениями, как алканы (н-алканы, изопреноиды), полициклические нафтены (хейлантаны, стераны, гопаны) и арены (нафталины, фенантрены и др.) [11].

Одним из наиболее распространенных в нефти классов биогенных органических соединений являются нормальные алканы [12, 13]. Результаты исследований [14–16] концентраций и характера молекулярно-массового распределения н-алканов показывают, что эти данные обладают генетической информативностью. Они отражают вклад различных биопродуцентов в компонентный состав исходного ОВ, типичного для морских, наземных и прибрежно-морских обстановок. Отношение пристан/фитан (П/Ф) возрастает от нефти, образованных морским сапропелевым органическим веществом, к нефтям, генерированным смешанным и континентальным гумусовым ОВ.

Но в первую очередь отношение П/Ф зависит от окислительно-восстановительных условий в бассейне седиментации [17–20]: $\text{Pr/Ph} < 1,0$ – резко восстановительная среда осадконакопления, $\text{Pr/Ph} 1,0–1,5$ – восстановительная, $\text{Pr/Ph} 1,5–2,0$ – слабо восстановительная среда или субокислительные условия осадконакопления, $\text{Pr/Ph} > 2,0$ – окислительные условия [21].

С увеличением термической преобразованности ОВ в нем снижается содержание изопреноидных алканов по отношению к нормальным и, наоборот, увеличивается при микробиальной переработке ОВ [17, 18]. Состав нефтяных стеранов – производных стеролов, присутствующих в различных представителях растительного и животного мира, также используется для распознавания источника [22] и условий накопления [23] исходного нефтематеринского вещества. Стероиды С27 являются основными в животных организмах и некоторых представителях морских красных водорослей [22, 24], стероиды С28 присутствуют в лишайниках, а придонные растения пресных водоемов и наземная растительность обогащены стероидами С29 [22, 25, 26].

Биомаркерный параметр – диастераны/регулярные стераны – применяется [27] для идентификации карбонатных нефтематеринских отложений: низкие значения параметра – безкислородная карбонатная фация, высокие – богатая глиной нефтематеринская порода. Однако на значение этого отношения оказывает влияние также термическая зрелость вследствие большей стабильности диастеранов по сравнению с регулярными стеранами [22]. Тем не менее соотношение С27, С28 и С29 регулярных стеранов и их перегруппированных изомеров часто используется для выявления взаимосвязи между нефтями и для определения источника ОВ [22, 23, 28].

Происхождение присутствующих в нефтях пентациклических гопанов относят на счет находящегося в мембранных прокариотов бактериогопанотеррола, трициклических хейлантанов – водорослевого материала. Наличие и содержание гаммацерана может указывать на соленость бассейна седиментации, а термически более устойчивый, чем гопаны, перегруппированный 17 α -диагопан – на глинистые фации. Повышенное относительное содержание хейлантанов в составе нефтяных терпанов может быть следствием высокой доли в составе исходного ОВ водорослевой или бактериальной составляющей. Все эти разновидности стеранов и терпанов обычно используют для корреляции

ляций нефть–нефть и для выявления специфики диагностики катагенеза нефтематеринских пород [22].

Ароматические УВ образуются в процессе преобразования ОВ в результате биохимических и термохимических реакций [29]. Тем не менее показано, что индивидуальный состав нафталинов может быть использован для определения фациальных условий отложения нефтематеринских толщ [30].

В составе нефти и рассеянного органического вещества (РОВ) пород триароматические УВ представлены в основном фенантреном и его метилзамещенными гомологами. Распределение метилфенантренов зависит от термической зрелости нефти. Для оценки зрелости ОВ пород часто используется метилфенантреновый индекс и рассчитанная на его основе величина, альтернативная отражательной способности витринита [31].

О методах исследований

Концентраты УВ из всех нефти получали по единой методике. Нефти разделяли методом адсорбционной хроматографии на колонки с окисью алюминия IV степени активности. В качестве подвижной фазы использовали гексан. За элюированием ароматических УВ следили спектрофотометрически и методом ТСХ на алюминиевых пластинах с силикагелем (УФ 254). Разделение и идентификацию состава алканов проводили методом газожидкостной хроматографии (ГЖХ) на газожидкостных хроматографах МОЗ «Хроматограф» (Модель 3700) и Perkin-Elmer Sigma 2B с применением пламенно-ионизационного детектора, в качестве газа носителя использовали гелий. Длина капиллярной колонки, смоченной фазой SE-52, составляла 33 м. Режим съемки – линейное программирование температуры со скоростью 4 градуса в минуту от начальной температуры 100 до 290 °C. По полученным данным ГЖХ были определены максимумы молекулярно-массового распределения на алканов (Max), рассчитаны параметры состава алканов: отношение П/Ф, П/н-C₁₇ и Ф/н-C₁₈.

Методом хромато-масс-спектрометрии с использованием магнитного хромато-масс-спектрометра Trace-DSQ фирмы «Thermo Scientific» (Германия) определено относительное содержание в нефтях алканов (Alks), алкилбензолов (ABs), нафталинов (Nfs), фенантренов (Ps), хейлантанов (Chs), гопанов и гаммацерана (Hs), диа- (DSts) и регулярных (Sts) стеранов. Режим работы хроматографа: кварцевая капиллярная хроматографическая колонка фирмы «Thermo Scientific» внутренним диаметром 0,25 мм, длиной 30 м, с фазой – TR-5MS, толщиной 0,25 мкм; газоноситель – гелий, температура испарителя 250 °C, температура интерфейса 250 °C. Масс-спектрометр: метод ионизации – электронный удар; энергия ионизирующих электронов – 70 эВ; температура ионизационной камеры – 250 °C; диапазон регистрируемых масс – 50–500 а.е.м.; длительность развертки спектра – 1 с. Идентификацию индивидуальных УВ проводили компьютерным поиском в библиотеке Национального Института Стандартов NIST-05, по литера-

турным данным и реконструкцией структур по характеру ионной фрагментации при электронном ударе. Содержание отдельных групп УВ рассчитывали по суммарной площади отдельных пиков с учетом поправочных коэффициентов, определенных для характеристических ионов каждого класса соединений: для молекулярных ионов алканов (m/z 57), би- (m/z 128, 142, 156, 170) и трициклических (m/z 178, 192, 206, 220) ароматических УВ, для фрагментных ионов стеранов (m/z 217, 218), хейлантанов и пентациклических терпанов (m/z 191).

Объекты исследования

Арыскумский прогиб имеет два структурных этажа – нижний представлен складчатым фундаментом палеозойского, протерозойского возраста, и верхний платформенный чехол – мезозойского и кайнозойского возраста. Основные залежи нефти сосредоточены в мезозойских песчано-алевролитовых отложениях.

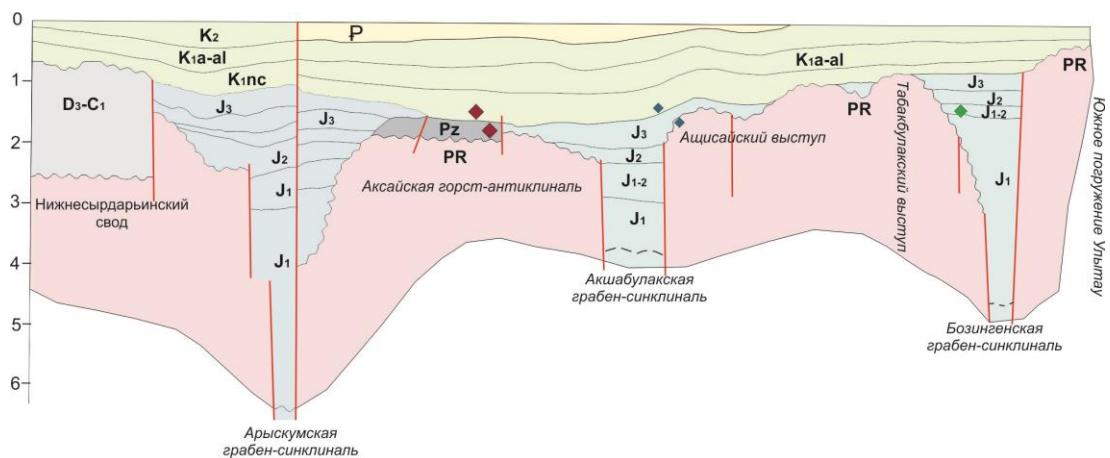
Слагающие домезозойский фундамент протерозойские образования представлены в различной степени метаморфизованными кварц-хлоритовыми, кварц-биотитовыми, хлорит-серпентитовыми, глинисто-кремнистыми и кремнистыми сланцами, гнейсами, а также эфузивными породами. Эти породы часто выветрелые и представлены под чехлом корой выветривания. На отдельных месторождениях породы коры выветривания нефтегазоносные.

К палеозойской группе отнесены породы, вскрытые скважинами в призабойных частях и представленные песчаниками, аргиллитами, алевролитами с прослоями известняков, туфов – как средневерхнедевонские, а известняки, доломиты с прослоями терригенных пород – как нижнекаменноугольные, которые в некоторых месторождениях являются главными нефтепродуктивными коллекторами.

Объектами исследования послужили три образца из осадочных отложений мезозоя (юра, мел) и два образца из доюрского комплекса месторождений Арыскумского прогиба (рис. 1, 2, табл. 1).

Таблица 1. Геологическая характеристика образцов нефти
Table 1. Geological characteristics of oil samples

| Индекс нефти Oil index | Возраст Age | Глубина, м Depth, m | Структурный элемент Structural element | Месторождение, скважина Field, well |
|---------------------------|--|------------------------|--|--|
| Боз-J1 Bos-J1 | J ₁₋₂ kr, J _{1-2ds} | 1703,3 | Бозингенская грабен-синклиналь Bisingen graben-synclinal | Сорколь, 101 Sorkol, 101 |
| Акш-K1 Aksh-K1 | K1nc1ar | 1623,0 | Акшабулакская грабен-синклиналь Akshabulak graben synclinal | Акшабулак, 12 Akshabulak, 12 |
| Акш-PR Aksh-PR | PR | 1900,0 | Акшабулакская грабен-синклиналь Akshabulak graben synclinal | Акшабулак, 18 Akshabulak, 18 |
| Акс-K1 Akc-K1 | K1nc1ar | 1468,0 | Аксайская горст- антиклиналь Aksay horst-anticline | Кенлык, 101 Kenlyk, 101 |
| Акс-Pz Akc-Pz | PZ | 1439,5 | Аксайская горст- антиклиналь Aksay horst-anticline | Кенлык, 141 Kenlyk, 101 |



Условные обозначения:

— тектонический разлом

J_1 — нижняя юра, J_2 — средняя юра, J_3 — верхняя юра,

K_1a-al — нижний мел, апт-альб, K_2 — верхний мел,

Pz — палеозой, PR — протерозой, D_3-C_1 — верхний девон-нижний карбон,

P — палеоген

Пробы: \blacklozenge — Акс-К1, Акс-Рз; \blacklozenge — Акш-К1, Акш-Рз; \blacklozenge — Боз-Д1.

Рис. 1. Стратиграфическое положение исследованных проб нефти на сводном ортогональном геологическом разрезе Арыскумского прогиба [4]

Fig. 1. Stratigraphic position of the studied oil samples in the combined orthogonal geological section of the Aryskum depression [4]

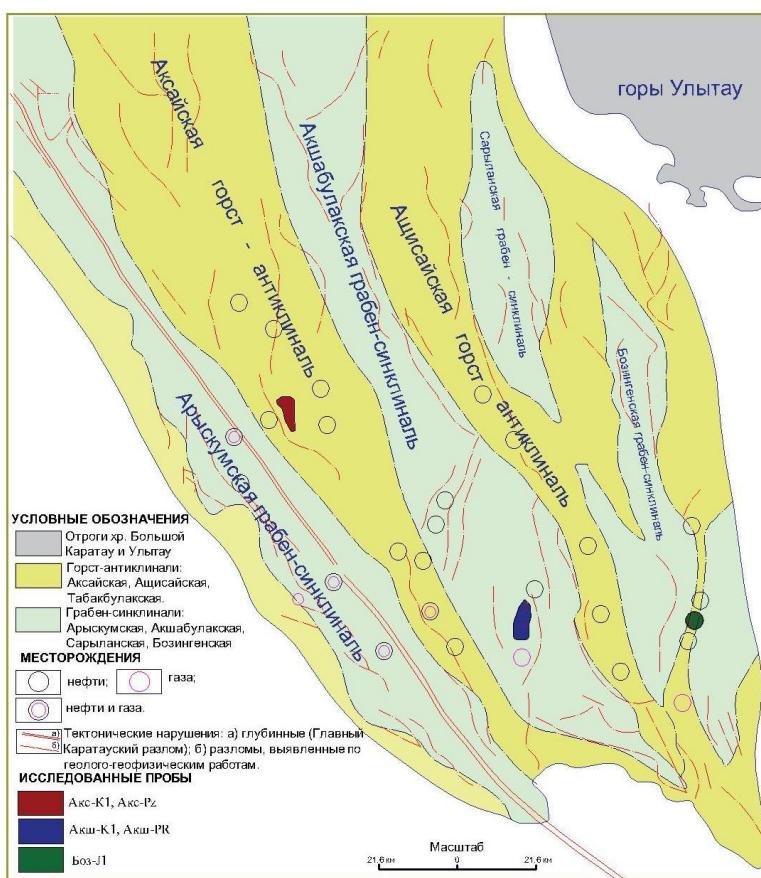


Рис. 2. Схема положения месторождений углеводородов и отбора исследуемых проб нефти на тектонической карте Арыскумского прогиба (по Э.С. Водалевскому [4])

Fig. 2. Diagram of location of hydrocarbon deposits and selection of the studied oil samples on the tectonic map of the Aryskum depression (by E.S. Votsalevskiy [4])

Большинство нефти Арыскумского прогиба парафинистые (содержание парафина до 15 % и более), малосернистые. Анализ физико-химических свойств нефти исследованных месторождений приведен в табл. 2.

Таблица 2. Физико-химические свойства нефти Арыскумского прогиба

Table 2. Physicochemical properties of oil of the Aryskum depression

| Месторождение Field | Возраст Age | Содержание, %/Content, % | | | | | Плотность, г/см ³ Density, g/cm ³ |
|-------------------------|---|--------------------------|---------------------------|-----------------|-----------------------|------|--|
| | | Сера Sulfur | Асфальтены Asphaltenes | Смолы Resins | Парафины Paraffins | | |
| Кенлык Kenlyk | K1nc1ar | 0,32 | 0,07 | 5,7 | 12,9 | 0,81 | |
| Кенлык Kenlyk | PZ | 0,28 | 0,05 | 3,6 | 17,3 | 0,78 | |
| Сорколь Sorkol | J ₁₋₂ kr, J ₁₋₂ ds | 0,08 | 0,2 | 4,2 | 10,1 | 0,82 | |
| Акшабулак Akshabulak | K1nc1ar | 0,23 | – | 8,44 | 14,38 | 0,82 | |

Литокомплексы, формирующие юрский и мел-палеогеновый структурные этажи осадочного чехла Южно-Торгайского нефтегазоносного бассейна (НГБ), существенно отличаются друг от друга. Особенностью юрских литокомплексов является формирование их в исключительно внутриконтинентальных условиях, характеризующихся активным тафрогенным тектоническим режимом, обусловившим, в свою очередь, формирование узких линейно-вытянутых грабенов, расширяющихся вверх по разрезу по каждому выполняющему их ритмокомплексу отложений и разделенных относительно плоскими, устойчивыми выступами фундамента, не испытавшими активного воздымания (рис. 1).

Мел-палеогеновый структурный этаж Южно-Торгайского НГБ формировался в период длительных прерывисто-пульсационных прогибаний Туранской плиты, сопровождавшихся морскими трансгрессиями [32].

К началу мелового периода относится формирование постепенно расширяющейся Арыскумской синеклизы, в контуры которой в верхнемеловую и палеогеновую эпохи были вовлечены обрамляющие ее территории в связи со сменой внутриконтинентального режима осадконакопления морским.

Таким образом, фациальные условия накопления осадков продуктивного разреза менялись от внутриконтинентального режима в юре до осадконакопления в морском режиме в мел-палеогене.

По стратиграфической приуроченности в разрезе впадины выделяют три нефтегазоносных комплекса: юрский, нижнемеловой и нефтегазоносный комплекс коры выветривания доюрских образований.

Как уже было отмечено выше, домозойский нефтегазоносный комплекс ранее не выделялся как самостоятельный [33]. Но к настоящему времени установлены нефтегазопроявления в доюрских обра-

зований, включая промышленные притоки на месторождениях Акшабулак, Кызылкия, Кенлык и др.

Геохимическая характеристика нефти Арыскумского прогиба

Основным классом биогенных органических соединений в исследованных нефтях являются алканы (табл. 3). Их содержание среди идентифицированных соединений в нефтях Бозингенской и Акшабулакской грабен-синклинали составляет 92–94 % и возрастает в нефтях Аксайской горст-антиклинали до 98 %.

Таблица 3. Относительное содержание отдельных классов соединений в нефтях Арыскумского прогиба

Table 3. Relative content of individual classes of biomarkers in oils of the Aryskum depression

| Индекс нефти Oil index | Боз-J1 | Акш-К1 | Акш-PR | Акс-К1 | Акс-Рз |
|--|--|--------|--------|--------|--------|
| Группа соединений* Group of compounds | Содержание, % относительный Content, % relative | | | | |
| Alks (m/z 57) | 94,2 | 93,5 | 93,0 | 98,1 | 98,3 |
| ABs (m/z 92) | 0,35 | 0,22 | 0,24 | 0,11 | 0,09 |
| Nfs (m/z 128+142+156+170) | 3,05 | 2,40 | 3,24 | 1,01 | 0,97 |
| Ps (m/z 178+192+206+220) | 1,27 | 0,91 | 1,29 | 0,23 | 0,24 |
| PCTs (m/z 191) | 0,93 | 2,70 | 1,98 | 0,44 | 0,35 |
| Dsts (m/z 217) | 0,08 | 0,09 | 0,09 | 0,04 | 0,03 |
| Sts (m/z 217) | 0,09 | 0,18 | 0,17 | 0,04 | 0,03 |

*Alks – алканы, ABs – н-алкилбензолы, Nfs – нафталины, Ps – фенантрены, PCTs – пентациклические тритерпены, Dsts – диастераны, Sts – регулярные стераны.

*Alks – alkanes, ABs – n-alkylbenzenes, Nfs – naphthalenes, Ps – phenanthrenes, PCTs – pentacyclic triterpanes, Dsts – diasterans, Sts – regular steranes.

Газовая хроматография показывает, что нефти залежей фундамента и перекрывающего мезозоя имеют схожее распределение н-алканов (рис. 3). Подобная схожесть распределения может свидетельствовать о генетическом единстве нефти из мезозоя и доюрского комплекса.

Величина отношения П/Ф, которая используется в качестве показателя обстановок диагенеза, свидетельствует о сходстве нефти из отложений мела и протерозоя Акшабулакской грабен-синклинали (1,6 и 1,8), также практически идентична для нефти из мела и палеозоя Аксайской горст-антиклинали (2,7 и 2,6) и несколько выше (3,1) в нефти из нижней юры Бозингенской грабен-синклинали. Это показывает, что исходное ОВ, продуцировавшее нефти Акшабулакской грабен-синклинали, формировалось в субокислительных, Аксайской горст-антиклинали и Бозингенской грабен-синклинали – в окислительных условиях.

Выполнены расчеты геохимических параметров – отношение пристана к н-C₁₇ и фитана к н-C₁₈, дающие оценку степени зрелости нефти. Расчеты показывают, что все исследованные нефти мало отличаются по своей термической преобразованности и относятся к категории «зрелые» (рис. 4). Коэффициент нечетности (CPI) по ряду C₂₀–C₃₂ меняется в пределах 1,11–1,17.

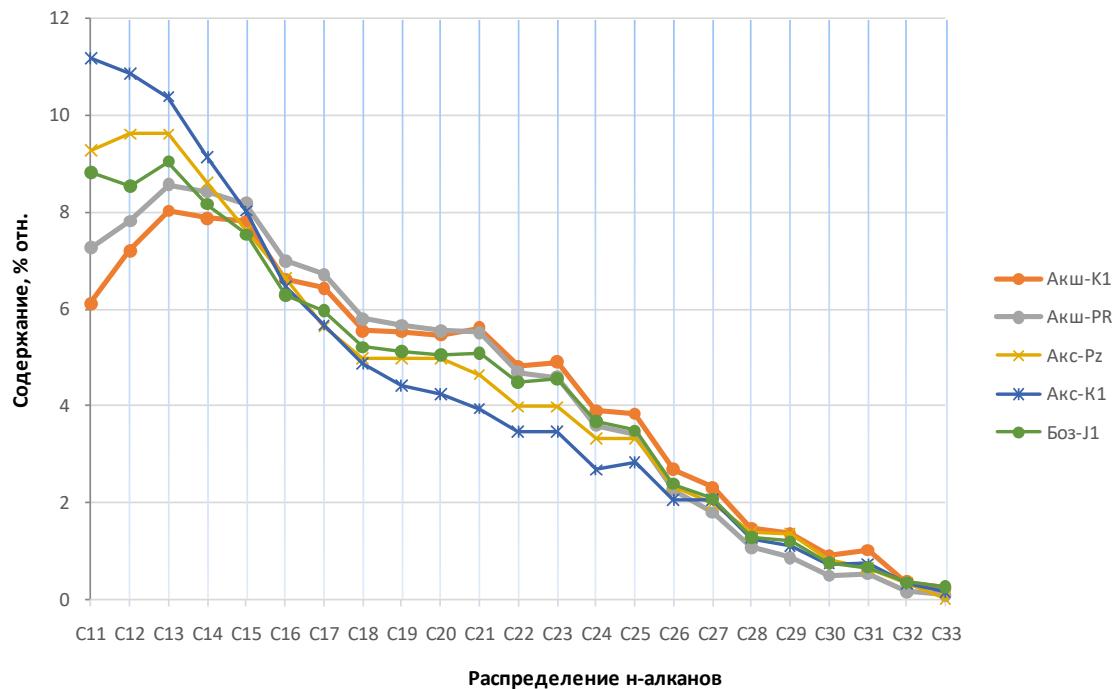


Рис. 3. Распределение нормальных алканов

Fig. 3. Distribution of normal alkanes

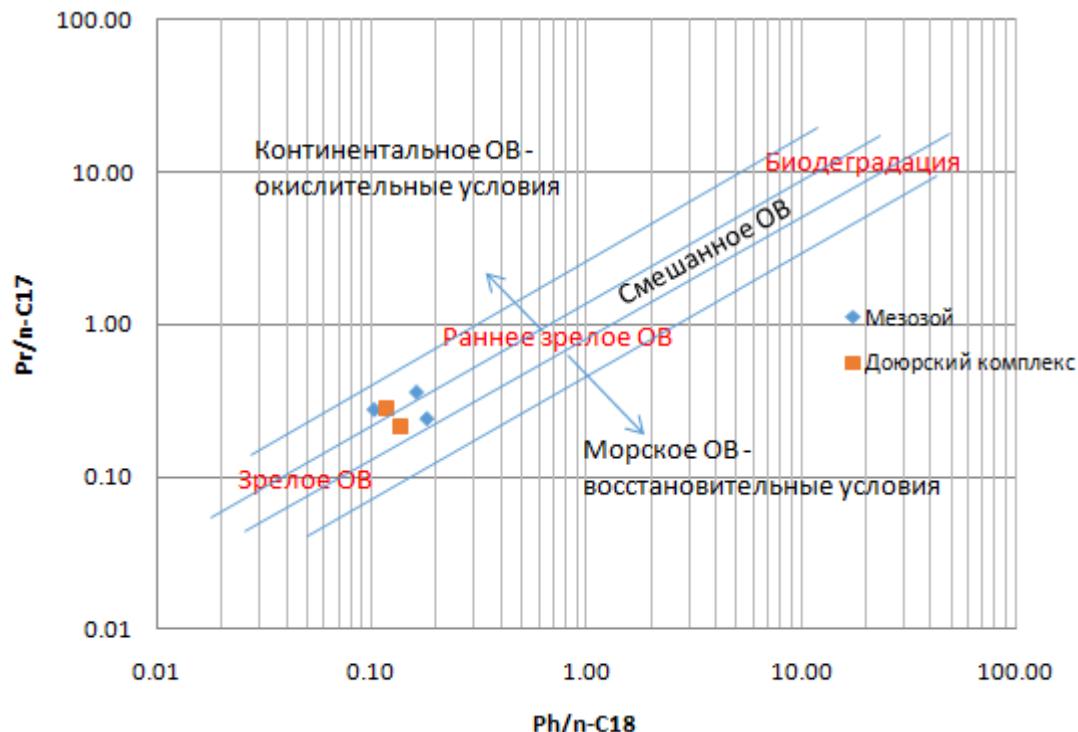


Рис. 4. Зрелость нефти Арыскумского прогиба по соотношению изопреноидных и нормальных алканов

Fig. 4. Oil maturity of the Aryskum depression by the ratio of isoprenoid and normal alkanes

Состав одной из основных групп биомаркеров – стеранов, несмотря на их низкое содержание в нефтях Арыскумского прогиба, демонстрирует идентичность палеогеографических условий формирования исходного нефтематеринского вещества нефти из меловых отложений, отлагавшихся, видимо, в морских, возможно, мелководных условиях, и нефти из прилегающих к ним коллекторов фундамента (рис. 5).

Исходное ОВ нефти, залегающей в отложениях нижней юры Бозингенской грабен-синклинали, на востоке исследованной территории, накапливалось, видимо, вблизи дельты, что согласуется с повышенным в этой нефти значением отношения П/Ф, свидетельствующим о более высоком окислительно-восстановительном потенциале в бассейне седиментации.

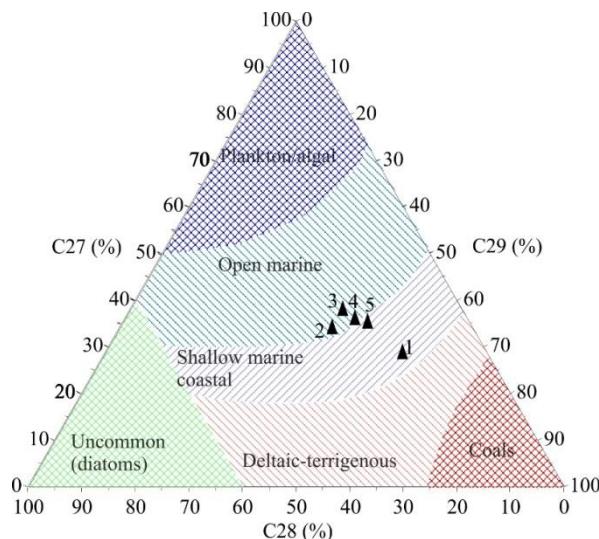


Рис. 5. Тройная диаграмма состава изостеранов (m/z 218) [19] нефти Арыскумского прогиба: 1 – Боз-Д1; 2 – Акш-К1; 3 – Акш-ПР; 4 – Акс-К1; 5 – Акс-Рз

Fig. 5. Triple diagram of composition of the steranes [19] of the Aryskum depression oils: 1 – Boz-J1; 2 – Aksh-K1; 3 – Aksh-PR; 4 – Aks-K1; 5 – Aks-Pz

Нефти из мела и протерозоя Акшабулакской грабен-синклинали, наряду с пониженной величиной П/Ф, отличаются от залегающих западнее более низким содержанием в составе стеранов перегруппированных структур диастеранов (табл. 4). Это может быть следствием возрастания содержания карбонатов и снижения доли обломочного материала в отложениях, генерировавших нефти на этом участке, по сравнению с расположенной западнее областью Аксайской горст-антиклинали, а утяжеление в этом направлении изотопного состава углерода свидетельствует, в соответствии с [30], о преимущественно сапропелевом исходном ОВ акшабулакских нефти и возрастании в нем доли гумусовой составляющей на западе исследованной территории и в пределах Бозингенской грабен-синклинали.

Таблица 4. Значения генетических параметров состава биомаркеров и изотопный состав углерода нефти Арыскумского прогиба

Table 4. Values of the genetic parameters of composition of biomarkers and isotopic composition of carbon oils of Aryskum depression

| Индекс нефти Oil index | Боз-Д1 | Акш-К1 | Акш-ПР | Акс-К1 | Акс-Рз |
|---------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| P/Ph | 3,1 | 1,6 | 1,8 | 2,6 | 2,7 |
| Sts | C27<C29 | C27<C29 | C27<C29 | C27<C29 | C27<C29 |
| Sts27/ Sts29 | 0,50 | 0,66 | 0,77 | 0,64 | 0,63 |
| Dst27/St29 | 0,36 | 0,29 | 0,31 | 0,47 | 0,46 |
| Si29/H30 | 0,31 | 0,15 | 0,19 | 0,24 | 0,30 |
| H29/H30 | 0,48 | 0,54 | 0,58 | 0,47 | 0,48 |
| G/H30 | 0,04 | 0,08 | 0,07 | 0,16 | 0,13 |
| $\delta^{13}\text{C}$, ‰ | -28,3 | -30,7 | -29,4 | -28,7 | -28,2 |
| Ki | 0,20 | 0,21 | 0,18 | 0,21 | 0,27 |
| Ts/Tm | 1,05 | 1,14 | 1,26 | 0,69 | 0,91 |
| Sts29 20S/20R | 0,53 | 0,78 | 0,79 | 0,48 | 0,59 |
| Sts29 Iso/Regular | 1,08 | 0,75 | 1,02 | 0,71 | 0,84 |
| MPI | 0,54 | 0,45 | 0,42 | 0,41 | 0,48 |

Основным классом среди насыщенных циклических биомаркеров в исследованных нефтях являются пентациклические тритерпаны. Они представлены C_{27} (Ts и Tm), C_{29} и C_{30} гопанами, S и R эпимерами гомогопанов C_{31-35} и гаммацераном. Состав пентациклических тритерпанов для всех нефей идентичен, но в их распределении фиксируются незначительные отличия (рис. 6, табл. 3). Так, на фоне преобладающего в их составе C_{30} гопана, в разных нефтях незначительно варьирует доля норгопана (C₂₉), высокое содержание которого отвечает богатой карбонатами нефтематеринской породе [22].

Для нефей, залегающих в пределах Аксайской горст-антиклинали, зафиксировано повышенное относительное содержание гаммацерана (гаммацерановый индекс G/H30 составляет 0,13–0,16), что указывает, в соответствии с [22, 34, 35], на более высокую соленость участка бассейна, в котором проходило накопление их исходного ОВ. Минимальным значением G/H30 и одновременно максимальным значением П/Ф отличается нефть из нижней юры (табл. 3), что свидетельствует о накоплении ее исходного нефтематеринского вещества в условиях опресненно-гидротермального водоема.

Хейлантаны отсутствуют в нефти из нижней юры Бозингенской грабен-синклинали. В остальных нефтях присутствуют в следовых количествах, показывая низкий вклад водорослевого материала в исходное нефтематеринское вещество по сравнению с содержащими гопановые структуры прокариотическими организмами [22]. Наличие C_{24} тетрациклического терпана зафиксировано в нефтях Акшабулакской грабен-синклинали и Аксайской горст-антиклинали. Величина отношения tetracyclic-C24/H30 для них составляет 0,007–0,009 и 0,014–0,015, соответственно.

Полученные данные свидетельствуют о том, что нефтепродуцировавшая толща, по всей вероятности, мелового возраста, в пределах Акшабулакской грабен-синклинали накапливалась в более глубокой части моря, чем одновозрастные осадки Аксайской горст-антиклинали, отлагавшиеся, видимо, в лагунных условиях, а нижнеюрские осадки Бозингенской грабен-синклинали – в опресненной дельтовой зоне.

В составе ароматических УВ всех исследованных нефей преобладают бициклические нафталины (табл. 2), представленные преимущественно нафталином, монометил- (МН), диметил- (ДМН) и trimethylзамещенными (ТМН) нафталинами (рис. 7).

Наряду с ними зафиксировано наличие этил- и метилпропил-замещенных нафталинов. Распределение содержания изомеров внутри ДМН и ТМН для всех нефей, независимо от возраста вмещающих отложений, практически идентично. В то же время нефти из меловых отложений и палеозоя Аксайской горст-антиклинали отличаются от остальных повышенной долей в составе нафталинов монометилзамещенных соединений, а среди них – значительным преобладанием 2-метилнафталина над его изомером (1-метилнафталином). Это свидетельствует о меньшей степени термической преобразованности ОВ [36], продуцировавшего нефти Аксайской горст-антиклинали. В нефти из нижней юры Бозингенской гра-

бен-синклинали заметно выше относительное содержание нафталина с пропильным заместителем (2-метил,1-пропил-нафталина), источник которого пока не опреде-

лен, но повышенное содержание этого соединения может быть обусловлено спецификой условий накопления ОВ в осадках нижней юры.

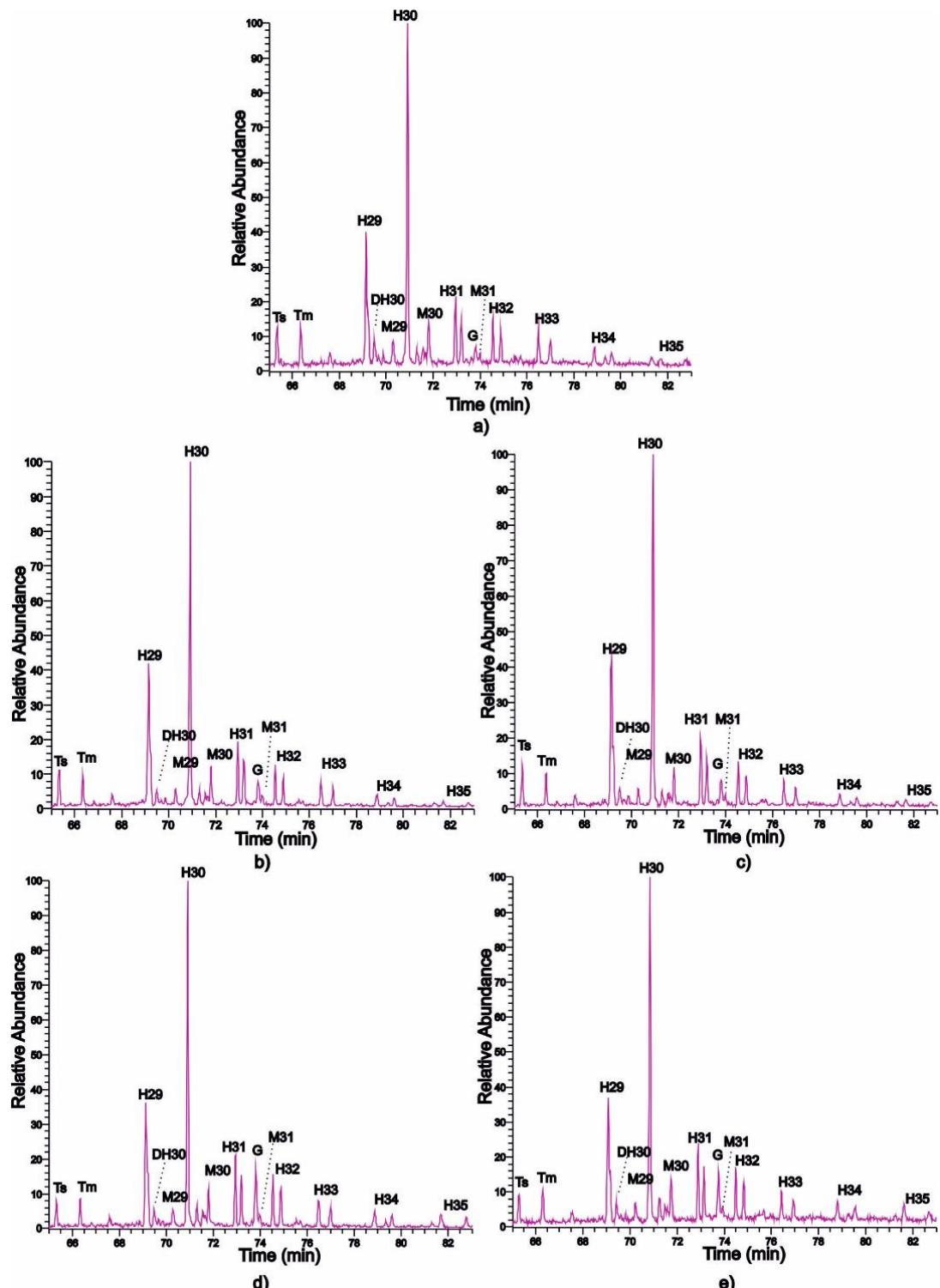


Рис. 6. Масс-фрагментограммы пентациклических терпанов нефти Арыскумского прогиба: a) Боз-К1; b) Акши-К1; c) Акши-PR; d) Акс-К1; e) Акс-Рз по m/z 191: H29, H30 – C_{29} , C_{30} гопаны ($17\alpha, 21\beta$); M – моретаны (гопаны $17\beta, 21\alpha$); H31–H35 – гомогопаны C_{31} – C_{35} ($17\alpha, 21\beta$); DH – диагопан; G – гаммацеран; Ts – трисорнорогопан; Tm – трисноргопан

Fig. 6. Mass fragmentograms of pentacyclic terpanes of oils from the Arys Kum depression: a) Boz-K1; b) Aksh-K1; c) Aksh-PR; d) Aks-K1; e) Aks-Pz in m/z 191: H29, H30 – C_{29} , C_{30} hopanes ($17\alpha, 21\beta$); M – Moretans (Gopans $17\beta, 21\alpha$); H31–H35 – homogopans C_{31} – C_{35} ($17\alpha, 21\beta$); DH – diopopan; G – gammaceran; Ts – trisornorogopane; Tm – Trisnorgopan

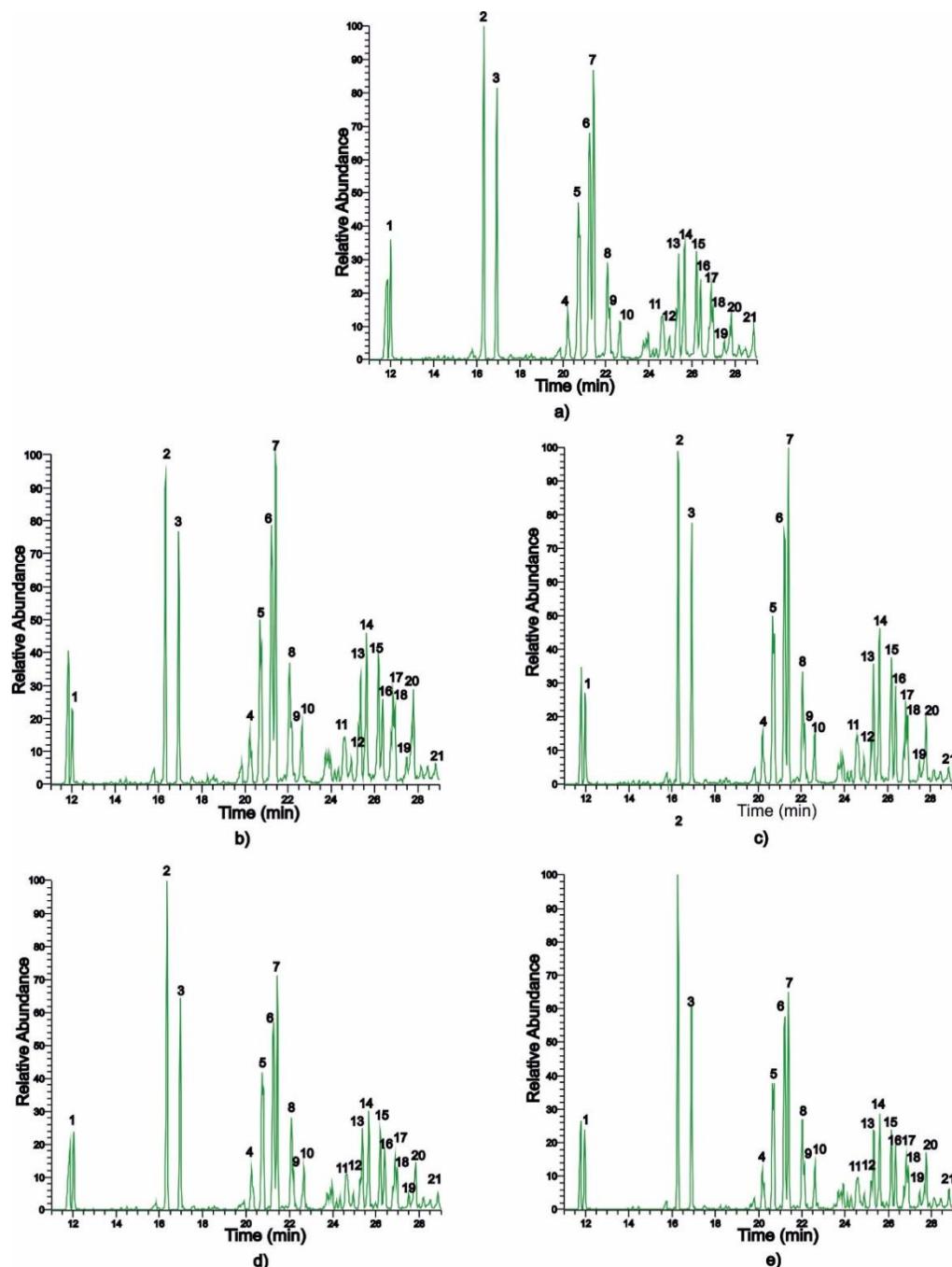


Рис. 7. Mass-фрагментограммы нафталинов нефти Арыскумского прогиба: а) Боз-Ж1; б) Акши-К1; в) Акши-ПР; г) Акс-К1; е) Акс-Пз по m/z 128; 142; 156; 170: 1 – нафталин; 2 – 2-МН; 3 – 1-МН; 4 – 2-этилнафталин; 5 – 2,6-ДМН; 6 – 2,7-ДМН; 7 – (1,3+1,7)-ДМНы; 8 – 1,6-ДМН; 9 – 1,5-ДМН; 10 – 1, 2-ДМН; 11, 12 – этил, метилнафталины; 13 – 1,3,7-ТМН; 14 – 1,3,6-ТМН; 15 – (1,3,8+1,4,5)-ТМНы; 16 – 2,3,6-ТМН; 17 – 1,2,7-ТМН; 18 – (1,6,7+1,2,6)-ТМНы; 19 – 1,2,4-ТМН; 20 – 1,2,5-ТМН; 21 – 2-метил, 1-пропил-нафталин

Fig. 7. Mass fragmentograms of naphthalene oils of the Arysium depression: a) Boz-J1; b) Aksh-K1; c) Aksh-PR; d) Aks-K1; e) Aks-Pz in m/z 128; 142; 156; 170: 1 – naphthalene; 2 – 2-MN; 3 – 1-MN; 4 – 2-ethylnaphthalene; 5 – 2,6-DMN; 6 – 2,7-DMN; 7 – (1,3+1,7)-DMNs; 8 – 1,6-DMN; 9 – 1,5-DMN; 10 – 1, 2-DMN; 11, 12 – ethyl, methyl naphthalenes; 13 – 1,3,7-TMN; 14 – 1,3,6-TMN; 15 – (1,3,8+1,4,5)-TMNs; 16 – 2,3,6-TMN; 17 – 1,2,7-TMN; 18 – (1,6,7+1,2,6)-TMNs; 19 – 1,2,4-TMN; 20 – 1,2,5-TMN; 21 – 2-methyl, 1-propyl-naphthalene

Все исследованные нефти характеризуются низким содержанием моноциклических ароматических УВ (алкилбензолов). Их состав для всех нефтей идентичен. Они представлены набором гомологов C_{10} – C_{34} преимущественно с одним алкильным заместителем, среди которых преобладают C_{12} – C_{14} .

Содержание фенантренов – трициклических ароматических УВ – в нефтях Арыскумского прогиба выше, чем алкилбензолов, но ниже, чем нафталинов. Отношение содержания нафталинов к фенантренам повышенено в нефтях на западе исследованной территории в отложениях мела и палеозоя Аксайской

горст-антиклинали (4,0–4,4) по сравнению с нефтями из юры, мела и протерозоя Акшабулакской и Бозингенской грабен-синклиналей (2,4–2,6), что указывает

на особенность состава исходного нефтематеринского вещества и, как следствие, нефти западного участка.

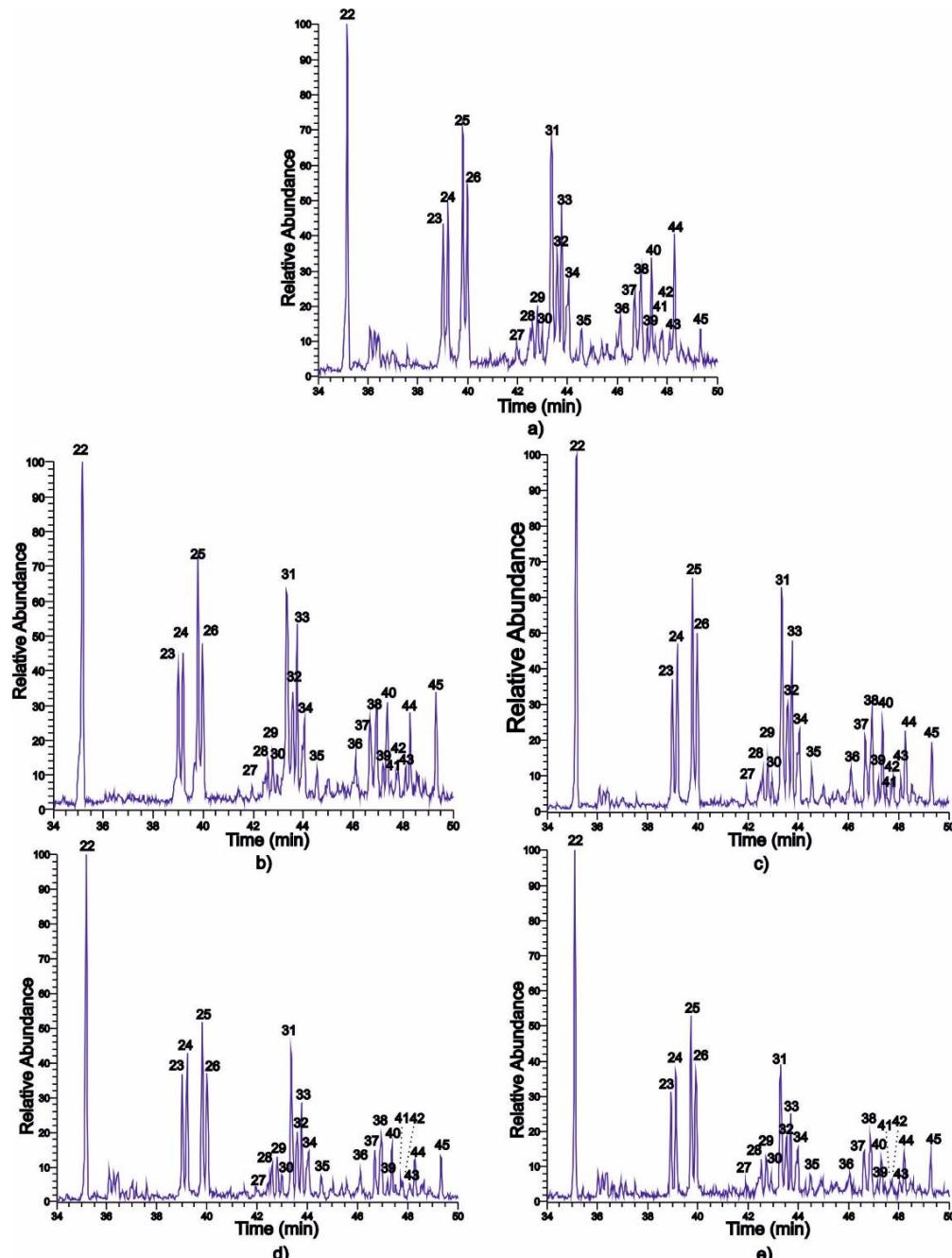


Рис. 8. Масс-фрагментограммы фенантренов нефти Арыскумского прогиба: а) Боз-Ж1; б) Акш-К1; в) Акш-РР; д) Акс-К1; е) Акс-Рз по m/z 178; 192, 206, 220: 22 – фенантрен; 23 – 3-МФ; 24 – 2-МФ; 25 – 9-МФ; 26 – 1-МФ; 27 – этилфенантрен; 28 – 3,6-ДМФ; 29 – 2,6-ДМФ; 30 – 2,7-ДМФ; 31 – (3,9+3,10+2,10+1,3)-ДМФы; 32 – (2,9+1,6)-ДМФы; 33 – 1,7-ДМФ; 34 – 1,9-ДМФ; 35 – 1,8-ДМФ; 36 – метил, этил-фенантрен; 37 – (1,3,6+1,3,10+2,6,10)-ТМФы; 38 – (1,3,7+2,6,9+2,7,9)-ТМФы; 39 – (1,3,9+2,3,6)-ТМФы; 40 – (1,6,9+1,7,9+2,3,7)-ТМФы; 41 – 1,3,8-ТМФ; 42 – 2,3,10-ТМФ; 43 – 1,6,7-ТМФ; 44 – 1,2,6-ТМФ; 45 – 1,2,8-ТМФ. Идентификация пиков ди- и trimethylфенантренов соответствует [39, 40].

Fig. 8. Mass fragmentograms of phenanthrenes of oils from the Arys Kum depression: a) Boz-J1; b) Aksh-K1; c) Aksh-PR; d) Aks-K1; e) Aks-Pz in m/z 178; 192, 206, 220: 22 – phenanthrene; 23 – 3-MF; 24 – 2-MF; 25 – 9-MF; 26 – 1-MF; 27 – ethylphenanthrene; 28 – 3,6-DMF; 29 – 2,6-DMF; 30 – 2,7-DMF; 31 – (3,9+3,10+2,10+1,3)-DMFs; 32 – (2,9+1,6)-DMFs; 33 – 1,7-DMF; 34 – 1,9-DMF; 35 – 1,8-DMF; 36 – methyl, ethyl-phenanthrene; 37 – (1,3,6+1,3,10+2,6,10)-TMFs; 38 – (1,3,7+2,6,9+2,7,9)-TMFs; 39 – (1,3,9+2,3,6)-TMFs; 40 – (1,6,9+1,7,9+2,3,7)-TMFs; 41 – 1,3,8-TMF; 42 – 2,3,10-TMF; 43 – 1,6,7-TMF; 44 – 1,2,6-TMF; 45 – 1,2,8-TMF. The identification of the peaks of di- and trimethylphenanthrenes corresponds to [39, 40].

В индивидуальном составе фенантренов во всех нефтях доминирует незамещенный фенантрен (рис. 8), среди метилфенантренов – 9-метилфенантрен, преобладание которого указывает на морские условия накопления исходного органического материала [37]. Особенностью состава фенантренов нефти из нижней юры Бозингенской грабен-синклинали является повышенная доля 1,2,6-триметилфенантрена, происхождение которого связывают с наземным источником [38].

Выводы

1. В нефтях Арыскумского прогиба определен индивидуальный состав и относительное содержание алканов, н-алкилбензолов, нафталинов, фенантренов, пентациклических тритерпанов и стеранов, рассчитаны геохимические параметры, отражающие особенности условий формирования нефтематеринских отложений.
2. Близкие значения геохимических параметров и одинаковый характер распределения н-алканов, стеранов, хейлантанов, пентациклических терпанов, алкилбензолов, нафталинов и фенантренов в нефтях из мезозойского и доюрского комплексов в пределах отдельных структур свидетельствуют о генетическом единстве нефти из нижнего мела и протерозоя Акшабулакской грабен-синклинали, а также генетическом единстве нефти из нижнего мела и палеозоя Аксайской горст-антиклинали.
3. Нефти, залегающие в отложениях нижнего мела и протерозоя в пределах Акшабулакской грабен-

синклинали, отличаются от остальных повышенным содержанием норгопана, указывающим на больший вклад карбонатов в генерировавшие их нефтематеринские породы. Для этих нефти характерны более низкие величины отношения пристана к фитану, свидетельствующие о формировании исходного органического вещества в менее окислительных условиях, чем на территории Аксайской горст-антиклинали, нефти которой, залегающие в нижнем мелу и палеозое, характеризуются более высоким содержанием гаммацерана и диастеранов, что указывает на повышенную соленость бассейна, представлявшего собой, видимо, засоленную лагуну, в которой отлагалась преимущественно глинистая нефтематеринская толща.

4. Особенностями состава УВ нефти из нижней юры Бозингенской грабен-синклинали являются отсутствие в ней хейлантанов и C_{24} тетрациклического терпана, а также низкая доля стеранов C_{27} , указывающие на незначительный вклад водорослевого материала в исходное нефтематеринское вещество, повышенная доля в составе фенантренов 1,2,6-триметилфенантрена, происхождение которого связывают с наземным источником, максимальное значение отношения пристана к фитану, характеризующее окислительные условия в диагенезе, и очень низкое содержание гаммацерана. Повидимому, нефть из нижней юры Бозингенской грабен-синклинали генерирована отложениями, сформированными в опресненной дельтовой зоне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Торгайско-Сырдарыинский регион – эволюция глубинного строения и проблемы минерагенации / Т.Х. Парагульгов, Х.Х. Парагульгов, Е.М. Фазылов, Л.В. Шабалина // Региональная геология, Известия Национальной Академии наук Республики Казахстан. – 2013. – № 2. – Р. 8–18.
2. Месторождения нефти и газа Казахстана. Справочник / под ред. А.М. Кажегельдина, А.А. Абдуллина, Х.А. Беспаева, Э.С. Воцалевского, С.Ж. Даукеева, Л.А. Мирошниченко. – Алматы: Минеральные ресурсы Казахстана, 1996. – 324 с.
3. Куандыков Б.М., Нажметдинов А.Ш., Сапожников Р.Б. Строение глубокопогруженных отложений Арыскумского прогиба Южно-Торгайской впадины по сейсмостратиграфическим данным // Геология нефти и газа. – 1992. – № 11. – С. 22–27.
4. Глубинное строение и минеральные ресурсы Казахстана. Нефть и газ. Т. III / С.Ж. Даукеев, Б.С. Ужкенов, А.А. Абдуллин, Х.А. Беспаев, Э.С. Воцалевский, В.Н. Любецкий, А.К. Мазуров, Л.А. Мирошниченко. – Алматы: Республиканское Государственное предприятие «Информационно-аналитический центр геологии и минеральных ресурсов Республики Казахстан», 2002. – 248 с.
5. Акчулаков У.А., Бигараев А.Б., Абдазимов У.А. Арыскумский трансконтинентальный рифтовый пояс и его нефтегазоносность // Нефть и газ. – 2013. – № 5 (77). – С. 75–81.
6. Корчагин В.И., Карпов В.И., Пузанова И.В. Геологическое строение и нефтегазоносность Торгайской нефтегазоносной области // Геология нефти и газа. – 1996. – № 5. – С. 38–46.
7. Оздоев С.М. Перспективы нефтегазоносности осадочных бассейнов Казахстана // Известия Национальной Академии наук Республики Казахстан, Серия геологии и технических наук. – 2012. – № 1 (435). – С. 61–76.
8. Южно-Торгайский осадочный бассейн – вещественный состав и нефтегазоносность домезозойских образований / Т.Х. Парагульгов, Х.Х. Парагульгов, Е.М. Фазылов, Э.С. Мусина // Известия Национальной Академии наук Республики Казахстан, Серия геологии и технических наук. – 2013. – № 1. – С. 44–54.
9. Особенности строения палеозойских отложений Тургайско-Сырдарыинского и Устюртского регионов (в связи с перспективами нефтегазоносности глубоких горизонтов осадочного чехла) / Ю.А. Волож, В.А. Быкадоров, М.П. Антипов, Р.Б. Сапожников // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2016. – Т. 11. – № 4. – С. 1–46.
10. Нукенов М.К., Болат Е. Строение и перспективы нефтегазоносности Нижнесырдарыинского свода в зоне сочленения с Южно-Торгайским бассейном // Известия Национальной Академии наук Республики Казахстан, Серия геологии и технических наук. – 2015. – № 4. – С. 43–52.
11. Peters K.E., Walters C.C., Moldowan J.M. The biomarker guide I. Biomarkers and isotopes in the environment. 2nd ed. V. 1. – Cambridge: Cambridge University Press, 2005. – 474 p.
12. Tissot B.P., Welte D.H. Petroleum formation and occurrence. – New York: Springer-Verlag, 1984. – 699 p.
13. Murillo W.A., Horsfield B., Vieth-Hillebrand A. Unraveling petroleum mixtures from the South Viking Graben, North Sea: a study based on $\delta^{13}\text{C}$ of individual hydrocarbons and molecular data // Organic Geochemistry. – 2019. – V. 137. – P. 10390.
14. Hunt J. Petroleum geochemistry and geology. 2nd ed. – New York: Freeman and Company, 1996. – 743 p.
15. Oil-source correlation in the West Esh El Mellaha, southwestern margin of the Gulf of Suez rift, Egypt / W.S.E. Diasty, S.Y. Beialy, R.M. El Attar, A. Khairy, K.E. Peters, D.J. Batten // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2019. – V. 180. – P. 844–860.
16. Hughes W.B., Holba A.G., Dzou L.I.P. The ratios of dibenzothiophene to phenanthrene and pristane to phytane as indicators of depositional environment and lithology of petroleum source rocks // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 1995. – V. 59. – P. 3581–3598.

17. Гончаров И.В. Геохимия нефти Западной Сибири. – М.: Недра, 1987. – 181 с.
18. Серебренникова О.В., Филиппова Т.Ю., Красноярова Н.А. Взаимосвязь состава алканов и металлопорфиринов нефти и органического вещества пород юго-востока Западной Сибири как отражение условий формирования нефтематеринских толщ // Нефтехимия. – 2003. – Т. 43. – № 3. – С. 163–167.
19. Nwadinigwe C.A., Alumona T.N. Assessment of n-alkanes and acyclic isoprenoids (geochemical markers) in crudes: A case study of Iraq and Niger delta, Nigeria // Egyptian Journal of Petroleum. – 2017. – V. 27. – № 1. – P. 111–116.
20. Особенности определения характеристических отношений изопреноидных алканов C15-C20 в нефтях Казахстана / А.Б. Жаманбаева, О.Ю. Куртова, М.Б. Алимжанова, И.Г. Зенкевич // Аналитика и контроль. – 2019. – Т. 23. – № 2. – С. 237–246.
21. French K., Birdwell J., Whidden K. Geochemistry of a thermally immature Eagle Ford Group drill core in central Texas // Organic Geochemistry. – 2019. – V. 31. – P. 19–33.
22. Peters K.E., Walters C.C., Moldowan J.M. The Biomarker guide II. Biomarkers and isotopes in petroleum systems and Earth history. 2nd ed. V. 2. – Cambridge: Cambridge University Press, 2005. – 1156 p.
23. Huang Wen-Yen, Meinschein W.G. Sterols as ecological indicators // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 1979. – V. 43. – № 5. – P. 739–745.
24. Combaut G., Saenger P. Sterols of the amansiae (rhodomelaceae: Rhodophyta) // Phytochemistry. – 1984. – V. 23. – Iss. 4. – P. 781–782.
25. Особенности химического состава растений пресноводного карбонатного озера подтайги Западной Сибири / О.В. Серебренникова, Е.Б. Стрельникова, Е.В. Гуляя, П.Б. Кадычагов, Ю.И. Прейс, М.А. Дучко // Химия растительного сырья. – 2014. – № 3. – С. 139–144.
26. Chromatographic study of the organic matter from Moroccan Rif bituminous rocks / Kh. Groune, M. Halim, L. Lemée, M. Benmakhlof, A. Amblès // Arabian Journal of Chemistry. – 2019. – V. 12. – Iss. 7. – P. 1552–1562.
27. Nazir A., Fazeelat T. Petroleum geochemistry of lower Indus basin, Pakistan: I. geochemical interpretation and origin of crude oils // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2014. – V. 122. – P. 173–179.
28. Geochemical characteristics of oil from Oligocene Lower Ganchaigou formation oil sand in Northern Qaidam Basin, China / Y. Liang, X. Shan, Y.M. Makeen et al. // Natural Resources Research. – 2019. – V. 28. – Iss. 4. – P. 1521–1546.
29. Петров А.А. Углеводороды нефти. – М.: Наука, 1984. – 264 с.
30. Alexander R., Larcher A.V., Kagi R.I. The use of plant derived biomarker for correlation of oils with source rocks in the Cooper/Eromango basin systems, Australia // APEA journal. – 1988. – V. 28 (1). – P. 310–321.
31. Radke M., Welte D.H., Willsch H. Maturity parameters based on aromatic hydrocarbons: Influence of the organic matter type // Organic Geochemistry. – 1986. – V. 10. – № 1–3. – P. 51–63ю
32. Бисенгалиев Д.Л., Темирхасов А.М. Строение и перспективы меловых отложений западной части Южно-Торгайского бассейна по новым сейсморазведочным данным // Известия НАН РК, Серия геологии и технических наук. – 2015. – № 4. – С. 33–42.
33. Бувалин А.К., Котова Л.И. Геология, угленосность и нефтегазоносность нижнемезозойских отложений Торгайского прогиба. – Алматы: Гылым, 2001. – 278 с.
34. Oil-oil and oil-source rock correlations in the Muglad Basin, Sudan and South Sudan: New insights from molecular markers analyses / H. Xiao, M. Li, J. Liu, F. Mao, D. Cheng, Zh. Yang // Marine and Petroleum Geology. – 2019. – V. 103. – P. 351–365.
35. Geochemical application of tricyclic and tetracyclic terpanes biomarkers in crude oils of NW China / S. Tao, Ch. Wang, J. Du, L. Liu, Z. Chen // Marine and Petroleum Geology. – 2015. – V. 67. – P. 460–467.
36. Killops S.D., Killops V.J. An introduction to organic geochemistry. 2nd ed. – USA: Blackwell Publishing Ltd, 2005. – 406 p.
37. Sarmah M.K., Borthakur A., Dutta A. Pyrolysis of petroleum asphaltenes from different geological origins and use of methylnaphthalenes and methylphenanthrenes as maturity indicators for asphaltenes // Bull. Mater. Sci. – 2013. – V. 36. – № 2. – P. 311–317.
38. Alkylated phenanthrene distributions as maturity and origin indicators in crude oils and rock extracts / H. Budzinski, Ph. Garirius, J. Connan, J. Devillers, D. Domine, M. Radke, J.L. Oudin // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 1995. – V. 59. – № 10. – P. 2043–2056.
39. Ogala E.J., Akaegbobi I.M. Using aromatic biological markers as a tool for assessing thermal maturity of source rocks in the Campano-Maastrichtian Mamu Formation, southeastern Nigeria // Earth Sci. Res. J. – 2014. – V. 18. – № 1. – P. 51–62.
40. Novel maturity parameters for mature to over-mature source rocks and oils based on the distribution of phenanthrene series compounds / Z. Wang, Y. Wang, B. Wu, G. Wang, Z. Sun, L. Xu, Sh. Zhu, L. Sun, Z. Wei // Heliyon. – 2016. – V. 2. – № 3. – P. 1–19.

Поступила: 27.11.2019 г.

Информация об авторах

Мадиева Р.К., докторант кафедры геологии и разведки месторождений полезных ископаемых Карагандинского Государственного Технического Университета.

Серебренникова О.В., доктор химических наук, главный научный сотрудник Института химии нефти СО РАН.

Исаев В.И., доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры геофизики Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Портнов В.С., доктор технических наук, профессор кафедры геологии и разведки месторождений полезных ископаемых Карагандинского Государственного Технического Университета.

Оздаев С.М., доктор геолого-минералогических наук, профессор, академик Национальной академии наук Республики Казахстан, руководитель лаборатории нефти и газа Института геологических наук имени К.И. Сатпаева.

UDC 553.98; 550.4

COMPOSITION OF BIOMARKERS AND ORIGIN OF OILS OF THE ARYSKUM DEPRESSION (SOUTH KAZAKHSTAN)

Rima K. Madisheva¹,
rimma_kz@mail.ru

Olga V. Serebrennikova²,
ovs49@yahoo.com

Valery I. Isaev³,
isaevvi@tpu.ru

Vasiliy S. Portnov¹,
vs_portnov@mail.ru

Sultan M. Ozdoev⁴,
ozdoyevsultan@mail.ru

¹ Karaganda State Technical University,
56, N. Nazarbayev avenue, Karaganda, 100027, Kazakhstan.

² Institute of Petroleum Chemistry SB RAS,
4, Akademichesky avenue, Tomsk, 634055, Russia.

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

⁴ Institute of Geological Sciences n.a. K.I. Satpayev,
69/94, Kabanbai batyr street, Almaty, 050010, Kazakhstan.

Based on the analysis of the individual composition of biomarkers of oils from the Lower Cretaceous, Lower Jurassic, Paleozoic and Proterozoic of the Aryskum depression of the South Torgai oil and gas basin, the conditions for formation of oil source deposits generating oil of the territory under consideration are reconstructed. The study is relevant to justify the search strategy for oil and gas deposits, taking into account the tectonics of the foundation of South Kazakhstan.

The aim of the study was to identify similarities and differences between the oils lying in the pre-Jurassic deposits of the Aryskum trough basement and oils from sedimentary strata overlapping them, to determine the features of facies conditions for accumulation of oil source material in this territory.

Objects and methods. Oil from the Lower Cretaceous, Lower Jurassic, Paleozoic, and Proterozoic of the Aryskum depression of the South Torgai oil and gas basin was studied. The composition of the oils was analyzed by gas-liquid chromatography and gas chromatography-mass spectrometry.

Results and conclusions. The distribution in oils and the individual composition of alkanes, n-alkylbenzenes, naphthalenes, phenanthrenes, cheilants, pentacyclic triterpanes and steranes were determined, geochemical parameters reflecting the peculiarities of the conditions for formation of oil source deposits were calculated. The data obtained demonstrated the genetic unity of the oils from the Lower Cretaceous and Proterozoic of the Akshabulak graben-synclinal, as well as the unified genesis of oils from the Lower Cretaceous and Paleozoic of the Aksai horst-anticline and the difference in the facies conditions of accumulation of source rocks in these territories. According to the data on composition of steranes and pentacyclic triterpanes, rocks that produced oil within the Akshabulak graben syncline are characterized by a high content of carbonates, accumulated in the deeper part of the sea and in less oxidizing conditions than in the Aksai horst anticline, where the oil source layer contained more clay component and deposited, apparently in a salted lagoon. Oil from the Lower Jurassic of the Bosingen graben-synclinal is generated by sediments formed in the desalinated delta zone.

Key words:

Oil composition, hydrocarbon biomarkers, source rocks, pre-Jurassic deposits, Aryskum depression, South Torgai basin.

REFERENCES

1. Paragulgov T.H., Paragulgov H.H., Fazylov E.M., Shabalin L.V. Torgaysko-Syrdaryinsky region – evolyutsiya glubinnogo stroeniya i problem mineragenii [Torgaysko-Syrdarya region – evolution of the deep structure and problems of mineralogy]. *Regional Geology, News of the national academy of sciences of the Republic of Kazakhstan*, 2013, no. 2, pp. 8–18.
2. Mestorozhdeniya nefti i gaza Kazahstana. Spravochnik [Oil and gas fields of Kazakhstan. Handbook]. Eds. A.M. Kazhegeldin, A.A. Abdullina, H.A. Bespayeva, E.S. Votsalevsky, S.Zh. Daukeeva, L.A. Miroshnichenko. Almaty, Mineral resources of Kazakhstan Publ., 1996. 324 p.
3. Kuandykov BM, Naymetdinov A.Sh., Sapozhnikov R.B. Stroenie glubokopogruzhennykh otlozheniy Aryskumskogo progiba Yuzhno-Torgajskoy vpadiny po seysmostratigraficheskim dannym [The structure of deeply submerged deposits of the Aryskum trough of the South Torgai depression according to seismic stratigraphic data]. *Geology of Oil and Gas*, 1992, no. 11, pp. 22–27.
4. Daukeev S.Zh., Uzhkenov B.S., Abdulin A.A., Bespaev H.A., Votsalevsky E.S., Lyubetskiy V.N., Mazurov A.K., Miroshnichenko L.A. Glubinnoe stroenie i mineralnye resursy Kazahstana. Neft i gaz. T. III [Deep structure and mineral resources of Kazakhstan. Oil and gas. Vol. III]. Almaty, Information and Analytical Center of Geology and Mineral Resources of the Republic of Kazakhstan Publ., 2002. 248 p.

5. Akchulakov U.A., Bigaraev A.B., Abdazimov U.A. Aryskumskii transkontinentalny riftovy poyas i ego neftegazonosnost [Arysrum transcontinental rift belt and its oil and gas potential]. *Oil and gas*, 2013, no. 5 (77), pp. 75–81.
6. Korchagin V.I., Karpov V.I., Puzanova I.V. Geologicheskoe stroenie i neftegazonosnost Turgayskoy neftegazonosnoy oblasti [Geological structure and oil and gas potential of the Turgai oil and gas region]. *Geology of oil and gas*, 1996, no. 5, pp. 38–46.
7. Ozdoev S.M. Perspektivnye neftegazonosnosti osadochnykh basseyнов Kazakhstan [Prospects of oil-and-gas-bearing sedimentary basins of Kazakhstan]. *News of the national academy of sciences of the Republic of Kazakhstan, series of geology and technical sciences*, 2012, no. 1 (435), pp. 61–76.
8. Paragulgov T.Kh., Paragulgov Kh.Kh., Fazylov E.M., Musina E.S. Yuzhno-Torgayskiy osadochnyy basseyн – veshchestvennyy sostav i neftegazonosnost domezozoyskikh obrazovaniy [South Torgai sedimentary basin – material composition and oil and gas potential of pre-Mesozoic formations]. *News of the national academy of sciences of the Republic of Kazakhstan, series of geology and technical sciences*, 2013, no. 1, pp. 44–54.
9. Volozh Yu.A., Bykadorov V.A., Antipov M.P., Sapozhnikov R.B. Osobennosti stroeniya paleozoyskikh otlozheniy Turgaysko-Syrdarskogo i Ustyurtskogo regionov (v svyazi s perspektivami neftegazonosnosti glubokikh gorizontov osadochnogo chekhla) [The structural features of the Paleozoic sediments of the Turgay-Syr Darya and Ustyurt regions (in connection with the prospects of oil and gas potential in the deep horizons of the sedimentary cover)]. *Oil and gas geology. Theory and practice*, 2016, vol. 11, no. 4, pp. 1–46.
10. Nukenov M.K., Bolat E. Stroenie i perspektivnye neftegazonosnosti Nizhnesyrdarskogo svoda v zone sochleneniya s Yuzhno-Torgayskim basseynom [The structure and prospects of oil and gas potential of the Lower Syrdarya arch in the zone of junction with the South Torgai basin]. *News of the national academy of sciences of the Republic of Kazakhstan, series of geology and technical sciences*, 2015, no. 4, pp. 43–52.
11. Peters K.E., Walters C.C., Moldowan J.M. *The biomarker guide I. Biomarkers and isotopes in the environment*. 2nd ed. Vol. 1. Cambridge, Cambridge University Press, 2005. 474 p.
12. Tissot B.P., Welte D.H. *Petroleum formation and occurrence*. New York, Springer-Verlag, 1984. 699 p.
13. Murillo W.A., Horsfield B., Vieth-Hillebrand A. Unraveling petroleum mixtures from the South Viking Graben, North Sea: a study based on $\delta^{13}\text{C}$ of individual hydrocarbons and molecular data. *Organic Geochemistry*, 2019, vol. 137, pp. 103900.
14. Hunt J. *Petroleum geochemistry and geology*. 2nd ed. New York, Freeman and Company, 1996. 743 p.
15. Diasty W.S.E., Beialy S.Y., El Attar R.M., Khairy A., Peters K.E., Batten D.J. Oil-source correlation in the West Esh El Mellaha, southwestern margin of the Gulf of Suez rift, Egypt. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, vol. 180, pp. 844–860.
16. Hughes W.B., Holba A.G., Dzou L.P. The ratios of dibenzothiophene to phenanthrene and pristane to phytane as indicators of depositional environment and lithology of petroleum source rocks. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, vol. 59, pp. 3581–3598.
17. Goncharov I.V. *Geokhimiya neftey Zapadnoy Sibiri* [Petroleum geochemistry of Western Siberia]. Moscow, Nedra Publ., 1987. 181 p.
18. Serebrennikova O.V., Filipova T.Yu., Krasnoyarova N.A. Vzaimosvyaz sostava alkanov i metalloporfirinov neftey i organicheskogo veshchestva porod yugo-vostoka Zapadnoy Sibiri kak otrazhenie usloviy formirovaniya neftematerinskikh tolschch [The relationship between the composition of alkanes and metalloporphyrins of oils and organic matter of rocks of the southeast of Western Siberia as a reflection of the conditions for the formation of oil source strata]. *Petrochemistry*, 2003, vol. 43, no. 3. pp. 163–167.
19. Nwadinigwe C.A., Alumona T.N. Assessment of n-alkanes and acyclic isoprenoids (geochemical markers) in crudes: a case study of Iraq and Niger delta, Nigeria. *Egyptian Journal of Petroleum*, 2017, vol. 27, no. 1, pp. 111–116.
20. Zhamanbaeva A.B., Kurtova O.Yu., Alimzhanova M.B., Zenkevich I.G. Osobennosti opredeleniya kharakteristicheskikh otosheniy izoprenoidnykh alkanov S15-S20 v neftyakh Kazakhstan [Features of determining the characteristic relations of isoprenoid alkanes C15-C20 in the oils of Kazakhstan]. *Analytics and control*, 2019, vol. 23, no. 2, pp. 237–246.
21. French K., Birdwell J., Whidden K. Geochemistry of a thermally immature Eagle Ford Group drill core in central Texas. *Organic Geochemistry*, 2019, vol. 31, pp. 19–33.
22. Peters K.E., Walters C.C., Moldowan J.M. *The biomarker guide II. Biomarkers and isotopes in petroleum systems and Earth history*. 2nd ed. Vol. 2. Cambridge, Cambridge University Press, 2005. 1156 p.
23. Huang Wen-Yen, Meinschein W.G. Sterols as ecological indicators. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1979, vol. 43, no. 5, pp. 739–745.
24. Combaut G., Saenger P. Sterols of the amansiae (rhodomelaceae: Rhodophyta). *Phytochemistry*, 1984, vol. 23, Iss. 4, pp. 781–782.
25. Serebrennikova O.V., Strelnikova E.B., Gulaya E.V., Kadychagov P.B., Preis Yu.I., Duchko M.A. Osobennosti khimicheskogo sostava rasteniy presnovodnogo karbonatnogo ozera podtaygi Zapadnoy Sibiri [Features of the chemical composition of plants of a freshwater carbonate lake in the subtaiga of Western Siberia]. *Chemistry of plant raw materials*, 2014, no. 3, pp. 139–144.
26. Groune Kh., Halim M., Lemée L., Benmakhlouf M., Amblès A. Chromatographic study of the organic matter from Moroccan Rif bituminous rocks. *Arabian Journal of Chemistry*, 2019, vol. 12, Iss. 7, pp. 1552–1562.
27. Nazir A., Fazeelat T. Petroleum geochemistry of lower Indus basin, Pakistan: I. geochemical interpretation and origin of crude oils. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2014, vol. 122, pp. 173–179.
28. Liang Y., Shan X., Makeen Y.M. Geochemical characteristics of oil from Oligocene Lower Ganchaigou formation oil sand in Northern Qaidam Basin, China. *Natural Resources Research*, 2019, vol. 28, Iss. 4, pp. 1521–1546.
29. Petrov A.A. *Uglevodorody nefti* [Hydrocarbon oil]. Moscow, Nauka Publ., 1984. 264 p.
30. Alexander R., Larcher A.V., Kagi R.I. The use of plant derived biomarker for correlation of oils with source rocks in the Cooper/Eromango basin systems, Australia. *APEA journal*, 1988, vol. 28 (1), pp. 310–321.
31. Radke M., Welte D.H., Willsch H. Maturity parameters based on aromatic hydrocarbons: Influence of the organic matter type. *Organic Geochemistry*, 1986, vol. 10, no. 1–3, pp. 51–63.
32. Bisengaliev D.L., Temirkhasov A.M. Stroenie i perspektivnye melovykh otlozheniy zapadnoy chasti Yuzhno-Torgayskogo basseyna po novym seysmorazvedochnym dannym [The structure and prospects of Cretaceous deposits of the western part of the South Torgai basin according to new seismic data]. *News of the national academy of sciences of the Republic of Kazakhstan, series of geology and technical sciences*, 2015, no. 4, pp. 33–42.
33. Buvalkin A.K., Kotova L.I. *Geologiya, uglenosnost i neftegazonosnost nizhnemezoyskikh otlozheniy Torgayskogo progiba* [Geology, coal content and oil and gas potential of the Lower Mesozoic sediments of the Torgai trough]. Almaty, Gylym Publ., 2001. 278 p.
34. Xiao H., Li M., Liu J., Mao F., Cheng D., Yang Zh. Oil-oil and oil-source rock correlations in the Muglad Basin, Sudan and South Sudan: new insights from molecular markers analyses. *Marine and Petroleum Geology*, 2019, vol. 103, pp. 351–365.
35. Tao S., Wang Ch., Du J., Liu L., Chen Z. Geochemical application of tricyclic and tetracyclic terpanes biomarkers in crude oils of NW China. *Marine and Petroleum Geology*, 2015, vol. 67, pp. 460–467.
36. Killops S.D., Killops V.J. *An introduction to organic geochemistry*. 2nd ed. USA, Blackwell Publishing Ltd, 2005. 406 p.
37. Sarmah M.K., Borthakur A., Dutta A. Pyrolysis of petroleum asphaltenes from different geological origins and use of methylnaphthalenes and methylphenanthrenes as maturity indicators for asphaltenes. *Bull. Mater. Sci.*, 2013, vol. 36, no. 2, pp. 311–317.
38. Budzinski H., Garrirues Ph., Connan J., Devillers J., Domine D., Radke M., Oudin J.L. Alkylated phenanthrene distributions as maturity and origin indicators in crude oils and rock extracts. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, vol. 59, no. 10, pp. 2043–2056.
39. Ogala E.J., Akaegbobi I.M. Using aromatic biological markers as a tool for assessing thermal maturity of source rocks in the Campano-Maastrichtian Mamu Formation, southeastern Nigeria. *Eart Sci. Res. J.*, 2014, vol. 18, no. 1, pp. 51–62.

40. Wang Z., Wang Y., Wu B., Wang G., Sun Z., Xu L., Zhu Sh., Sun L., Wei Z. Novel maturity parameters for mature to over-mature source rocks and oils based on the distribution of phenanthrene series compounds. *Heliyon*, 2016, vol. 2, no. 3, pp. 1–19.

Received: 27 November 2019.

Information about the authors

Rima K. Madisheva, doctoral student, Karaganda State Technical University.

Olga V. Serebrennikova, Dr. Sc., chief researcher, Institute of Petroleum Chemistry SB RAS.

Valery I. Isaev, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Vasiliy S. Portnov, Dr. Sc., professor, Karaganda State Technical University.

Sultan M. Ozdoev, Dr. Sc., professor, Academician of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan; head of the Oil and Gas Laboratory, Institute of Geological Sciences n.a. K.I. Satpayev.

УДК 532.517:536.242:544.012:622.244:519.6

ПРОЦЕССЫ ТРАНСПОРТА ШЛАМА ПРИ ОЧИСТКЕ СКВАЖИН С ПРОИЗВОЛЬНОЙ ОРИЕНТАЦИЕЙ БУРОВЫХ ТРУБ, СОДЕРЖАЩИХ ЭКСЦЕНТРИЧНО РАСПОЛОЖЕННОЕ КРУГЛОЕ ЯДРО С ПОДВИЖНОЙ СТЕНКОЙ: ПРОБЛЕМЫ, РЕЗУЛЬТАТЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ (ОБЗОР)

Харламов Сергей Николаевич¹,
kharsn@mail.ru

Джангхорбани Мехран¹,
mehran.janghorbani@gmail.com

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

Актуальность работы вызвана необходимостью современной оценки решения проблем: моделирования течений смеси вязкой жидкости с твердыми частицами и взаимодействия ее со стенками устройств, предназначенных для бурения; очистки скважин с произвольной ориентацией буровых труб с эксцентрично расположенным вращающимся ядром.

Цель: уяснение методов управления процессами транспорта шлама из скважин с участками вертикально-горизонтального сочленения в рамках комплексных численных и экспериментальных исследований; выдача рекомендаций в практику процессов очистки.

Методы. Теоретические и практические методы исследований из смежных областей гидродинамики и тепломассопереноса реологически сложных вязких сред при решении задач о влиянии режимов течения, вращения стенок эксцентричного ядра на расположение и поведение частиц дисперсного потока, а также правомерность идеализаций явлений в смесях; методы исследований процессов, характеризующих перемещение частиц сквозь жидкость совместно, в общей массе, как это происходит при осаждении, а также в режимах: неподвижности частиц, соответствующих плотно упакованному слою; относительного движения частиц и жидкости, осложненного турбулентностью; движения частиц относительно друг друга при сложном сдвиговом течении несущей среды.

Результаты. Представлен обзор результатов исследований процессов в скважинах и бурильных колоннах. Проанализированы достоинства отдельных критериальных связей поведения шлама. Уясняется правомерность допущений, возможностей ряда моделей турбулентности и их замыкающих связей в определении структуры, теплогидродинамических и диффузионных свойств смеси, условий и механизмов образования, накопления, осаждения, транспорта и отделения частиц шлама от жидкости, в которой они взвешены. Отмечается, что в приложениях очень популярны исследования транспорта шлама в полях действия центробежных массовых сил (гравитации, вращения), вызывающих изменение плотности частиц в режимах сальтации, включающих серию отрывов/при соединений частиц, чередующихся с ударами о стенку трубного ядра. Наблюдения процесса взаимодействия твердых и жидких частиц бесконтактными средствами регистрации могут служить информацией для валидации и верификации современных RSS-моделей турбулентности (Reynolds Shear Stresses) с опорной базой из kL/ϵ -уравнений для кинетической энергии турбулентности (k) и ее интегрального масштаба (L)/скорости диссипации (ϵ). Они корректно предсказывают изменения в анизотропной неоднородной структуре сложного турбулентного течения смеси частиц шлама и жидкости. Отмечены достоинства разработок универсального алгоритма очистки скважин с выдачей сведений о: формировании шлама в произвольной точке затрубного пространства; получении минимальной скорости, обеспечивающей его образование и удаление. Сформулированы направления перспективных исследований; даны рекомендации по эффективной очистке отверстий.

Ключевые слова:

Шлам, скважина, очистка, моделирование, гидродинамика, реология, структура, напряжения, массовые силы.

Введение

Очистка скважин от бурового шлама существенно зависит от многих параметров, в числе которых выделяются группы, характеризующие физические свойства, режимы течения, геометрию области движения смеси, определяемую конструктивными особенностями участков с вертикально-горизонтальными сочленениями стволов скважин. Прогноз очистки в этих зонах затруднен из-за высокой нелинейности эффектов и механизмов, определяемых: конвективно-диффузионным взаимодействием при переносе импульса, тепла и массы шлама; трансформациями структуры несущей среды; фазовыми переходами и реологическими изменениями в смеси. Известно [1], что при вязкостном режиме течения шлам в горизонтальном или высокоугольном стволе скважины про-

ходит весьма небольшое расстояние и затем падает с общей массой выработки на нижней стороне затрубного пространства. Неэффективная очистка этих участков усиливает внутренние силы, напряжения, кольцевое давление, что провоцирует разрыв пласта и ведет к возникновению режима аварийного управления. Препятствием этому может служить организация мер по интенсификации процессов транспорта шлама. Так, в горизонтальных скважинах проблему очистки решают следующими способами [2]: механическая скорость бурения искусственно ограничивается с целью минимизации шлама до количества, которое может обрабатывать буровой раствор за один цикл; бурение выполняется с остановом в режимах, при которых буровой раствор циркулирует несколько раз, при этом бурильная колонна вращается на месте с целью

генерации вихревых эффектов; в технологический процесс включают применение таблеток (раствор с объёмом 50–100 баррелей) с низкой вязкостью, интенсифицирующих инерционные процессы. Накопленные этими способами данные привлекают для верификации математических моделей.

Их целью является: 1) установление особенностей, влияющих на очистку: *шлама и скважины* (размер, форма и плотность частиц выработки; наклон, угловой диаметр и эксцентризитет); *физических* свойств несущей среды (плотность, вязкость жидкости); *механизмов* изменений термодинамических и фазовых процессов (гидродинамики и тепломассопереноса); *эксплуатационных* свойств деталей оборудования (скорость насоса, вращение трубы); 2) выдача сведений о *распределении шлама* в затрубном пространстве, коррекция инженерных методик и данных ECD (Equivalent Circulating Density-эквивалентная плотность циркуляции), которые обычно являются единственными и общедоступными для руководителя бурения.

Практика показывает, что все детали о процессах очистки дают методы: 1) *экспериментальные*, базирующиеся на специальном лабораторном оборудовании, и *in situ*; 2) *теоретические* (аналитические), полученные из классической механики; 3) *комплексные* (численные модели) исследования процессов переноса в гетерогенных неоднородных сплошных средах на базе полных дифференциальных уравнений законов сохранений массы, импульса и энергии в смесях.

Обширность тематики рассматриваемых проблем, приведенная характеристика методов их исследования в той или иной мере связаны с общей гидродинамической направленностью данной работы и преследует *цель*: 1) проанализировать имеющиеся результаты по очистке скважин и транспорту шлама для определения путей повышения эффективности функционирования оборудования; 2) оценить достижения в комплексном физико-математическом моделировании и численном исследовании транспорта реологически сложных сред по замкнутым системам, областям с особенностями формы поверхности стенок и образующей ствола скважин, включающих зоны с участками вертикально-горизонтального сочленения; 3) выдать рекомендации о перспективах применения решений и операций, обеспечивающих надежность использования оборудования при бурении в данных условиях.

Проблемы моделирования процессов транспортировки шлама в вертикальных скважинах

Анализ принципов транспорта вязких дисперсных смесей показывает [3, 4], что доминирующими в переносе импульса смеси в вертикальных зонах скважин выступают аксиальные механизмы. Считается, что кольцевая скорость должна быть выше значений скорости осаждения частиц шлама, которая зависит: от *физико-химической природы и структуры* частиц (размера, формы и плотности шлама); *реологии* жидкости и расхода; *геометрии* области движения – от верстия трубы. Полезными для приложений высту-

пают результаты скорости осаждения шлама с частицами нерегулярной формы, предложенной С. Чиеном [4]:

$$v_s = 120.0(\mu_e / d\rho_f)[(1 + 0.0727d(\rho_e / \rho_f - 1)(d\rho_f / \mu_e)^2)^{0.5} - 1], \quad (1)$$

где v_s – скорость осаждения; μ_e – вязкость раствора; d – диаметр частиц; ρ_f – плотность жидкости; ρ_p – плотность частиц. Заметим, что (1) корректна в расчетах без вращения стенки трубы для любых жидкостей. Формулировка критериальных связей типа (1) выполнена М. Рамсеем [5] при допущениях, что для очистки ближних вертикальных скважин коэффициент переноса шлама, определяемый как средняя скорость переноса шлама, нормированная на среднюю кольцевую скорость, должен превышать 0,5. На основании этих исследований достаточно просто рассчитывать оптимальный расход насоса для эффективной очистки скважины в вертикальном сечении ее ствола. Этот расход соответствует кольцевой скорости, при которой концентрация шлама в растворе не превышает 5 % по объему [6].

Анализ результатов данной части утверждает [2–6], что для эффективной очистки *вертикальной* скважины целесообразно поддерживать режимы, в которых скорость раствора доминирует над скоростью осаждения частиц. Кроме этого, для практики бурения каждой секции скважины ценно, что по связям типа (1) и привлечения данных по геометриям скважины и буровой колонны можно корректно предсказывать значения минимального расхода насоса.

Исследования наклонных скважин с использованием опытного оборудования

Как показывает общий анализ результатов [7, 8], прогноз очистки отверстий на базе методик, учитывающих особенности изменений поля скорости осаждения частиц шлама, не убедителен для скважин с высокогольными отверстиями. Здесь шлам испытывает влияние эффектов от всего спектра сил, характеризующих процессы переноса импульса, тепла и массы в смеси, а не только от тех, что отвечают за гидравлическое сопротивление, что так характерно для большинства методик. Установлено, что при больших отверстиях частицы шлама концентрируются на их нижней стороне в виде слабоинерционной высоковязкой подложки, которая требует высоких значений скорости циркуляции бурового раствора для ее удаления из ствола скважины. Физика такого процесса довольно сложна, ведь при интенсификации функционирования оборудования, обеспечивающего очистку, создаются специфические условия воздействия на пласт, приводящие: к его размыву; подвижности частиц в слоях шлама; течению смеси в едином блоке и, наконец, выносу шлама из ствола. Такая динамика процессов при перемещении выработки пласта более соответствует очистке жидкостями с низкой вязкостью. Транспорт шлама в виде *квазиоднородной* смеси характерен для высоких значений кольцевой скорости. Однако в оперативном плане такая ситуация встречается редко. В силу сказанного, полезными для

практики прикладных исследований выступают следующие данные.

Так, А. Йохо [7] обобщил результаты транспорта частиц шлама в критериальную связь, учитывающую динамику роста поверхностной скорости жидкости над пластом шлама:

$$V_a = [n / (2n+1)] (\Delta p / KL)^{1/n} [0.5(r_o - r)]^{[(n+1)/n]}. \quad (2)$$

Здесь (2) – связь Йохо для прогноза скорости жидкости над пластом шлама, где n , K – показатель степени и коэффициент реологического закона соответственно; Δp – изменение давления; L – длина; r_o , r_i – радиусы внутренней и внешней труб соответственно. Область применимости (2) отвечает условиям функционирования наклонных скважин при отсутствии вращения трубы и с растворами – со скоростями порядка 0,3–1,3 м/с; частицами с произвольной формой и размером ~6,36 мм; плотностью частиц ~2620 кг/м³.

Позднее А. Гавинье и И. Соби [9] применили физический подход и разработали модель, включающую порядка 50 взаимосвязанных уравнений, описывающих кольцевую геометрию, объемное поведение шлама и бурового раствора. Далее С. Окраджни [10], М. Мартин и др. [11] и Н. Браун и др. [8] использовали установку с ее составляющими (рис. 1) в Университете Талсы и British Petroleum (BP) для изучения особенностей влияния таких параметров, как реология среды, скорость циркуляции, геометрия бурильной трубы, угла отверстия, а также таблеток низкой и высокой вязкости на транспортировку шлама. Вместо шлама использовали керамические шары (порядка 6,4 мм с удельным весом 2,68), что аналогично продуктам выработки из силикатных образований [9]. Отметим, что эти идеи нашли продолжение в экспериментах: Дж. Форд и др. [12], Дж. Педен и др. [13], А. Мартенс и др. [14], А. Бассал и др. [15], А. Саассен [16]. Позднее были созданы установки в французском Институте нефти (IFP) [17], Японской национальной нефтяной компании (JNOC) [18] и Ближневосточном техническом университете (METU) [19]. Отдельные результаты исследований указанных проблем, представленные в [8, 10, 13–15, 19], показывают, что комплексные исследования по уяснению характера, деталей процесса очистки, выполненные в университете Талсы (США), вносят полезные дополнения в банк входных данных для моделирования и показывают корреляцию между отдельными переменными задачами о транспортировке шлама в определенных условиях. Данные [8, 10, 13–16, 19, 20] заставляют считать процесс с вращением трубы наиболее продуктивным, несмотря на то, что закрутка генерирует специфические динамические и тепловые нагрузки на детали оборудования, высокие значения которых способны обострять режимы возникновения аварийных и неблагоприятных ситуаций. Это дополнительные проблемы, осложняющие изменения режимов и параметров течений смесей. Как показывают опыты А. Гула и др. [21] (по установлению несущей способности аэрированных буровых растворов в горизонтальных стволах скважин), при прямоточном течении смесей наиболее устойчивыми выступают структуры: 1) раз-

деленного (или *стратифицированного*) потока с гладкой или волнистой поверхностью; 2) пробкового потока с чередованием газовых пузырей в верхней части ствола (*пузырьчатого*); 3) потока со сплошным фрагментом выработки (*глобуллярного*); волнокольцевого (или *гребешкового*) потока (рис. 2). Установлено, что последний эффективен при транспортировке шлама (т. к. снижает сопротивление на 24 %, высоту шламового слоя до 14 %).

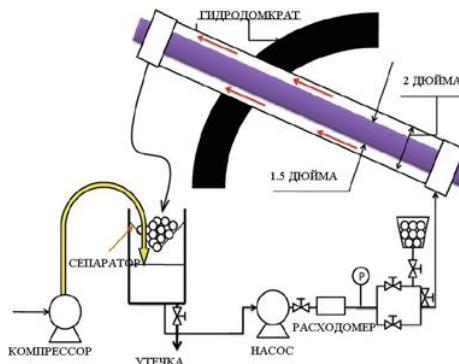


Рис. 1. Схема технологического процесса и составляющие экспериментальной установки [1]

Fig. 1. Scheme of technological process and the flow [1]



Рис. 2. Структуры потока (стратифицированный, пузырьчатый, глобуллярный, гребешковый) по [21]

Fig. 2. Flow structures (stratified, elongated bubble, slug, annular) identified by [21]

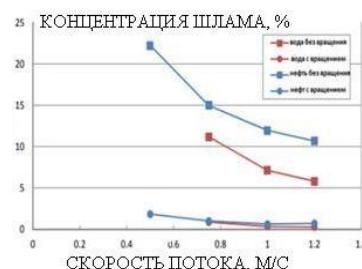


Рис. 3. Изменения концентрации шлама в зависимости от скорости течения смеси (буровой раствор с нефтяной или водной добавкой в качестве разбавителя) в турбулентном прямоточном и за jakiщенном (способом вращающейся стенки) потоке [22]

Fig. 3. Variations of cuttings concentration depending on a mixture flow velocity (drill fluid with an oil or water additive as a diluent) in turbulent direct-flow and swirled (the way of rotated wall) stream [22]

Наложение крутки на прямоточное течение смеси может приводить к неоднозначным процессам, кото-

рые при турбулентном режиме интенсифицируют переходы вихревой природы и ведут к ламинаризации и последующей турбулизации. Последние проявляются при перестройке прямоточного потока в закрученный и обратно. И обнаруживаются при затухании турбулентного переноса в потоках вязких сред, закрученных способом вращающейся стенки. Ниже, в наших исследованиях эти вопросы подробно анализируются. Также заметим, что Б. Вернер и др. [22] касался этой проблемы при экспериментах с транспортировкой буровых растворов с водной и нефтяной основой на оборудовании, используемом в норвежском секторе Северного моря. Было обнаружено, что буровые растворы на нефтяной основе со своими вязкоупругими свойствами лучше ведут себя на линейном участке в сравнении с заменой нефти на ньютоновскую жидкость, в которой отсутствуют нелинейные эффекты. Однако турбулизация процесса течения смеси, обусловленная закруткой потока способом вращающейся стенки внутренней трубы, приводила к эффектам, влияющим на структуру потока так, что это различие асимптотически исчезало (рис. 3). Все это демонстрирует необходимость корректного моделирования транспорта реологически сложных сред в полях действия центробежных и массовых сил. Опыт решения таких задач показывает, что на это способны лишь модели, напрямую учитывающие изменения анизотропной структуры турбулентности во вращающихся системах (отдельные детали вопроса представлены ниже).

Механистические модели транспортировки шлама и их анализ

Данные [7–10, 12, 15] значительно повысили интерес к теоретическим разработкам полной механистической модели и с учетом отдельных физических и технологических допущений позволяют объединить их в группы: двухслойные и трехслойные, а также их комбинации. Отметим, что одной из первых обсуждаемых моделей была двухслойная модель Гавинье и др. [23] в рамках предположения, что частицы выработки имеют тенденцию к выпадению на нижнюю часть наклонного ствола скважины. В модели допускается формирование пласта, который скользит вверх по затрубью. На наш взгляд, это очень сильное упрощение, которое позволяет обращаться к модели в условиях пренебрежения рядом важных факторов, определяющих динамику частиц. В силу этого, данные моделирования лишь качественно согласуются с имеющимися экспериментальными результатами (например, [9], рис. 4).

Попытка учесть реальную динамику процесса заставила З. Филипа и др. [24] искать пути расширения подхода Гавинье и Соби по многослойной модели: совершенствование двухслойной модели при допущении, что *верхний* слой следует рассматривать как гетерогенную суспензию шламов в жидкости, в то время как *нижний* подслой имеет более плотную структуру общего слоя шлама. Такая модель более универсальна и позволяет анализировать динамику частиц, находящихся во взвешенном состоянии в зо-

нах верхнего слоя. Определяемым параметром считалась объемная концентрация частиц шлама, которая оценивалась как количество частиц, взвешенных в жидкости. Оперируя этим параметром Л. Лейзинг и др. [25], ставили цель – выдачу данных его изменения в рабочих условиях и установления его экстремальных значений в области исследования процессов. Оценивался характер изменений шлама от формы и размера частиц, реологии и теплофизических свойств. Результаты [26, 27] заставили искать пути построения альтернативных моделей с допущением, что по мере нарастания объема шлама кольцевое пространство со свободным течением над слоем шлама интенсивно сокращается. При этом увеличивается локальная скорость потока до уровня, когда она превышает минимальную скорость транспортировки. Так, с целью определения оптимальной высоты слоя шлама с эффективной его транспортировкой Р. Кларк и др. [26] разработал модель, учитывающую режимы переноса частиц с эффектами подъема и вращения. Установлено, что каждый отдельный механизм в общем балансе процессов переноса массы и импульса в элементарном объеме гетерогенной смеси будет доминирующим в определенном диапазоне изменений угла ствола скважины. Модель позволяет анализировать поведение шлама в зависимости от условий эксплуатации оборудования с учетом параметров: расхода, механической скорости бурения, физических и механических свойств бурового раствора (плотности, реологии), геометрических особенностей и конфигурации скважины (данных по углу, размеру отверстия, диаметру трубы), а также деталей изменений структуры и свойств шлама (данных по размеру, плотности, углу покоя, пористости пласта и т. д.). Сведения этого анализа иллюстрируют данные, представленные на рис. 5.



Рис. 4. Изменение скорости насоса в зависимости от толщины слоя шламов, предсказанных моделью Гавинье [9] (линии – расчет) и ее сравнение с экспериментами (значки – процессы с водой, низковязким и высоковязким растворами, карбополом)

Fig. 4. Relationship between pump output and cutting bed thickness predicted by the Gavignet method [9] (lines are calculations) and its comparison with experiments (symbols are processes with water, low viscous and highly viscous muds, carbopol)

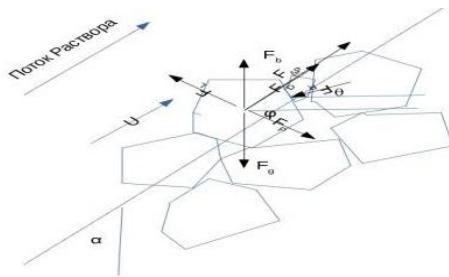


Рис. 5. Схема результирующих сил с определяющим эффектом действия на частицы. Обозначения соответствуют [26], где F_D – сила сопротивления; F_b – сила плавучести; F_L – подъемная сила; F_g – сила гравитации; F_p – пластическая сила раствора; F_R – сила реакции; F_{Ap} – сила градиента давления; U – скорость потока; α – угол скважины; θ – угол контакта между частицами; Φ – угол слоя шламов

Fig. 5. Scheme of the various forces acting upon a single cutting [26] where F_D – Drag Force; F_b – Bouyancy Force; F_L – Lifting Force; F_g – Force of Gravity; F_p – Fluid's Plastic Force; F_R – Reactive Force; F_{Ap} – Pressure Gradient Force; U – Fluid velocity; α – inclination angle; θ – contact angle between cuttings; Φ – cuttings bed resting angle

Уточненный расчет процессов, сопровождающих очистку отверстий, выполненный Дж. Фордом и др. [27] при обращении к оригинальному компьютерному пакету, говорит о наличии двух экстремальных режимов с минимальной скоростью переноса. *Первый* – с более низким значением, определяет движение шлама с вращением вдоль скважины. *Второй* – при более высоком значении формирует условия транспорта шлама вместе с промывочной жидкостью. Попытки обобщения расчетных данных в критериальные связи прогноза скорости переноса шлама, выполненные Т. Ларсеном и др. [28] и сведенные к виду (3), выглядят привлекательными с точки зрения учета геометрической нелинейности области исследования задачи при больших перемещениях шлама:

$$V_{cut} = R_p / \{36C_{conc}[1 - (D_{pipe} / D_{hole})^2]\}. \quad (3)$$

Здесь (3) – функция изменений скорости бурения (R_p), массовой концентрации шлама (c_{conc}), полученная при обобщении экспериментов и испытывающая опосредованное теплофизическое и геометрическое влияние дисперсной системы через вязкость, угол наклона, массу шлама. Результаты указывают на эффективность (3) в прогнозе процессов с неподвижной стенкой внутренней трубы и изменении угла наклона 55–90°.

Уточненный расчет процессов, выполненный Д. Нгуеном [29] по *трехслойным моделям* (неподвижного слоя частиц однородной концентрации; дисперсного слоя, в котором концентрация частиц изменяется; верхней зоны слоя с прозрачной областью потока жидкости), показал, что по мере увеличения скорости потока следует ожидать интенсификации механизмов генерации турбулентных вихрей, которые способны поднимать самые верхние частицы дисперсного слоя в область с режимом турбулентной супензии. Это

повышает требования к моделированию механизмов турбулентной диффузии при переносах импульса и массы в гетерогенной смеси. Последние не вполне ясны, осложнены взаимодействием пульсаций полей скорости, состава и давления и составляют вопросы для перспективных исследований. Эти ограничения заставляют строить прогнозы процессов в рамках более простых режимов течений, изменений структур и слоев частиц. Так, А. Камп и др. [30] при исследовании течений твердо-жидкостных систем в наклонных и горизонтальных трубопроводах отдали предпочтение двухслойной модели. Последняя основана на данных П. Дорона [31], которые соответствуют процессам течений при переменных углах ствола скважины в горизонтальной плоскости и пренебрежении эффектами от вращения бурильной трубы. И *вполне успешна* при моделировании роста слоя шлама при бурении.

Анализ практических задач показывает, что проблеме очистки скважин и транспортировки шлама при колтюбинговом бурении (КБ) посвящено большое количество литературы (например, [15, 26, 28]). Причем в прогнозах размера области прохождения частицы до полного осаждения на нижнюю поверхность скважины, наиболее корректной представляется функциональная связь (4) в виде, предложенном Л. Лейзингом и др. [25]:

$$L_t = 18K\lambda^{n-1}U^n(D_0 - D_i)^{2-n}[(\rho_p - \rho_f)gd_p^2 \sin \theta], \quad (4)$$

где λ – коэффициент масштабирования; L_t – расстояние прохождения частиц; K – коэффициент степенной модели; n – степень степенной модели; g – ускорение свободного падания; d_p – диаметр частиц; U – скорость жидкости; D_0 – диаметр внутренней трубы; D_i – диаметр внешней трубы; ρ_p – плотность частиц; ρ_f – плотность жидкости; θ – угол наклона.

3. Ванг и др. [32] также разработали *трехслойную модель*, которая может быть использована для прогнозирования толщины слоя шлама на основе измененного значения *эквивалентной плотности циркуляции* (*Equivalent Circulating Density*, (ECD)). А Наганава и др. [33] предлагает одномерную двухслойную модель, которая предсказывает переходные и развивающиеся процессы при транспортировке шлама по всей длине скважины с учетом изменений концентрации выработки, скорости скольжения, высоты пласта выработки, *ECD* и кольцевого давления. Так, сравнение результатов моделирования по предлагаемой модели с соответствующими экспериментальными и данными *in situ*, полученными при *LWD* (*Logging While Drilling* – каротаж при бурении) из месторождения, выглядят вполне удовлетворительно.

В [34, 35] были усовершенствованы модели исследования процессов транспорта (двуслойная модель применена С. Прасун и др. [34] к пенам, шлам в кольцевой области – Ф. Жанг и др. [35]) и обнаружено, что двухслойная модель дает приемлемые результаты при низких качествах пены (70–80 %) и низких концентрациях вязкого полимера гидроксиэтилцеллюзы (НЕС), который используется в ремонтных работах. Но по мере увеличения качества пены и концен-

трации полимера результаты моделирования отклоняются от экспериментальных результатов. Данные [35] утверждают, что существуют четыре главных режима переноса шлама в кольцевом пространстве

(рис. 6), которые корректно предсказывает механическая модель, учитывающая механизмы переноса массы, импульса, по соответствующим уравнениям законов сохранения смеси.

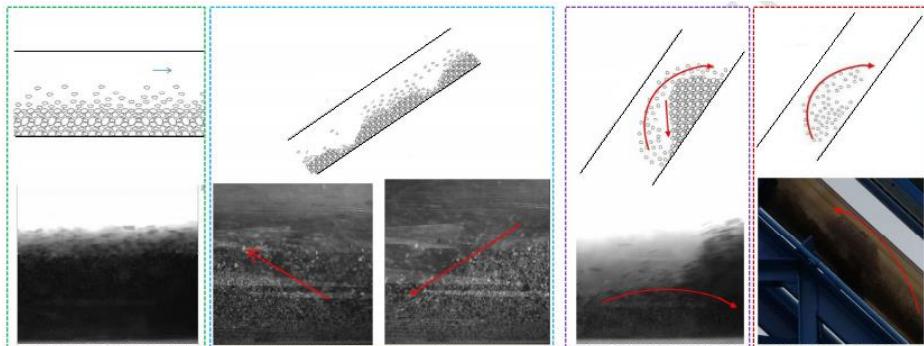


Рис. 6. Режимы переноса шлама, наблюденные Ф. Жангом и др. [35]

Fig. 6. Different modes of cutting transport observed by F. Zhang et al. [35]

Таким образом, анализ позволяет выделить ряд процессов, свидетельствующих о: необходимости и своевременности выполнения операций по очистке; предотвращении развития неблагоприятных и опасных ситуаций при бурении. К числу последних следует отнести: сведения о замедлении скорости бурения, данные увеличения расхода насоса; точные сигналы о необходимости полного останова процесса бурения и выдачу заданий по очистке скважины; определения размеров областей повышенных значений давления в кольцевом пространстве, что является результатом формирования слоя шламов и др.

Достижения и проблемы численного моделирования процессов транспорта шлама

В разделе представлен критический обзор и анализ математических моделей, расчетных схем, результатов численного моделирования гидродинамических и диффузионных процессов, связанных с взаимодействием двухфазных реологически сложных сдвиговых течений с подвижной стенкой круглого ядра, эксцентрично расположенного в замкнутом пространстве, характерном для инженерных задач транспорта бурой выработки из скважины, которые иллюстрируются решениями и картинами пространственных распределений локальных параметров в широком диапазоне изменений определяющих чисел Пекле (Pe), Рейнольдса (Re), Россби (Ro), Фруда (Fr), Шмидта (Sm).

Комплексный анализ моделирования физических явлений в смесях показывает, что А. Йохо и др. [36]

первоначально разработали оригинальную модель материального баланса (*Numerical Model Balance, (NMB)*), в которую включали данные о бурении (скорости механического бурения и насоса; геометрию долота и ствола, свойства бурового раствора) и осуществили прогноз процессов формирования профиля ствола скважины, параметров очистки. Установлено, что модель корректна в прогнозах процессов в областях с прямыми отверстиями, в частности, для углов отверстий с отклонениями не более 10° от вертикали.

Учитывая необходимость детального анализа, И. Кинг и др. [37] разработали универсальный код «ESTET» для исследования картины изменений поля скорости, давления, вязкости, эволюции напряжений. Для моделирования поведения шлама С. Кроу [38] использовал *лагранжев подхod*, позволяющий отслеживать траектории движения твердых частиц в общем потоке выработки. Уравнения для несущей капельной среды описываются с использованием *эйлерова* подхода. Заметим, что при использовании *лагранжево-эйлерова* описания движения возникают проблемы при расчетах процессов с возрастанием концентраций частиц дисперсной фазы. Это связано с увеличением объема итераций и «иррегулярности» распределения траекторий отдельных дисперсных частиц. В таких условиях необходимо учитывать эффекты столкновения частиц и механизмы внутри- и межфазного обмена импульсом, энергией, что определяет рост объема вычислений [39].

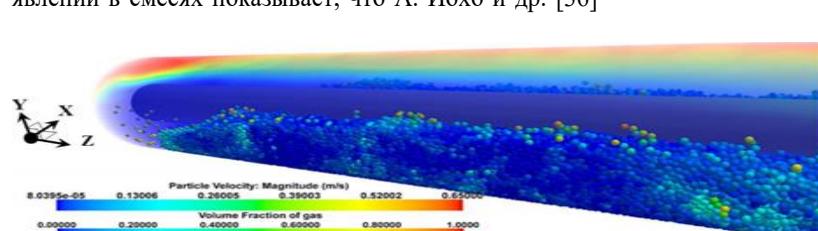


Рис. 7. Эволюция частиц шлама в кольцевом пространстве по лагранжево–эйлеровому подходу, представленному в [39]. Оцифровка данных расчета: скорости частиц [м/с]; объемной концентрации частиц [–], выполнена в масштабе значений, указанных на рис. 7

Fig. 7. Movement of cuttings in the annulus, modeled by using a Lagrange–Euler approach [39]

Так, данные С. Акшика и др. [39] на рис. 7 показывают, что используемая лагранжево-эйлерова модель и метод расчета успешны при прогнозе гидродинамики в дисперсных потоках. Отметим, что большинство исследователей, ссылаясь на указанные выше причины о громоздкости вычислений и проблемы линеаризации задачи, склоняются к пренебрежению учета взаимодействий между частицами, выполняют расчеты гидродинамических процессов в двухфазной среде с привлечением CFD-пакета и идей эйлерово-эйлерова метода, как описывает Н. Мишра [40].

Одно из первых исследований по CFD-пакету было выполнено Х. Билгесу и др. [41] с целью оценить влияние изменений кольцевой скорости на транспорт шлама. Причем физическая модель основана на допущениях, что поток представляется стационарным, изотермическим двухфазным со структурой из несжимаемой жидкости и инертных твердых частиц. Расчеты выполнены для четырех сред различной плотности жидкости и твердых частиц трех различных размеров. Данные моделирования говорят о наличии погрешности в расчетах локальных переменных задачи. Причем менее чем на 10 %, в сравнении с соответствующими параметрами встречающихся опытов. Х. Билгесу и др. [42] использовали CFD-код для определения влияния различных параметров, таких как: скорость жидкости, размер частиц шлама, скорость проникновения, наклон и вращение бурильной трубы на концентрацию частиц в затрубном пространстве. В [42] использована встроенная многофазная CFD-модель ANSYS (детали физических допущений в [42]). Были проверены результаты этой модели на соответствие лабораторным, полученным ранее. Установлено, что эйлеровский подход более точен в отношении оценок изменений перепада поля давления (рис. 8). Далее Н. Мишра [40] также использовал CFD-пакет для определения влияния скорости жидкости, размера частиц выработки при бурении, вращения бурильной трубы и угла наклона в отклененных скважинах на транспорт шлама. Моделирование по эйлеровому подходу отвечает стационарному случаю течения. Установлено, что формирование слоев шлама наблюдается вблизи входного участка кольцевого пространства, а перенос шлама в кольцевом участке идет в виде слоистого потока (рис. 9).

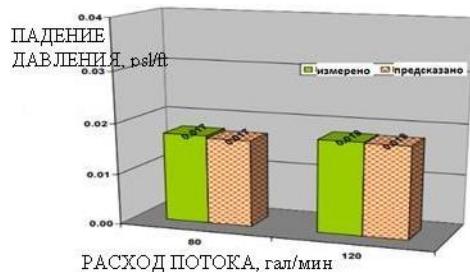


Рис. 8. Сравнение результатов падения давления, предсказанного CFD-моделью и измеренного в эксперименте, в зависимости от изменений расхода (данные [41])

Fig. 8. Comparison of pressure drop vs pump output as predicted by CFD with experiments [41]

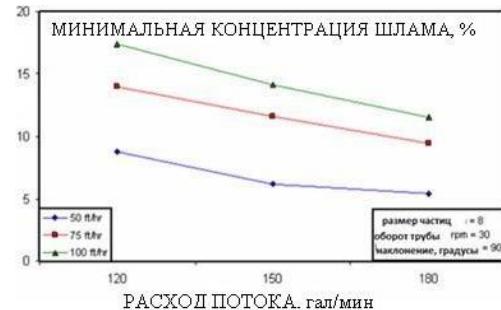


Рис. 9. Распределения концентраций частиц максимального размера в зависимости от изменений расхода потока, выполненного при моделировании в рамках численных методик, изложенных в [40]. Данные расчета отвечают: размер частиц выработки – 8 мм; вращение трубы – 30 об/мин; трубное отклонение – 90°

Fig. 9. Minimal cuttings concentration vs flow rate obtained by numerical methods [40]. Size of cutting particles is 8 mm; pipe rotation is 30 rpm; pipe inclination is 90°

В настоящее время исследователи все чаще обращаются к универсальным инструментам численного моделирования гидродинамики и тепломассопереноса в гетерогенной смеси – программному комплексу (ПК) ANSYS FLUENT. Это позволяет с единых позиций аппарата механики неоднородных сплошных сред детально по физическим эффектам, условиям на границах прогнозировать тепло- и массоперенос, гидро- и газодинамические, ламинарно-турбулентные явления в нескольких взаимодействующих между собой фазах.

В силу ограничений объема данной работы полная постановка задачи с *формулировкой* математической модели, системы уравнений для конкретных процессов в смеси опущена и может быть найдена, например, в [38, 43–47]. Упомянем, что основные допущения, используемые при описании транспорта шлама, сводятся к следующему [38, 43, 47]: среды взаимопроникающие, в общем случае состоящие из N вложенных многоскоростных и многотемпературных континуумов, описываемые соответствующими системами уравнений механики неоднородных сплошных сред. Каждый континуум представляет собой совокупность частиц, массы которых принадлежат к заданному интервалу масс; давление создается капельной жидкой средой; течение неустановившееся; частицы имеют сферическую форму; плотность материала частиц много больше физической плотности несущей среды; вязкие силы и теплопередача проявляются лишь при взаимодействии частиц с жидкой фазой; температура частиц постоянна по их объему; в турбулентных режимах мгновенные значения (составляющие вектора скорости, давления, температуры) являются случайными функциями времени и пространственных координат; механизм движения двухфазной среды заключается в увлечении твердых частиц несущей жидкой фазой за счет сил межфазного взаимодействия; твердые частицы представляют пассивную примесь; вовлечение частиц в турбулентное движение происходит

дит через влияние пульсаций несущей фазы на движение частиц; присутствие частиц способствует экспенсификации кинетической энергии турбулентных вихрей.

З. Ванг [48] выполнил численное исследование процессов транспорта частиц шлама в условиях вращения бурильной колонны в режимах ламинарного потока в рамках эйлеро-эйлерова метода с использованием CFD-кода. Результаты сводятся к рекомендациям расчета толщины слоя шлама (h , с точностью не более 13 %) по уравнению многомерной регрессии с параметрами – плотность жидкости (ρ_l), эксцентрикитет (e), объемная доля твердой фазы (f_s), поток жидкости (q), эффективная вязкость жидкости (μ_v), размер твердых частиц (d_s) и скорость вращения бурильной колонны (ω) вида (5):

$$h = 3,13(\ln \rho_l)^{-3,082} + 0,0266e_2 - 0,00684e - 606f_s^3 + \\ + 64,8f_s^2 - 2,00f_s - 0,00418\ln(\mu_v) - 0,00436d_s^2 + \\ + 0,0132d_s + 0,0253(\ln q)_{0,928} + 0,0352(\ln \omega)_3 - \\ - 0,463(\ln \omega)_2 + 2,022\ln(\omega) + 0,00218[\ln(q\omega)]_3 - \\ - 0,521[\ln(q\omega)]_2 + 0,410\ln(q\omega) - 3,93. \quad (5)$$

Заметим, что У. Мме и др. [49] смоделировали транспорт шлама в более широком диапазоне изменений условий течения по эйлеровому подходу для не-ニュтоновской жидкости (со степенным законом для напряжений). Причем турбулентный перенос импульса описан Л.И. Зайчиком [47] по модели типа «кинетическая энергия турбулентных вихрей – скорость ее диссипации». Параметрический анализ выполнен при варьировании значений угла наклона скважины, коэффициента формы продуктов выработки и их размера. Установлено, что мелкие и более сферические частицы шлама более предрасположены к транспортировке, эффективнее уносятся потоком из ствола скважины. Кроме того, при очистке загрязненных отверстий использование растворов с низкой вязкостью представляется предпочтительнее для условий турбулентного режима течения в сравнении с ламинарным. Аналогичные заключения имеются у Х. Алкауим и др. [50]. Отмечается, что размер и сферичность частиц выработки оказывают существенное влияние на очистку. Подчеркивается, что сферические частицы (диаметром порядка 2,5 мм) эффективнее поддаются очищению.

Р. Остгуйи [6] получил удовлетворительное соответствие результатов CFD моделирования с опытными данными течений в устройствах, разработанных в Ближневосточном техническом университете и использованием воды. Установлено, что по мере увеличения скорости течения бурового раствора наблюдаются изменения структуры дисперсного потока (рис. 10).

Естественными для этих условий являются попытки сформулировать критериальные связи для определяемых критериев подобия. Так, опыт китайских инженеров-нефтяников (например, работы Sun B. и др. [51]), показывает, что перепад поля давления (Δp), необходимый для транспорта шлама, весьма чувстви-

телен к действию определяющих чисел подобия – Рейнольдса (Re), Фруда (Fr), Россби (Ro), Θ – угла наклона и может быть аппроксимирован в виде [51]:

$$\Delta p / \Delta L = 100(\rho_l v D_h / \mu)^{1,0547} (v^2 / g D_h)^{0,1376} (0,1\theta)^{-0,0740} \times \\ \times (10\omega D_h / v)^{0,1435} (100V_b / V_\omega)^{0,2877}. \quad (6)$$

| режим потока | скорость бурения 60 ft/hr | скорость бурения 80 ft/hr | лабораторные результаты |
|--|---------------------------|---------------------------|-------------------------|
| неподвижный слой, скорость потока = 2 ft/sec | | | |
| подвижный слой, скорость потока = 4-6 ft/sec | | | |

Рис. 10. Сравнение структур потока [6] при моделировании транспорта шлама с соответствующими лабораторными данными в режимах: неподвижный слой при скорости жидкости 2 фут/с; подвижный слой при скорости жидкости 4–6 фут/с; при значениях механической скорости бурения: 60 фут/ч; 80 фут/ч

Fig. 10. Comparison of the flow structures [6] predicted by CFD methods versus laboratory experiments showing Fixed Bed (FB) and Mobile Layer (ML) at different ROPs (=60 ft/h, =80 ft/h) and annular velocities (=2 ft/s – FB, =4...6 ft/s – ML).

Подобный подход использовали в Р. Руки и др. [52, 53] с буровом раствором на основе пены. Е. Эпелле и др. [54] установили, что результаты, полученные по теоретической модели, отличаются на 8 % от опыта по распределению концентраций газа в пене в зависимости от интенсивности вращения трубы и изменения наклона трубы. Эти исследования интересны тем, что моделируется трехфазная, а не двухфазная жидкость. М. Мораведжи и др. [55] провели аналогичное исследование с аэрированной «грязью» – изучено влияние вращения трубы на транспортировку шлама. Обнаружено [56], что турбулентность способна вносить эффекты, пренебрежение которыми не оправдано при прогнозе реальных процессов. Так, для их детального учета необходимы гибкие модели турбулентности. Также добавим, что Р. Руки и др. [53] на данных моделирования течения пены выполнили сравнительные оценки влияния реологических изменений в транспортируемой системе [модель со степенным законом (Power Law, PLm), модель Гершеля–Балкли (Herschel–Bulkley, HBm)] на транспорт шлама. Обнаружено, что использование PL модели способно более реалистично предсказывать детали сложного течения (рис. 11). На рис. 11 отражены пространственные изменения поля концентраций в кольцевой области ствола с осесимметричной формой с видом на горизонтальную и вертикальную плоскости. Также расчеты показывают, что в процессах осевого по стволу движения (картины данных в горизонтальных проекциях) концентрация частиц шлама локализуется в области дна. В то время как на участках трубы с вертикальной ориентацией тяжелые фракции (шлам) интенсивно переносятся потоком в центральной зоне кольцевого сечения.

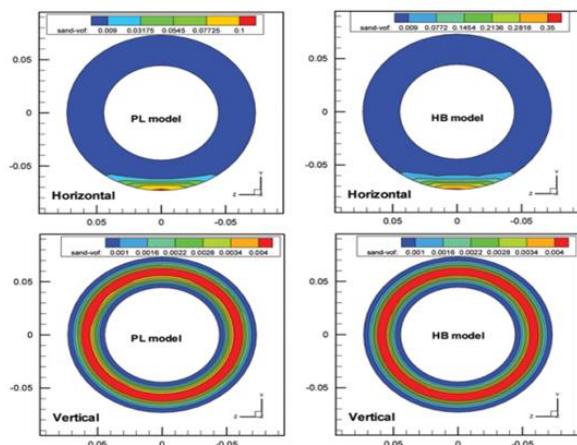


Рис. 11. Влияние реологии на динамику частиц при использовании моделей: со степенным законом (Power Law, PLm); модель Herschel–Bulkley, (HBm), данные [53]

Fig. 11. Effect of rheology on cutting dynamics using Power Law and Herschey–Bulkley models [53]

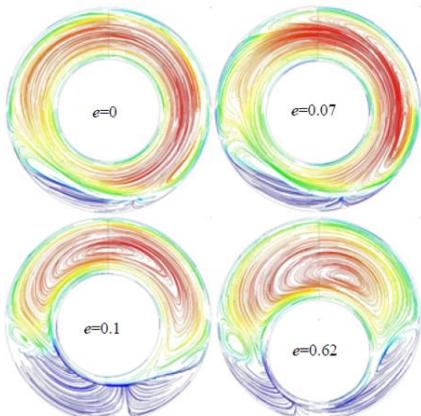


Рис. 12. Возникновение вторичных потоков с увеличением эксцентричности [56]

Fig. 12. Occurrence of secondary flows with increasing eccentricity [56]

Наши исследования по прогнозу изменений структуры сложных сдвиговых течений во внутренних системах показывают проблемы детального численного описания динамики потоков смесей. Этим вопросам также посвящен ряд исследований других авторов. В частности, Е. Эппеле и др. [54] использовали CFD и оба метода – Эйлера-Эйлера и Эйлера-Лагранжа, а также к ω -модель турбулентности. Отмечается, что обращение к к ω -модели связано с ее возможностями корректно рассчитывать пристеночные зоны, потоки, осложненные закруткой. Установлено, что по сравнению с к ϵ -моделью, такие к ω - и кL модели более устойчивы к возмущениям [57–61]. В [55, 58–61] выполнено сравнение их возможностей по корреляции между соответствующими параметрами типа «теория–опыт» с использованием позитронно-эмиссионного трекинга частиц (РЕПТ). Обнаружено, что точность моделей составляет около 11 %. Далее Ю. Игнатенко и др. [56] использовали подход Эйлера-Лагранжа, к ω -модель, с допущениями – частицы

имеют сферическую форму, жидкость неильтоновская (закон типа Гершиля–Балкли). Обнаружено два специфических режима течения: с *первичной циркуляцией*, производимой вращением бурильной колонны, и с *вторичной циркуляцией*, в которой преобладают эффекты от изменений вихревых структур. Первый режим предпочтительнее и производится с низкими эксцентрикитетами и высокими внутренними скоростями вращения трубы. Отдельные данные (рис. 12) показывают, что увеличение эксцентрикитета (значений e) приводит к возникновению вторичных вихрей, которые препятствуют очистке отверстия, а также интенсифицируют процессы падения давления. Заметим, что количественная оценка этих процессов требует дополнительного анализа через сравнения с экспериментами.

Важные замечания для практики представлены Б. Аманна и др. [57] при использовании CFD-пакета (и эйлерового подхода). Установлено: 1) углы отверстий между 45 и 60 градусами являются наиболее проблематичными для очистки; 2) концентрация частиц выработки в кольцевом пространстве уменьшается с увеличением скорости потока жидкости из-за интенсификации вихревого турбулентного потока; 3) удаление выработки более удобно для крупных частиц; 4) из-за больших сил сопротивления, приложенных к частицам, транспортировка продуктов шлама будет эффективнее при более высоких скоростях бурильных труб.

Общим выводом по анализу проблем, изложенных в [37–43, 46–52, 57–61] является то, что большинство исследователей транспортировки продуктов выработки допускают условия, характерные для ламинарного потока. Однако нельзя пренебречь фактом, что турбулентность может возникнуть при интенсификации вращения не только стенки – границы области исследования внутренней задачи, но и самой бурильной колонны. Эти задачи исследовались на классе внутренних течений (например, [6, 62–71]), и их результаты указывают на необходимость корректного учета моделью процессов деформаций, обусловленных изменением центробежных массовых сил. Также хорошо известен факт наличия вихревых токов вследствие вращения бурильной колонны в определенных режимах закрутки ($Ro>1$), что формирует ламинарно-турбулентные эффекты и влияет на изменения структуры потока [46, 60, 61]. Эти процессы еще слабо изучены (например, [44–47, 59–61]) и составляют *новое перспективное направление* численного моделирования технологических процессов бурения скважин и организации транспорта шлама.

В силу нелинейности рассматриваемых задач, отсутствия универсального подхода их решения обращение к специальным кодам представляется *целесообразным*, но не вполне удовлетворительным по ряду причин. В числе главных – вопрос оценки достоверности расчетных данных пространственных изменений локальных и интегральных параметров процесса транспорта шлама в рамках популярных пакетов (ANSYS CFX, FLUENT, CFD и т. д.). Также недостаточно широко исследованы вопросы точности изме-

нений пульсационных тепло-, гидродинамических и диффузионных параметров по предлагаемым в пакетах моделям высшего порядка. В таких задачах крайне полезны экспериментальные данные о процессах, но они отсутствуют из-за специфичности условий проведения экспериментов. Поэтому технологии *опосредованной валидации* модели и *верификации* результатов расчета по универсальному коду следует признать оправданными.

Кроме того, результаты обзора показывают, что при решении задач гидродинамики и тепломассообмена в смесях обращаются к прогнозу турбулентного переноса в рамках следующих подходов. Первый опирается на модели К-теории турбулентности (типа $k\epsilon$). Заметим, что данный подход используется, когда фазы раздельны в стратифицированных (или почти стратифицированных) многофазных потоках, а также при отношении плотностей между фазами $\sim O(10^\circ)$. Но возможно дальнейшее уточнение этого феноменологического метода. Оно сводится к использованию *дисперсной* модели типа $k\epsilon$, которая является подходящей случаю, когда концентрации частиц (вторичных фаз) разбавлены (например, [36, 42, 43, 46, 47]). Предполагается, что столкновениями между частицами пренебрегается и доминирующими при случайному движении фаз выступают *турбулентные процессы* в капельной (жидкой) фазе. Именно они увлекают твердые частицы в пульсационные явления в среде.

Важным общим выводом (например, [44, 58–61]) является требование к деталям исследования сложных течений смесей по многопараметрическим RSS (Reynolds Shear Stresses)-моделям «напряжений Рейнольдса и турбулентных потоков тепла и массы» ($\overline{u'_i u'_j}$, (7)) с опорной базой из уравнения для кинетической энергии турбулентности (k , (8)) и уравнения интегрального масштаба энергосодержащих вихрей (L , (9)). Эти модели широко тестировались на классе прямоточных и закрученных неизотермических течений смесей в трубах и каналах (ее замыкания для простоты записи опущены и детально приведены, например, в [44, 61]):

$$\begin{aligned}
 U_k \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_k} &= \frac{\partial}{\partial x_k} \left[v \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_k} \right] + \\
 &+ \frac{\partial}{\partial x_k} \left\{ c_s f_\mu \frac{k}{\epsilon} \left[\overline{u'_i u'_l} \frac{\partial \overline{u'_i u'_k}}{\partial x_l} + \overline{u'_i u'_l} \frac{\partial \overline{u'_k u'_l}}{\partial x_i} + \overline{u'_k u'_l} \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_l} \right] \right\} + \\
 &+ \left\{ - \left[\overline{u'_i u'_k} \frac{\partial U_i}{\partial x_k} + \overline{u'_i u'_k} \frac{\partial U_i}{\partial x_k} \right] \right\} + R_{ij} - \epsilon_{ij}; \\
 U_k \frac{\partial k}{\partial x_k} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left(v \frac{\partial k}{\partial x_j} + c_{sk} f_\mu \overline{u'_i u'_j} \frac{L}{\sqrt{k}} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + \\
 &+ \left\{ - \overline{u'_i u'_k} \frac{\partial U_i}{\partial x_k} \right\} - \tilde{c}_D \frac{k^{1.5}}{L}; \quad (8)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 U_k \frac{\partial L}{\partial x_k} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left(v \frac{\partial L}{\partial x_j} + c_{sl} f_\mu \overline{u'_i u'_j} \frac{L}{\sqrt{k}} \frac{\partial L}{\partial x_i} \right) + P_L + \\
 &+ P_L + c_{L_f} c_{2L} k^{0.5} \left(1 - \frac{L^2}{x_n^2} \right). \quad (9)
 \end{aligned}$$

Выделение kL -модели Г.С. Глушко [6, 62] как опорной базы для RSS-модели, по сравнению с $k\epsilon$ -моделью У. Джонса [44], Б. Лаундера [63] объясняется ее лучшей реализуемостью в пристеночных зонах.

Ниже приведены отдельные результаты изменений структуры вязких течений в трубах с переменной площадью поперечного сечения, моделирующих загромождение потока шламом (рис. 13, 14) и двухфазной жидкостно-жидкостной смеси в трубах (рис. 15, 16).

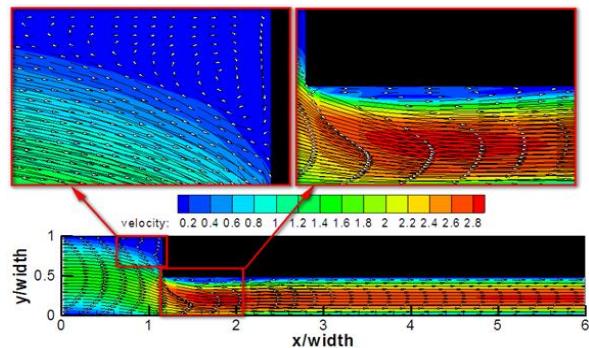


Рис. 13. Изменение поля скорости по круглой трубе (колонне) при внезапном сужении сечения, обусловленном загромождением потока неподвижным однородным слоем твердой породы [64]

Fig. 13. Change in velocity field along a circular pipe (column) with a sudden narrowing of the cross section caused by the flow clutter with a stationary homogeneous layer of solid rock [64]

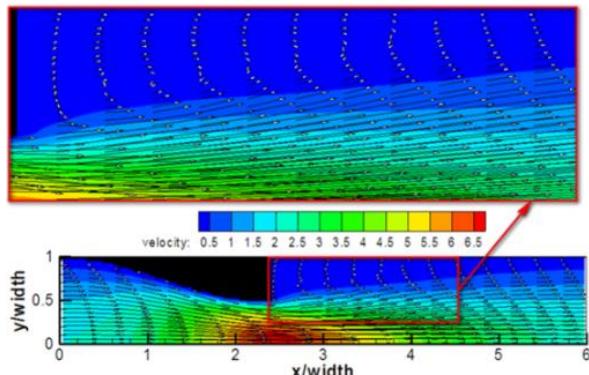


Рис. 14. Изменение поля скорости по круглой трубе (колонне) при обтекании неподвижного слоя частиц твердой породы с конфузорной формой, загромождающего движение жидкости в ядре трубы [64]

Fig. 14. Change in velocity field along a circular pipe (column) when a stationary layer of solid rock particles with a confusor shape flows around, which obstructs the movement of the liquid in the core of the pipe [64]

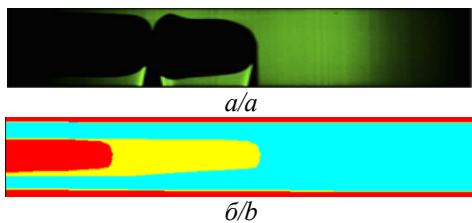


Рис. 15. Пробковый режим течения: $D=5,6$ мм; $U_{mix}=0,8$ м/с; $C_w=0,7$; *а*) эксперимент Wegmann A. [65, 66]; *б*) визуализация результатов моделирования

Fig. 15. Slug flow regime: $D=5,6$ mm; $U_{mix}=0,8$ m/s; $C_w=0,7$; *a*) experiment by A. Wegmann [65, 66]; *b*) visualization of simulation results

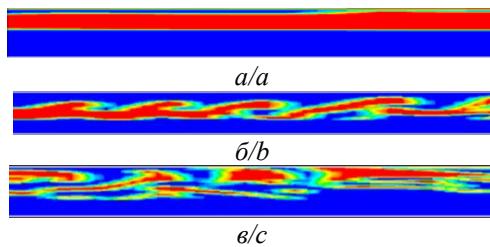


Рис. 16. Картинки течения двухфазного потока: *а*) расслоенный режим – $D=720$ мм; $U_w=0,73$ м/с; $U_h=0,5$ м/с; $X=20-30$ м; *б*) переходный режим с кольцевой структурой потока в пробковый – $D=720$ мм; $U_w=2$ м/с; $U_h=2$ м/с; $X=20-30$ м; *в*) глобулярный режим с параметрами – $D=720$ мм; $U_w=2$ м/с; $U_h=2$ м/с; $X=30-40$ м

Fig. 16. Two-phase flow patterns: *a*) stratified mode – $D=720$ mm; $U_w=0,73$ m/s; $U_o=0,5$ m/s; $X=20-30$ m; *b*) transition mode with ring flow structure in slug – $D=720$ mm; $U_w=2$ m/s; $U_o=2$ m/s; $X=20-30$ m; *c*) slug mode with parameters – $D=720$ mm; $U_w=2$ m/s; $U_o=2$ m/s; $X=30-40$ m

Видно (рис. 15, 16), что при указанных скоростях течения (рис. 16, б) более тяжелая фаза (нефть) на расстоянии 20 м от входа уже контактирует со стенкой, а при $U_h=0,5$ м/с, $U_w=0,73$ м/с (рис. 15, а) наблюдаются возмущения вихревой природы, которые требуется корректно описывать в высоко инерционных процессах моделью турбулентности с опорной базой из kL , ko , ke -моделей.

Современный опыт применения RSS-моделей к описанию проблем транспорта шлама показывает следующее [67–70]. Так, О. Гайдари и соавт. [68] провели изучение процесса накопления выработки в различных областях труб с эксцентрическими кольцевыми пространствами, привлекая многофазовую модель Эйлера, используя в качестве рабочей среды буровой раствор с реологией Гершеля–Балкли. Турбулентность моделируется с привлечением модели напряжений Рейнольдса. Изменения концентрационного поля смеси в кольцевой области показали (рис. 17), что рост значений эксцентризитета расположения бурильной колонны (с некоторого значения e) способен резко увеличивать накопление продуктов выработки. И этот процесс существенно зависит от высоты слоя выработки, а также от особенностей вращения бурильной трубы. Также установлено, что если влияние вращения несколько выше определенной скорости вращения (в частности, при вращении порядка 150 об/мин), то не следует ожи-

дать увеличения массы выработки за счет изменений эксцентризитета колонны.

Опыт расчета турбулентных процессов в потоках с криволинейной границей области течения свидетельствует [60, 61, 63, 71], что структура диффузионного поля вещества, представленная на рис. 17, сильно зависит от эволюции компонент тензора напряжений Рейнольдса и составляющих турбулентных потоков массы, которые отличаются высокой степенью анизотропии при взаимодействии смеси со стенками труб, содержащих эксцентрически расположенные круглые ядра с подвижной поверхностью стенки. Учитывая особенности течения смесей в трубах с эксцентрическими ядрами и используя универсальный CFD-пакет С. Саундла и др. [72] провели детальные исследования влияния эксцентризитета трубы на транспортировку шлама. Показано, что при течении в эксцентрической кольцевой зоне перепад давления меньше, чем в концентрической кольцевой области при аналогичных и подобных физических условиях в соответствующих жидким средах. Кроме того, обнаружено, что как в эксцентрических, так и в коаксиальных режимах течения смесей наличие выработки сильно влияет на перепад давления (рис. 18).

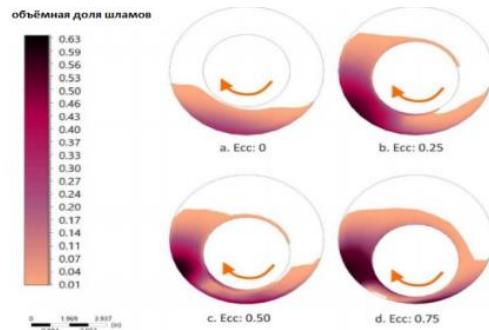


Рис. 17. Распределения концентрационного поля с учетом турбулентности (RSS-ке модель) при изменении эксцентризитета колонны (картины отвечают [70])

Fig. 17. Distribution of concentration field taking into account turbulence (RSS-ke model) when the column eccentricity changes [70]

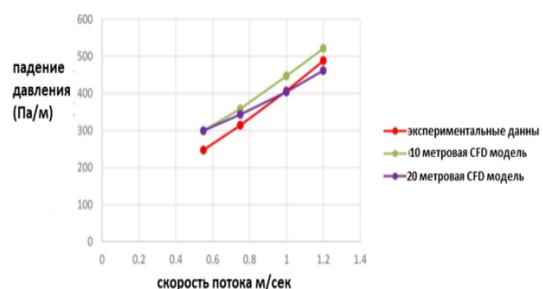


Рис. 18. Сравнение результатов расчета перепада поля давления (теория – CFD-моделирование и эксперимент – символы) с учетом данных об изменениях эксцентризитета (результаты отвечают данным [52])

Fig. 18. Comparison of the results of calculating the differential pressure field (Experimental results are given by the red line) [52]

Таким образом, при характеристике моделей, методов и подходов изучения движения в реологически сложных гетерогенных смесях (жидкость–частицы) следует отметить, что наряду с эйлерово-эйлеровым подходом в расчетах динамики шлама популярен лагранжево-эйлеров метод. В последнем жидкая фаза рассматривается как континуум и описывается уравнениями Навье–Стокса. В то время как поведение частиц дисперсной фазы прогнозируется путем отслеживания движения частиц через расчетное поле несущей фазы смеси. Дисперсная фаза может обмениваться импульсом, массой и энергией с жидкой фазой. Основное предположение, сделанное в этой модели, состоит в том, что дисперсная (вторая) фаза занимает небольшую объемную долю. Это допущение вносит серьезные ограничения на применимость модели к процессам, в которых значениями объемной доли второй фазы пренебречь нельзя. Процессы межфазного взаимодействия между жидкой и твердой фазами связаны через источниковые члены в уравнениях законов сохранения массы, импульса и энергии (например, [38, 43–45, 47]).

Принимая во внимание достоинства и способность многопараметрических моделей корректно описывать сложные процессы во внутренних системах, С. Акшик и др. [70] выполнили исследование влияния вращения бурильной колонны на транспортировку шлама в рамках положений лагранжево-эйлеровой модели с учетом эффектов столкновений между частицами и стенками области движения (кольцевая зона между внутренней и внешней стенками труб), а также нетривиального характера воздействия внутренних и внешних сил: сопротивления, подъема и перепада поля давления. Заметим, что моделирование процессов переноса проведено в ANSYS CFD по алгоритму, обеспечивающему получение устойчивого решения нелинейной пространственной и связанной задачи гидродинамики и тепломассопереноса по системе определяющих уравнений для двухфазной среды с граничными условиями для замкнутой области кольцевого движения с ядром. Отдельные сведения о поведении шлама в трубе с эксцентрично расположенным ядром иллюстрируют данные [70] (рис. 19).

Эти результаты позволили утверждать, что увеличение вращения трубы контрпродуктивно при поиске путей роста скорости движения потока жидкости и очистки отверстий. Однако увеличение скорости вращения трубы все же способно незначительно увеличивать кольцевое давление. Этот результат следует признать полезным при выработке решений об оптимизации технологических операций очистки отверстий от шлама.

Диффузионные вопросы составили содержание исследования С. Акшика и др. [71], ориентированное на оценки: какое влияние на процесс очистки способны оказывать эффекты, обусловленные изменением размера частиц, свойств смеси и промывочной жидкости (буровой раствор), микроскопические свойства частиц на границах контакта. С этой целью в [71] разработан алгоритм детального решения задачи по пакету CFD-DEM, в котором в качестве основных ми-

рскопических свойств на границах контакта частиц между собой, стенками межтрубного пространства выступают значения неизвестных компонент напряжений от взаимодействий частица–частица, трения от контакта частицы со стенкой, трения от контакта частицы и бура. Результаты показывают определяющее влияние на процессы транспорта частиц шлама микроскопических свойств частиц в областях непосредственного контакта. Отдельные результаты, иллюстрирующие изменения структуры потока по данным [71], приведены на рис. 20.

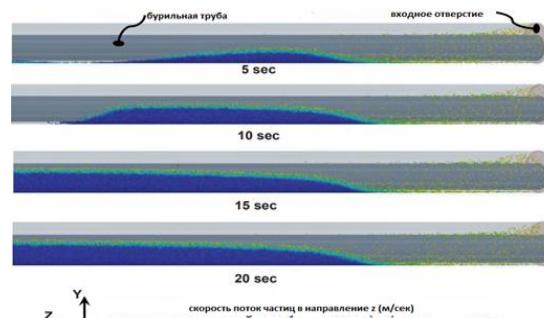


Рис. 19. Данные изменения структуры гетерогенной смеси, полученной в рамках лагранжево-эйлерова подхода моделирования ламинарного течения [70]

Fig. 19. Changes in the structure of a heterogeneous mixture obtained using the Lagrangian–Euler approach for modeling laminar flow [70]

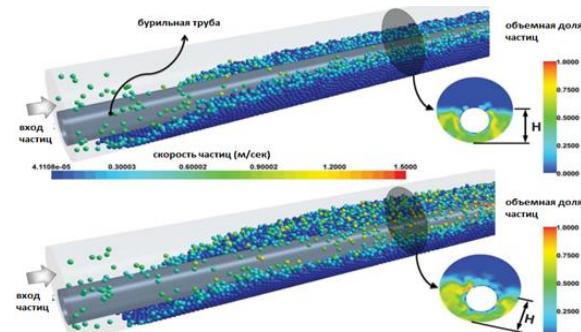


Рис. 20. Данные изменения коэффициента трения в зависимости от объемной доли частиц в попечном сечении трубы с эксцентрично расположенным ядром [71]

Fig. 20. Modeling the change in particle concentration by varying the friction coefficient between particles in the selected cross section of a pipe with an eccentric inner pipe [71]

В серии исследований, например, [51, 73–77], за-служивают внимания вопросы выяснения особенностей реализации алгоритмов расчета сложных течений гетерогенных систем (CFD-, DEM-модели и их комбинаций с эйлерово-эйлеровым и лагранжевым подходами) в прогнозах деталей гидродинамики, интенсивности тепло- и массопереноса, изменений состава смесей, механизмов осаждения и транспорта частиц шлама, изменений эксцентричеситета, наклона труб, геометрии пространства и частиц и т. д. (например,

данные рис. 21). В частности, Б. Сун и др. [51] при прогнозе очистки тонких отверстий по модели CFD-DEM установлено, что в потоке возникают высокие давления в локальных областях кольцевых зазоров. Это способно вносить серьезные ограничения на величину скорости движения смеси. И авторы [51] предлагают оригинальную модель для прогнозирования минимальной кольцевой скорости, достаточной для организации транспорта шлама/предотвращения накопления осадка частиц. На рис. 22 проанализированы данные факторов очистки. Видно, что теория и опыт результатов очистки находятся в удовлетворительном соответствии. Е. Эпелле и др. [73] оценили использование эйлерово-эйлерово подхода со степенной жидкостью и однородными частицами размера (3 мм) при проведении многопараметрического исследования по установлению факторов, влияющих на транспорт частиц шлама. Показано, что ошибка теории и моделирования составляет не более 11 % по интегральным параметрам, а скорость перемещения жидкости, наклон отверстий и эксцентризитет трубы способны вызывать *наибольшее влияние* на транспортировку шлама.

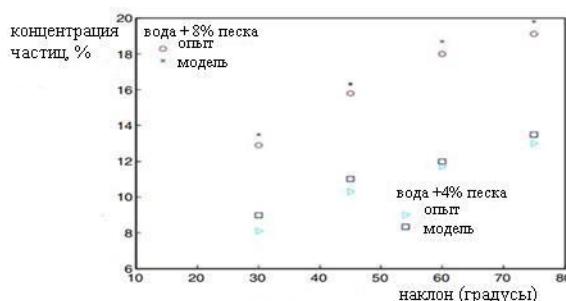


Рис. 21. Сравнение расчетных и опытных данных процесса очистки от шламов [51]

Fig. 21. Comparison of calculated and experimental data of the hole cleaning [51]

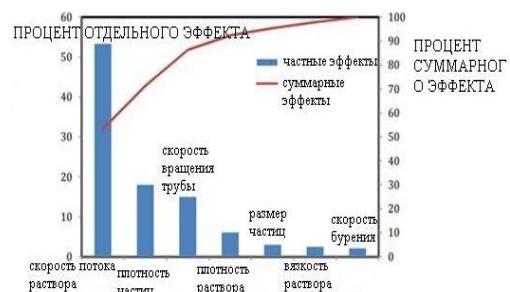


Рис. 22. Доля факторов, определяющих очистку скважин [77]

Fig. 22. Share of factors in modeling hole cleaning [77]

Более близкая к реальности ситуация транспорта моделировалась С. Акшик и др. [75] на базе метода (CFD-DEM) для описания переноса шлама при бурении на депрессии с учетом взаимодействия аэрированного бурового раствора со скважиной. Выполнена попытка определения влияния скорости потока жидкости, скорости нагнетания воздуха, угла наклона

кольца, повышенной температуры и давления на эффективность транспортировки шлама. Эволюция и динамика частиц твердой фазы изучается с помощью DEM подхода. Показано, что наряду с расходом жидкости на эффективность переноса шлама существенно влияют параметры: соотношение и доля концентраций в системе «газ–жидкость»; температура окружающей среды и величина вспышка давления. Такие результаты потребовали Е. Эпелле и др. [76] провести исследование о влиянии геометрии частиц на эффективность процессов. Обнаружено, что несферические частицы движутся быстрее, чем идеально сферические частицы в кольцевом пространстве. Установлено, что допущение идеальной сферичности может привести к погрешности до 11 % в оценке падения давления. Эта же тема была ранее исследована С. Акшик и др. [71]. Но в то время как в [77] использован эйлерово-эйлеровский подход, в [72] реализована лагранжево-эйлерова модель. Расчеты подчеркивают, что поскольку форма частиц отличалась от идеальной сферы, были получены данные, что концентрация частиц и скорость переноса увеличиваются при транспортировке.

Изучение пневмотранспорта шлама с привлечением газового потока проводили Е. Манджула и др. [74], где установлено, что данный процесс можно осуществить двумя способами: 1) если поток газа имеет скорость, достаточную для нахождения частиц шлама во взвешенном состоянии и движения их с общей массой газа; 2) в случае, если скорость газа реально мала для транспорта, то возникают условия, при которых продукты выработки локализуются и транспортируются в виде «пробок» внутри жидкости. Заметим, что это исследование перспективно, мало изучено на предмет установления уравнения подобия для критического значения скорости, учитывающего изменения структуры потока дисперсной системы в трубах.

Результаты транспорта шлама [76, 77], основанные на моделировании процессов по методу Монте-Карло (MCS), CFD расчетах с использованием прототипа устройства (DOE), показали следующее. Эффекты от изменений скорости бурового раствора, вращения трубы и бурильной колонны, массы бурового раствора, диаметра частиц шлама, вязкости бурового раствора оказывают наибольшее влияние на транспортировку пробуренного шлама от забоя скважины до поверхности. Установлено, что 86,3 % вариаций эффективности транспортировки продуктов выработки могут контролироваться параметрами: *скоростью течения бурового раствора, массой частиц выработки и скоростью вращения бурильной трубы*. Более полно эти сведения отражают данные М. Надеры и др. [77], представленные на рис. 22.

Заключение

Общий анализ результатов исследований процессов транспорта продуктов выработки при бурении, перспектив их приложений к технике позволяет утверждать следующее.

1. Последние 30 лет отмечены многочисленными достижениями в моделировании движений смесей жидкостей с твердыми частицами в полях действия массовых сил в областях с эксцентрично расположенными ядрами и представляют многообещающую альтернативу экспериментальному анализу задач транспорта шлама.
2. При моделировании особое внимание следует уделять вопросам: способности *моделей* реагировать на эффекты в *низкорейнольдсовых областях*, которые включают влияние молекулярной вязкости (температуропроводности, диффузионности) и отличаются существенной анизотропией, кривизной линий тока, отрывом и присоединением вязкого потока, ударами частиц о стенку, обусловленными деформациями в сложном сдвиговом течении от эффектов вращения ядра, перестройки поля скорости по длине скважины от закрученного в прямоточное движение; *сокращения* времени вычислений для достижения устойчивости высших моментов, влияющих на процессы диффузии в смеси.
3. Аналитическое и экспериментальное изучение должно послужить предметом дополнительных исследований: *механистических (многослойных) моделей*, учитывающих эксцентричность расположения и вращения круглых ядер, несферичность формы частиц; *создания* установки для тестирования критериальных зависимостей по оценке эффективности очистки отверстий.
4. Предприняты усилия, направленные на уменьшение неопределенности эффектов, описывающих силовое, тепловое и диффузионное взаимодействие между частицами несущей капельной среды и взвешенными в ней твердыми частицами выработки и соответственно *коэффициентов* аэрогидродинамического сопротивления, тепло- и массо-
- передачи посредством: *привлечения* средств бесконтактной регистрации (лазерное допплеровское оборудование); *обращений* к вспомогательным программам анализа данных в рамках ПК ANSYS.
5. В численном моделирования надежен *лагранжево-эйлеров* метод, предполагающий обращение к траекторной модели частиц дисперсной фазы и континуальной модели для частиц несущей среды, для которого весьма актуальны вопросы: взаимовлияния турбулентности при межчастичном взаимодействии, фазовых эффектов, изменений эксцентризитета трубы, формы частиц, столкновений в многофазной структуре.
6. Недостаточно апробированы турбулентные модели высшего порядка для напряжений и потоков скалярной субстанции (тепла и массы) – RSS-модели. В частности, это вызвано высокой чувствительностью ке-, ко-опорных баз к локальным возмущениям, идущим от границ раздела фаз. Установлено, что хорошей альтернативой им может служить kL-модель с консервативным физическим параметром, характеризующим «тонкую» структуру потока (интегральный масштаб энергосодержащих вихрей, L) и это составит предмет перспективных будущих исследований рассматриваемых задач.
7. Экспериментами сформирована база данных, которую рекомендовано использовать для тестирования разрабатываемых моделей очистки скважин. Причем главными в моделировании выступают проблемы прогноза: *состава* шлама в любой точке затрубного пространства; *установления* минимальной скорости жидкости (значения порядка 46–61 м/мин при бурении протяженных горизонтальных секций), гарантирующей удаление шлама из скважины, предотвращение его образования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Impact of drilling fluid viscosity, velocity and hole inclination on cuttings transport in horizontal and highly deviated wells / A. Piroozian, I. Ismail, Z. Yaacob, P. Babakhani, A.S.I. Ismail // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. – 2012. – V. 2 (3). – P. 149–156.
2. Effect of pipe rotation on hole cleaning for water-based drilling fluids in horizontal and deviated wells / M.E. Ozbayoglu, A. Saasen, M. Sorgun, K. Svanes // International Association of Drilling Contractors/Society of Petroleum Engineers Asia Pacific Drilling Technology Conference and Exhibition. – Jakarta, Indonesia, 2008. – P. 1–11.
3. Pigott R.J.S. Mud flow in drilling // Drilling and Production Practice. – USA: American Petroleum Institute, 1942. – P. 91–103.
4. Chien S.F. Settling velocity of irregularly shaped particles // Paper Society of Petroleum Engineers. – 1993. – № 26121. – P. 281–289.
5. Ramsey M. Practical wellbore hydraulics and hole cleaning unlock faster, more efficient, and trouble-free drilling operations. USA: Gulf Professional Publishing, 2019. – 340 p.
6. Osgouei R.E., Ozbayoglu M.E., Fu T.K. CFD simulation of solids carrying capacity of a Newtonian fluid through horizontal eccentric annulus // American Society of Mechanical Engineering 2013. Fluids Engineering Division Summer Meeting. – USA, July, 2013. – P. 23–28.
7. Iyoho A.W. Drilled-cuttings transport by non-Newtonian drilling fluids through inclined, eccentric annuli: PhD thesis. – USA, 1980. – 263 p.
8. Brown N.P., Bern P.A., Weaver A. Cleaning deviated holes: new experimental and theoretical studies // The Society of Petroleum Engineers/International Association of Drilling Contractors Drilling Conference. – New Orleans, Louisiana, February 28 – March 3, 1989. – P. 171–178.
9. Gavignet A.A., Sobey I.J. A Model for the transport of cuttings in highly deviated wells // Society of Petroleum Engineers paper 15417. The 61st Annual Technical Conference and Exhibition of the Society Petroleum Engineers. – New Orleans, October 5–6, 1986. – P. 916–921.
10. Okrajni S. Mud cuttings transport in directional well drilling // Society of Petroleum Engineers paper 16.178: the 60th Ann Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers. – Las Vegas, NV, September 22–25, 1985. – P. 297–308.
11. Transport of cuttings in directional wells / M. Martin, C. Georges, P. Bisson, O. Konirsch // Society of Petroleum Engineers/International Association of Drilling Contractors paper 16083, Drilling Conf. – New Orleans, LA, March 15–18, 1987. – P. 293–303.
12. Experimental investigation of drilled cuttings transport in inclined boreholes / J.T. Ford, J.M. Peden, M.B. Oyeneyin, Erhu Gao, R. Zarrough // The 65th Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers. – New Orleans, LA, September 23–26, 1990. – P. 197–206.
13. Peden J.M., Ford J.T., Oyeneyin M.B. Comprehensive experimental investigation of drilled cuttings transport in inclined wells including the effects of rotation and eccentricity // The 1990

- European Petroleum Conference. – The Hague, Netherlands, 1990. – P. 394–405.
14. Martins A.L., Santana C.C. Evaluation of cuttings transport in horizontal and near horizontal wells – a dimensionless approach // The Second Latin America Petroleum Engineering Conference. – Caracas, Venezuela, 1992. – P. 155–161.
15. Bassal A.A. The effect of drillpipe rotation on cuttings transport in inclined wellbores: PhD Thesis. – Tulsa, Oklahoma, USA, 1995. – 214 p.
16. Saasen A. Hole cleaning during deviated drilling – the effects of pump rate and rheology // The 1998 Society of Petroleum Engineers European Petroleum Conference. – The Hague, Netherlands, 1998. – P. 161–167.
17. Pilehvari A.A., Azar J.J., Shirazi S.A. State-of-the-art cuttings transport in horizontal wellbores // Society of Petroleum Engineers Drilling & Completion. – 1999. – V. 14. – P. 196–200.
18. Critical cuttings transport velocity in inclined annulus: experimental studies and numerical simulation / Y. Masuda, Q. Doan, M. Ogutoreli, S. Nagawa, T. Yonezawa, A. Kobayashi, A. Kamp // The 2000 Society of Petroleum Engineers/Petroleum Society of Canadian Institute of Mining International Conference. – Calgary, Alberta, Canada, 2000. – P. 1–12.
19. Analysis of the effects of major drilling parameters on cuttings transport efficiency for high-angle wells in coiled tubing drilling operations / M.E. Ozbayoglu, S.Z. Miska, T. Reed, N. Takach // Society of Petroleum Engineers/Intervention and Coiled Tubing Association Coiled Tubing Conference and Exhibition. – Houston, Texas, 2004, January. – P. 1–8.
20. Drill-cuttings transport in full scale vertical annuli / T.R. Sifferman, G.M. Myers, E.L. Haden, H.A. Hahl // Journal of Petroleum Technology. – 1974, November. – V. 26. – P. 1295–1302.
21. Gul S., Kuru E., Parlaktuna M. Experimental investigation of cuttings transport in horizontal wells using aerated drilling fluids // International Petroleum Exhibition & Conference. Society of Petroleum Engineers. – Abu Dhabi, November, 2017. – P. 1–18.
22. Werner B., Myrseth V., Saasen A. Viscoelastic properties of drilling fluids and their influence on cuttings transport // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2017. – V. 156. – P. 845–851.
23. Gavignet A.A., Sobey I.J. Model aids cuttings transport prediction // Journal of Petroleum Technology. – 1989. – V. 41. – P. 916–921.
24. Philip Z., Sharma M.M., Chenevert M.E. The role of Taylor vortices in the transport of drill cuttings // Society of Petroleum Engineers India Oil and Gas Conference and Exhibition. – New Delhi, India, January 1998. – P. 1–7.
25. Leising L.J., Walton I.C. Cuttings-transport problems and solutions in coiled-tubing drilling // Society of Petroleum Engineers Drilling Conference. – Dallas, Texas, March 2002. – P. 85–100.
26. Clark R.K., Bickham K.L. A mechanistic model for cuttings transport // Society of Petroleum Engineers annual technical conference and exhibition. – New Orleans, Louisiana USA, September 1994. – P. 139–153.
27. A new MTV computer package for hole-cleaning design and analysis / J.T. Ford, M.B. Oyeneyin, J.M. Peden, M.B. Larrucia, D. Parker // Society of Petroleum Engineers Drilling & Completion. – 1996. – V. 11. – P. 168–172.
28. Larsen T.I., Pilehvari A.A., Azar J.J. Development of a new cutting transport: model for high-hole wellbores including horizontal wells // Paper Society of Petroleum Engineers 25872. Society of Petroleum Engineers Rocky Mountain Regional/Low Permeability Reservoirs Symposium. – Denver, April 12–14, 1993. – P. 129–135.
29. Nguyen D., Rahman S.S. A three-layer hydraulic program for effective cuttings transport and hole cleaning in highly deviated and horizontal wells // The International Association of Drilling Contractors/Society of Petroleum Engineers Asia Pacific Drilling Technology Conference. – Kuala Lumpur, Malaysia, 1996. – P. 163–173.
30. Kamp A.M., Rivero M. Layer modeling for cuttings transport in highly inclined wellbores // Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference. Society of Petroleum Engineers. – Caracas, Venezuela, January, 1999. – P. 1–12.
31. Doron P., Barnea D. Flow of solid-liquid mixtures in inclined pipes // International Journal of Multiphase Flow. – 1997. – V. 23. – № 2. – P. 313–323.
32. Numerical simulation on three layer dynamic cutting transport model and its application on extended reach drilling / Z. Wang, Y. Zhai, X. Hao, X. Guo, L. Sun // Society of Petroleum Engineers Asia Pacific Drilling Technology Conference and Exhibition. – Ho Chi Minh City, Vietnam, November 2010. – P. 1–10.
33. Naganawa S., Sato R., Ishikawa M. Cuttings-transport simulation combined with large-scale-flow-loop experimental results and logging-while-drilling data for hole-cleaning evaluation in directional drilling // Society of Petroleum Engineers Drilling and Completion. – September 2017. – V. 32. – P. 1–14.
34. Prasun S., Ghalambor A. Transient cuttings transport with foam in horizontal wells – a numerical simulation study for applications in depleted reservoirs // SPE international conference and exhibition on formation damage control. Society of Petroleum Engineers. – Lafayette, Louisiana, USA, February, 2018. – P. 1–23.
35. A unified transient solid-liquid two-phase flow model for cuttings transport-modelling part / F. Zhang, S. Miska, M. Yu, E. Ozbayoglu // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2018. – V. 166. – P. 146–156.
36. Iyoho A.W., Horeth H.J.M., Veenkant R.L. A computer model for hole-cleaning analysis // Society of Petroleum Engineers Annual Technical Conference and Exhibition. – Dallas, Texas, September 1988. – P. 397–407.
37. King I., Trenty L., Vit C. How the 3D modeling could help hole-cleaning optimization // Society of Petroleum Engineers Annual Technical Conference and Exhibition. – Dallas, Texas, October 2000. – P. 1–6.
38. Кроу С.Т. Исследования модели течения газа с небольшим содерганием частиц // Теоретические основы инженерных расчетов. – 1982. – Сеп. Д. – № 3. – С. 114–122.
39. Akhshik S., Behzad M., Rajabi M. CFD–DEM approach to investigate the effect of drill pipe rotation on cuttings transport behavior // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2015. – V. 127. – P. 229–244.
40. Mishra N. Investigation of hole cleaning parameters using computational fluid dynamics in horizontal and deviated wells: Msc Thesis. – Virginia, 2007. – 76 p.
41. Computational Fluid Dynamics (CFD) as a tool to study cutting transport / H.I. Bilgesu, M.W. Ali, K. Aminian, S. Ameri // Society of Petroleum Engineers Eastern Regional Meeting. – Lexington, Kentucky, 2002. – P. 1–4.
42. Bilgesu H.I., Mishra N., Ameri S. Understanding the effect of drilling parameters on hole cleaning in horizontal and deviated wellbores using computational fluid dynamics // Society of Petroleum Engineers Eastern Regional Meeting. – Lexington, Kentucky USA, October 2007. – P. 1–7.
43. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. – М.: Наука, 1987. – Т. 1. – 464 с.
44. Турублентные течения газовзвесей / А.А. Шрайбер, Л.Б. Гавин, В.А. Наумов, В.П. Яценко. – Киев: Наукова Думка, 1987. – 239 с.
45. Распространение запыленных струйных течений / Ф.Ф. Мостафа, Х.Ц. Монджаи, В.Г. Макдонелл, Г.С. Самуэлсон // Аэрокосмическая техника. – 1990. – № 3. – С. 65–82.
46. Бубенчиков А.М., Харламов С.Н. Математические модели неоднородной анизотропной турбулентности во внутренних течениях. – Томск: Томский государственный университет, 2001. – 448 с.
47. Зайчик Л.И., Алипченков В.М. Статистические модели движения частиц в турбулентной жидкости. – М.: Физматлит, 2007. – 312 с.
48. Wang Z.M., Li M., Hong Y.K. Effect of drillpipe rotation on borehole cleaning for extended reach well // Journal of Hydrodynamics. – 2009. – V. 21. – № 3. – P. 366–372.
49. Mme U., Skalle P. CFD calculations of cuttings transport through drilling annuli at various angles // International Journal of Petroleum Science and Technology. – 2012. – V. 6 (2). – P. 129–141.
50. Simulation of the cuttings cleaning during the drilling operation / H.H. Al-Kayiem, M.Z.A. Ismail, N.M. Zaki, M.E. Elfelel // American Journal of Applied Sciences. – 2010. – V. 7 (6). – P. 800–806.
51. Modeling of the Critical Deposition Velocity of Cuttings in an Inclined-Slimhole Annulus / B. Sun, H. Xiang, H. Li & X. Li // Society of Petroleum Engineers Journal. – August 2017. – V. 22. – P. 1213–1224.

52. CFD simulation of rheological model effect on cuttings transport / R. Rooki, F.D. Ardejani, A. Moradzadeh, M. Norouzi // Journal of the Society of Petroleum Engineers on Science and Technology. – 2015. – V. 36 (3). – P. 402–410.
53. Simulation of cuttings transport with foam in deviated wellbores using computational fluid dynamics / R. Rooki, F.D. Ardejani, A. Moradzadeh, M. Norouzi // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. – 2014. – V. 4 (3). – P. 263–273.
54. Epelle E.I., Gerogiorgis D.I. Transient and steady state analysis of drill cuttings transport phenomena under turbulent conditions // Chemical Engineering Research and Design. – 2018. – V. 131. – P. 520–544.
55. Investigation of drill pipe rotation effect on cutting transport with aerated mud using CFD approach / M.K. Moraveji, M. Sabah, A. Shahryari, A. Ghaffarkhah // Advanced Powder Technology. – 2017. – V. 28 (4). – P. 1141–1153.
56. Steady-state cuttings transport simulation in horizontal borehole annulus / Y. Ignatenko, O. Bocharov, A. Gavrilov, R. May // ASME 2018 37th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection. – Madrid, Spain June, 2018. – P. 74–79.
57. Amanna B., Movaghfar M.R.K. Cuttings transport behavior in directional drilling using Computational Fluid Dynamics (CFD) // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2016. – V. 34. – P. 670–679.
58. Kharlamov S.N., Islyamov I.Sh. Optimization of the liquid hydrocarbons pipeline transport with using a vortex effect and inductive heating of metallic additives // Proc. of the 7th International Forum on Strategic Technology. – Tomsk, Russia, 2012. – P. 1–6. DOI: 10.1109/IFOST.2012.6357803.
59. Николаев Е.В., Харламов С.Н. Закономерности изменений параметров процессов переноса многокомпонентных углеводородных сред в условиях сепарации // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 10. – P. 137–144.
60. Kharlamov S.N. Characteristics of flow and heat transfer in a turbulent twisted flow // Heat Transfer Research. – 2002. – V. 33. – Iss. 1–2. – P. 64–74.
61. Prospects of RANS models with effects multiparameter at modeling of complex non-isothermal flows of viscous media in devices with any configuration of surface / S.N. Kharlamov, V.Yu. Kim, S.I. Silvestrov, R.A. Alginov, S.A. Pavlov // Proc. of the 6th International Forum on Strategic Technology. – Heilongjiang, Harbin, China, 2011. – V. 2. – P. 787–791. DOI: 10.1109/IFOST.2011.6021139.
62. Глушко Г.С. Некоторые особенности турбулентных течений несжимаемой жидкости с поперечным сдвигом // Известия АН СССР. Механика жидкости и газа. – 1971. – № 4. – С. 128–136.
63. Launder B.E. Second-moment closure and its use in modelling turbulent industrial flows // International Journal of the Numerical Methods in Fluids. – 1989. – V. 9. – P. 963–979.
64. Kharlamov S.N., Alginov R.A. Specific aspects of turbulent flow separation in nodes and junctions of pipelines // XVIII International Scientific Symposium in Honour of Academician M.A. Usov: PGON 2014 IOP Publishing IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 21(1). – Tomsk, Russia, 2014. – P. 1–6. DOI:10.1088/1755-1315/21/1/012038.
65. Харламов С.Н., Павлов С.А. Исследование течений гетерогенных сред на горизонтальных участках трубопроводов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2012. – № 8. – С. 94–103.
66. Kharlamov S.N., Malozemov A.V. Investigation of regularities highly viscous liquid flows in interaction with peripheral annular flow of water – oil in complex pipelines // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – V. 565. – P. 152–155. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.565.152.
67. Kharlamov S.N., Kudelin N.S., Dedelev P.O. Hydrodynamic, heat and acoustic processes modelling in transport of rheologically complex viscous media technology in pipelines // XVIII International Scientific Symposium in Honour of Academician M.A. Usov: PGON2014 IOP Publishing IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 21. – Tomsk, Russia, 2014. – P. 1–6. DOI:10.1088/1755-1315/21/1/012040.
68. Heydari O., Sahraei E., Skalle P. Investigating the impact of drillpipe's rotation and eccentricity on cuttings transport phenomenon in various horizontal annuluses using Computational Fluid Dynamics (CFD) // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2017. – V. 156. – P. 801–813. DOI: 10.1016/j.petrol.2017.06.059.
69. Kharlamov S.N., Alginov R.A. Engineering approaches' progress in calculation of inhomogeneous turbulence in pipelines // Society of Petroleum Engineers – SPE Russian Oil and Gas Technical Conference and Exhibition. – Moscow, Russia, 2010. – V. 2. – P. 798–805.
70. Akhshik S., Behzad M., Rajabi M. On the particle-particle contact effects on the hole cleaning process via a CFD-DEM model // Particulate Science and Technology. – 2016. – V. 34 (6). – P. 736–743.
71. Akhshik S., Behzad M., Rajabi M. CFD-DEM simulation of the hole cleaning process in a deviated well drilling: the effects of particle shape // Particuology. – 2016. – V. 25. – P. 72–82.
72. Hole-cleaning performance comparison of oil-based and water-based drilling fluids / S. Sayindla, B. Lund, J.D. Ytrehus, A. Saasen // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2017. – V. 1 (159). – P. 49–57.
73. Epelle E.I., Gerogiorgis D.I. A multiparametric CFD analysis of multiphase annular flows for oil and gas drilling applications // Computers & Chemical Engineering. – 2017. – V. 106. – P. 645–661.
74. A review of CFD modelling studies on pneumatic conveying and challenges in modelling offshore drill cuttings transport / E.V.P.J. Manjula, W.H. Ariyaratne, C. Ratnayake, M.C. Melaaen // Powder Technology. – 2017. – V. 305. – P. 782–793.
75. Akhshik S., Rajabi M. CFD-DEM modeling of cuttings transport in underbalanced drilling considering aerated mud effects and downhole conditions // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2018. – V. 160. – P. 229–246.
76. Epelle E.I., Gerogiorgis D.I. CFD modelling and simulation of drill cuttings transport efficiency in annular bends: effect of particle sphericity // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2018. – V. 170. – P. 992–1004.
77. Naderi M., Khamehchi E. Cutting transport efficiency prediction using probabilistic CFD and DOE techniques // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2018. – V. 163. – P. 58–66.

Поступила: 02.03.2020 г.

Информация об авторах

Харламов С.Н., доктор физико-математических наук, профессор, профессор отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Томского политехнического университета.

Джанхорбани М., аспирант отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Томского политехнического университета.

UDC 532.517:536.242:544.012:622.244:519.6

CUTTINGS TRANSPORT IN HOLE CLEANING CONSIDERING WELL ORIENTATION, PIPE ECCENTRICITY AND PIPE ROTATION: PROBLEMS, RESULTS, PROSPECTS (SURVEY)

Sergey N. Kharlamov¹,
kharsn@mail.ru

Mehran Janghorbani¹,
mehran.janghorbani@gmail.com

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

The article relevance is caused by the critical estimation of the data presented in domestic and foreign publications on problems related to modeling of viscous fluid streams while interacting with particles of a dispersed material and with walls of the devices intended for performance of drilling operations; clearing of wellbores from cuttings taking into account well inclination and drillpipe eccentricity.

The main aim is to introduce the bibliographic analysis of hole cleaning and cuttings transport, focused on finding ways to efficiently increase operational efficiency; to work out approaches and methods to model the cuttings transport in vertical and horizontal holes; to explain modern data on numerical modeling of cuttings transport problems; to provide recommendations to increase hole cleaning efficiency.

The research methods are theoretical and practical ones, characterizing fluid flow in systems, containing particles and the legitimacy of idealization of transport phenomena in mixtures; as well as the methods borrowed from other disciplines aimed at calculating the influence of flow regime and drillpipe rotation and eccentricity on location and behavior of dispersed particles. The general concepts of hydrodynamic and heat- and mass transfer principles in rheological complex media are not discussed in detail, and explained only to that degree which is required for clarity and completeness. The experimental material contains data on applicability of the theory to real physical systems. Most investigations are based on analyzing particle movement through fluid in common lumps as it originates at sedimentation as well as when particles remain more or less motionless, as in densely packed beds; or the relative motion of particles and fluid with complex turbulent distribution; at motion of particles relative to each other when the flow of the carrying medium is a complex shear flow.

Results. The paper introduces the analysis of experimental and theoretical results, important for applications related to cuttings transport phenomena, and the features accompanying processes of momentum, mass and energy during the flow of rheologically complex homogeneous and heterogeneous viscous mixtures in the annular space between a rotating eccentric inner pipe and a non-rotating outer pipe. Cuttings accumulation and difficulties in its transportation have major real world applications in drilling inclined and horizontal wellbores. Modeling results and the existing empirical relationships for cuttings behavior are critically analyzed. Advantages and the legitimacy of assumptions of some turbulent models and their closing relationships and dynamic, diffusive properties are presented. Also the parameters and mechanisms modeling the formation, accumulation, sedimentation, transport and separation of slime cuttings from a liquid in which they are suspended are given. The last 25–30 years have seen the numerous advances in numerical methods of multi-parameter and multidimensional modeling of hydrodynamics in dispersed mixtures (suspension, foam, powders). The analysis of experimental works shows that observation of dynamics of solid and liquid particles interaction by contactless means of registration can provide valuable information for validation and verification of the modern Reynolds Shear Stresses (RSS)-models of turbulence and specific turbulent fluxes for streams based on kL -, ke -equations, capable to predict complex turbulent flow of a mixture. The paper introduces the prospects of developing a universal algorithm with the possibility of a detailed prediction of effects: cutting bed formations in arbitrary points of annular spaces; determination of the minimum speed necessary for its formation and removal. The latter can be used in further research for determination of maximum admissible Rate Of Penetration (ROP); optimum values pump output; establishing field guidelines on duration and sequence of well cleaning operations, and the frequency of tripping operations.

Key words:

Cuttings, hole, cleaning, modeling, hydrodynamics, rheology, structure, stresses, mass forces.

REFERENCES

1. Piroozian A., Ismail I., Yaacob Z., Babakhani P., Ismail A.S.I. Impact of drilling fluid viscosity, velocity and hole inclination on cuttings transport in horizontal and highly deviated wells. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2012, vol. 2 (3), pp. 149–156.
2. Ozbayoglu M.E., Saasen A., Sorgun M., Svanes K.. Effect of pipe rotation on hole cleaning for water-based drilling fluids in horizontal and deviated wells. *International Association of Drilling Contractors/Society of Petroleum Engineers Asia Pacific Drilling Technology Conference and Exhibition*. Jakarta, Indonesia, 2008. pp. 1–11.
3. Pigott R.J.S. Mud flow in drilling. *Drilling and Production Practice*. USA, American Petroleum Institute, 1942. pp. 91–103.
4. Chien S.F. Settling velocity of irregularly shaped particles. *Paper Society of Petroleum Engineers*, 1993, no. 26121, pp. 281–289.
5. Ramsey M. *Practical wellbore hydraulics and hole cleaning unlock faster, more efficient, and trouble-free drilling operations*. USA, Gulf Professional Publishing, 2019. 340 p.
6. Osgouei R.E., Ozbayoglu M.E., Fu T.K. CFD simulation of solids carrying capacity of a Newtonian fluid through horizontal eccentric annulus. *American Society of Mechanical Engineering 2013. Fluids Engineering Division Summer Meeting*. USA, July, 2013. pp. 23–28.
7. Iyoho A.W. *Drilled-cuttings transport by non-newtonian drilling fluids through inclined, eccentric annuli*. PhD thesis. Tulsa, 1980. 263 p.
8. Brown N.P., Bern P.A., Weaver A. Cleaning deviated holes: new experimental and theoretical studies. *The Society of Petroleum Engineers/International Association of Drilling Contractors Drilling Conference*. New Orleans, Louisiana, February 28 – March 3, 1989. pp. 171–178.
9. Gavignet A.A., Sobey I.J. A Model for the transport of cuttings in highly deviated wells. *Society of Petroleum Engineers paper 15417. The 61st Annual Technical Conference and Exhibition of*

- the Society Petroleum Engineers*. New Orleans, USA. October 5–6, 1986, pp. 916–921.
10. Okrajni S. Mud cuttings transport in directional well drilling. *Society of Petroleum Engineers paper 16.178: the 60th Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers*. Las Vegas, Nevada, USA, September 22–25, 1985. pp. 297–308.
11. Martin M., Georges C., Bisson P., Konirsch O. Transport of cuttings in directional wells. *Society of Petroleum Engineers/International Association of Drilling Contractors paper 16083, Drilling Conf.* New Orleans, Louisiana, USA, March 15–18, 1987. pp. 293–303.
12. Ford J.T., Peden J.M., Oyeneyin M.B., Erhu Gao, Zarrough R. Experimental investigation of drilled cuttings transport in inclined boreholes. *The 65th Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers*. New Orleans, Louisiana, USA, September 23–26, 1990. pp. 197–206.
13. Peden J.M., Ford J.T., Oyeneyin M.B. Comprehensive experimental investigation of drilled cuttings transport in inclined wells including the effects of rotation and eccentricity. *The 1990 European Petroleum Conference*. The Hague, Netherlands, 1990. pp. 394–405.
14. Martins A.L., Santana C.C. Evaluation of cuttings transport in horizontal and near horizontal wells – a dimensionless approach. *The Second Latin America Petroleum Engineering Conference*. Caracas, Venezuela, 1992. pp. 155–161.
15. Bassal A.A. *The effect of drillpipe rotation on cuttings transport in inclined wellbores*. PhD Thesis. Tulsa, Oklahoma, USA, 1995. 214 p.
16. Saasen A. Hole cleaning during deviated drilling – the effects of pump rate and rheology. *The 1998 Society of Petroleum Engineers European Petroleum Conference*. The Hague, Netherlands, 1998. pp. 161–167.
17. Pilevhari A.A., Azar J.J., Shirazi S.A. State-of-the-art cuttings transport in horizontal wellbores. *Society of Petroleum Engineers Drilling & Completion*, 1999, vol. 14, pp. 196–200.
18. Masuda Y., Doan Q., Ogutoreli M., Nagawa S., Yonezawa T., Kobayashi A., Kamp A. Critical cuttings transport velocity in inclined annulus: experimental studies and numerical simulation. *The 2000 Society of Petroleum Engineers/Petroleum Society of Canadian Institute of Mining International Conference*. Calgary, Alberta, Canada, 2000. pp. 1–12.
19. Ozbayoglu M.E., Miska S.Z., Reed T., Takach N. Analysis of the effects of major drilling parameters on cuttings transport efficiency for high-angle wells in coiled tubing drilling operations. *Society of Petroleum Engineers/Intervention and Coiled Tubing Association Coiled Tubing Conference and Exhibition*. Houston, Texas, January 2004. pp. 1–8.
20. Sifferman T.R., Myers G.M., Haden E.L., Hahl H.A. Drill-cuttings transport in full scale vertical annuli. *Journal of Petroleum Technology*, 1974, November, vol. 26, pp. 1295–1302.
21. Gul S., Kuru E., Parlaktuna M. Experimental investigation of cuttings transport in horizontal wells using aerated drilling fluids. *International Petroleum Exhibition & Conference*. Abu Dhabi, November, 2017. pp. 1–18.
22. Werner B., Myrseth V., Saasen A. Viscoelastic properties of drilling fluids and their influence on cuttings transport. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2017, vol. 156, pp. 845–851.
23. Gavignet A.A., Sobey I.J. Model aids cuttings transport prediction. *Journal of Petroleum Technology*, 1989, vol. 41, pp. 916–921.
24. Philip Z., Sharma M.M., Chenevert M.E. The role of Taylor vortices in the transport of drill cuttings. *Society of Petroleum Engineers India Oil and Gas Conference and Exhibition*. New Delhi, India, January 1998. pp. 1–7.
25. Leising L.J., Walton I.C. Cuttings-transport problems and solutions in coiled-tubing drilling. *Society of Petroleum Engineers Drilling Conference*. Dallas, Texas, USA, March 2002. pp. 85–100.
26. Clark R.K., Bickham K.L. A mechanistic model for cuttings transport. *Society of Petroleum Engineers annual technical conference and exhibition*. New Orleans, Louisiana, USA, September 1994. pp. 139–153.
27. Ford J.T., Oyeneyin M.B., Peden J.M., Larrucia M.B., Parker D. A new MTV computer package for hole-cleaning design and analysis. *Society of Petroleum Engineers Drilling & Completion*, 1996, vol. 11, pp. 168–172.
28. Larsen T.I., Pilevhari A.A., Azar J.J. Development of a new cutting transport model for high-hole wellbores including horizontal wells. *Paper Society of Petroleum Engineers 25872. Society of Petroleum Engineers Rocky Mountain Regional/Low Permeability Reservoirs Symposium*. Denver, Colorado, USA, April 12–14, 1993. pp. 129–135.
29. Nguyen D., Rahman S.S. A three-layer hydraulic program for effective cuttings transport and hole cleaning in highly deviated and horizontal wells. *The International Association of Drilling Contractors/Society of Petroleum Engineers Asia Pacific Drilling Technology Conference*. Kuala Lumpur, Malaysia, 1996. pp. 163–173.
30. Kamp A.M., Rivero M. Layer modeling for cuttings transport in highly inclined wellbores. *Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference*. Society of Petroleum Engineers. Caracas, Venezuela, January, 1999. pp. 1–12.
31. Doron P., Barnea D. Flow of solid-liquid mixtures in inclined pipes. *International Journal of Multiphase Flow*, 1997, vol. 23, no. 2, pp. 313–323.
32. Wang Z., Zhai Y., Hao X., Guo X., Sun L. Numerical simulation on three layer dynamic cutting transport model and its application on extended reach drilling. *Society of Petroleum Engineers Asia Pacific Drilling Technology Conference and Exhibition*. Ho Chi Minh City, Vietnam, November 2010. pp. 1–10.
33. Naganawa S., Sato R., Ishikawa M. Cuttings-transport simulation combined with large-scale-flow-loop experimental results and logging-while-drilling data for hole-cleaning evaluation in directional drilling. *Society of Petroleum Engineers Drilling and Completion*, September 2017, vol. 32, pp. 1–14.
34. Prasun S., Ghalambor A. Transient cuttings transport with foam in horizontal wells – a numerical simulation study for applications in depleted reservoirs. *SPE international conference and exhibition on formation damage control*. Society of Petroleum Engineers. Lafayette, Louisiana, USA, February, 2018. pp. 1–23.
35. Zhang F., Miska S., Yu M., Ozbayoglu E. A unified transient solid-liquid two-phase flow model for cuttings transport-modelling part. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, vol. 166, pp. 146–156.
36. Iyoho A.W., Horeth II.J.M., Veenkant R.L. A computer model for hole-cleaning analysis. *Society of Petroleum Engineers Annual Technical Conference and Exhibition*. Dallas, Texas, September 1988. pp. 397–407.
37. King I., Trenty L., Vit C. How 3D modeling could help hole-cleaning optimization. *Society of Petroleum Engineers Annual Technical Conference and Exhibition*. Dallas, Texas, October 2000. pp. 1–6.
38. Crow C.T. Issledovaniya modeli techeniya gaza s nebolshim soderzhaniem chastits [Studies of a gas flow model with a small particle content]. *Teoreticheskie osnovy inzhenernykh rasshetov*, 1982, Ser. D, no. 3, pp. 114–122.
39. Akhshik S., Behzad M., Rajabi M. CFD–DEM approach to investigate the effect of drill pipe rotation on cuttings transport behavior. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2015, vol. 127, pp. 229–244.
40. Mishra N. *Investigation of hole cleaning parameters using computational fluid dynamics in horizontal and deviated wells*. Msc Thesis. Virginia, USA 2007. 76 p.
41. Bilgesu H.I., Ali M.W., Aminian K., Ameri S.. Computational Fluid Dynamics (CFD) as a tool to study cutting transport. *Society of Petroleum Engineers Eastern Regional Meeting*. Lexington, Kentucky, USA, 2002. pp. 1–4.
42. Bilgesu H.I., Mishra N., Ameri S. Understanding the effect of drilling parameters on hole cleaning in horizontal and deviated wellbores using computational fluid dynamics. *Society of Petroleum Engineers Eastern Regional Meeting*. Lexington, Kentucky, USA, October 2007. pp. 1–7.
43. Nigmatulin R.I. *Dinamika mnogofaznykh sred* [Dynamics of multiphase media]. Moscow, Nauka Publ., 1987. Vol. 1, 464 p.
44. Schreiber A.A., Gavini L.B., Naumov V.A., Yatsenko V.P. *Turbulentye techeniya gazovzvesey* [Turbulent flows of gas suspensions]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1987. 239 p.
45. Mostafa F.F., Monjia H.C., McDonnell V.G., Samuels G.S. Rasprostranenie zaplyennyykh struynykh techeniy [Distribution of dusty jet streams]. *Aerokosmicheskaya Tekhnika*, 1990, no. 3, pp. 65–82.

46. Bubenchikov A.M., Kharlamov S.N. *Matematicheskie modeli neodnorodnoy anizotropnoy turbulentnosti vo vnutrennikh techeniyakh* [Mathematical models of non-homogeneous anisotropic turbulence in internal flows]. Tomsk, Tomsk State University Publ., 2001. 448 p.
47. Zaychik L.I., Alipchenkov V.M. *Statisticheskie modeli dvizheniya chastits v turbulentnoy zhidkosti* [Statistical models of particle motion in a turbulent liquid]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2007. 312 p.
48. Wang Z.M., Li M., Hong Y.K. Effect of drillpipe rotation on borehole cleaning for extended reach well. *Journal of Hydrodynamics*, 2009, vol. 21 (3), pp. 366–372.
49. Mme U., Skalle P. CFD calculations of cuttings transport through drilling annuli at various angles. *International Journal of Petroleum Science and Technology*, 2012, vol. 6 (2), pp. 129–141.
50. Al-Kayiem H.H., Ismail M.Z.A., Zaki N.M., Elfeel M.E. Simulation of the cuttings cleaning during the drilling operation. *American Journal of Applied Sciences*, 2010, vol. 7 (6), pp. 800–806.
51. Sun B., Xiang H., Li H., Li X. Modeling of the critical deposition velocity of cuttings in an inclined-slimhole annulus. *Society of Petroleum Engineers Journal*, August 2017, vol. 22, pp. 1213–1224.
52. Rooki R., Ardejani F.D., Moradzadeh A., Norouzi M. CFD simulation of rheological model effect on cuttings transport. *Journal of the Society of Petroleum Engineers on Science and Technology*, 2015, vol. 36 (3), pp. 402–410.
53. Rooki R., Ardejani F.D., Moradzadeh A., Norouzi M.. Simulation of cuttings transport with foam in deviated wellbores using computational fluid dynamics. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2014, vol. 4 (3), pp. 263–273.
54. Epelle E.I., Gerogiorgis D.I. Transient and steady state analysis of drill cuttings transport phenomena under turbulent conditions. *Chemical Engineering Research and Design*, 2018, vol. 131, pp. 520–544.
55. Moraveji M.K., Sabah M., Shahryari A., Ghaffarkhah A. Investigation of drill pipe rotation effect on cutting transport with aerated mud using CFD approach. *Advanced Powder Technology*, 2017, vol. 28 (4), pp. 1141–1153.
56. Ignatenko Y., Bocharov O., Gavrilov A., May R. Steady-state cuttings transport simulation in horizontal borehole annulus. *ASME 2018 37th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*. Madrid, Spain, June, 2018. pp. 74–79.
57. Amanna B., Movaghfar M.R.K. Cuttings transport behavior in directional drilling using Computational Fluid Dynamics (CFD). *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, vol. 34, pp. 670–679.
58. Kharlamov S.N., Islyamov I.Sh. Optimization of the liquid hydrocarbons pipeline transport with using a vortex effect and inductive heating of metallic additives. *Proc. of the 7th International Forum on Strategic Technology*. Tomsk, Russia, 2012. pp. 1–6. DOI: 10.1109/IFOST.2012.6357803.
59. Nikolaev E.V., Kharlamov S.N. Regularities of changes in parameters of multicomponent hydrocarbon media transfer in separation conditions. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 10, pp. 137–144. In Rus.
60. Kharlamov S.N. Characteristics of flow and heat transfer in a turbulent twisted flow. *Heat Transfer Research*, 2002, vol. 33, Iss. 1–2, pp. 64–74.
61. Kharlamov S.N., Kim V.Yu., Silvestrov S.I., Alginov R.A., Pavlov S.A.. Prospects of RANS models with effects multiparameter at modeling of complex non-isothermal flows of viscous media in devices with any configuration of surface. *Proc. of the 6th International Forum on Strategic Technology*. Heilongjiang, Harbin, China, 2011. Vol. 2, pp. 787–791.
62. Glushko G.S. Nekotorye osobennosti turbulentnykh techeniy neszhimaemoy zhidkosti s poperechnym sdvigom [Some features of turbulent flows of an incompressible fluid with a transverse shift]. *Izvestiya AN SSSR Mekhanika Zhidkosti i Gaza*, 1971, no. 4, pp. 128–136.
63. Launder B.E. Second-moment closure and its use in modelling turbulent industrial flows. *International Journal of the Numerical Methods in Fluids*, 1989, vol. 9, pp. 963–979.
64. Kharlamov S.N., Alginov R.A. Specific aspects of turbulent flow separation in nodes and junctions of pipelines. *XVIII International Scientific Symposium in Honour of Academician M.A. Usov: PGON 2014 IOP Publishing IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 21(1). Tomsk, Russia, 2014. pp. 1–6.
65. Kharlamov S.N., Pavlov S.A. Issledovanie Techeny heterogenykh sred na horizontalnykh uchastkakh truboprovodov [Investigation of flows of heterogeneous media on horizontal sections of pipelines]. *Gorny informatsionno analiticheski bulletin (nauchno tekhnicheski zhurnal)*, 2012, no. 8, pp. 94–103.
66. Kharlamov S.N., Malozemov A.V. Investigation of regularities highly viscous liquid flows in interaction with peripheral annular flow of water – oil in complex pipelines. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, vol. 565, pp. 152–155.
67. Kharlamov S.N., Kudelin N.S., Dedelev P.O. Hydrodynamic, heat and acoustic processes modelling in transport of rheologically complex viscous media technology in pipelines. *XVIII International Scientific Symposium in Honour of Academician M.A. Usov: PGON2014 IOP Publishing IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 21. Tomsk, Russia, 2014. pp. 1–6.
68. Heydari O., Sahraei E., Skalle P. Investigating the impact of drillpipe's rotation and eccentricity on cuttings transport phenomenon in various horizontal annuluses using Computational Fluid Dynamics (CFD). *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2017, vol. 156, pp. 801–813.
69. Kharlamov S.N., Alginov R.A. Engineering Approaches' Progress in Calculation of Inhomogeneous Turbulence in Pipelines. *Society of Petroleum Engineers – SPE Russian Oil and Gas Technical Conference and Exhibition*. Moscow, Russia, 2010. Vol. 2, pp. 798–805.
70. Akhshik S., Behzad M., Rajabi M. On the particle–particle contact effects on the hole cleaning process via a CFD–DEM model. *Particulate Science and Technology*, 2016, vol. 34 (6), pp. 736–743.
71. Akhshik S., Behzad M., Rajabi M. CFD–DEM simulation of the hole cleaning process in a deviated well drilling: the effects of particle shape. *Particuology*, 2016, vol. 25, pp. 72–82.
72. Sayindla S., Lund B., Ytrehus J.D., Saasen A. Hole-cleaning performance comparison of oil-based and water-based drilling fluids. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2017, vol. 1 (159), pp. 49–57.
73. Epelle E.I., Gerogiorgis D.I. A multiparametric CFD analysis of multiphase annular flows for oil and gas drilling applications. *Computers & Chemical Engineering*, 2017, vol. 106, pp. 645–661.
74. Manjula E.V.P.J., Ariyaratne W.H., Ratnayake C., Melaaen M.C. A review of CFD modelling studies on pneumatic conveying and challenges in modelling offshore drill cuttings transport. *Powder Technology*, 2017, vol. 305, pp. 782–793.
75. Akhshik S., Rajabi M. CFD–DEM modeling of cuttings transport in underbalanced drilling considering aerated mud effects and downhole conditions. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, vol. 160, pp. 229–246.
76. Epelle E.I., Gerogiorgis D.I. CFD modelling and simulation of drill cuttings transport efficiency in annular bends: effect of particle sphericity. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, vol. 170, pp. 992–1004.
77. Naderi M., Khamehchi E. Cutting transport efficiency prediction using probabilistic CFD and DOE techniques. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, vol. 163, pp. 58–66.

Received: 2 March 2020.

Information about the authors

- Sergey N. Kharlamov**, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.
- Mehran Janghorbani**, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 539.3

НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА ТОПОЛОГИЧЕСКИ ОПТИМАЛЬНОЙ НАНО БАЛКИ ТИМОШЕНКО НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННОЙ МОМЕНТНОЙ ТЕОРИИ

Павлов Сергей Петрович¹,
zhigalovm@yandex.ru

Жигалов Максим Викторович¹,
zhigalovm@yandex.ru

Захарова Алёна Александровна²,
zaa@tu-bryansk.ru

Крысько Вадим Анатольевич¹,
tak@san.ru

¹ Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.,
Россия, 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77.

² Брянский государственный технический университет,
Россия, 241035, Россия, г. Брянск, бул. 50 лет Октября, 7.

Актуальность исследования. Для контроля данных технических операций бурения скважин, различного вида ремонта скважин, геологоразведочного бурения в нефтяной и газовой промышленности на буровых и ремонтных установках всех типов используются технологические датчики (датчики нагрузки, давления, температуры жидкости, выхода раствора, плотности жидкости). Современные датчики имеют малые размеры и для повышения чувствительности изготавливаются на базе наноэлектромеханических систем, которые включают в себя составляющие элементы, нано балки и нанопластины. Эти элементы работают при высоких температурах и подвергаются механическим нагрузкам различного вида. Увеличение прочности этих элементов является несомненно актуальной задачей.

Цель: построить математическую модель на базе кинематической гипотезы Тимошенко и модифицированной моментной теории чувствительного элемента в виде балки, нано электромеханического датчика под действием механических и тепловых полей; создать методологию получения оптимальной топологии нано балки для произвольной статической и динамической нагрузки и различных граничных условий с целью увеличения ее жесткости; провести сравнительный анализ статики и нелинейной динамики оптимальной и неоптимальной балок.

Объекты: элемент наноэлектромеханических систем в виде балки с учетом оптимальной микроструктуры.

Методы: методы топологической оптимизации, вариационные методы, метод конечных разностей второго порядка, методы типа Рунге–Кутта, Фурье и вейвлет анализ, фазовый портрет и сечение Пуанкаре.

Результаты. Построена методология получения оптимальной микроструктуры нано балки на основе топологической оптимизации. На основе принципа Гамильтона–Остроградского построена математическая модель неоднородной в двух направлениях (по толщине и длине) нано балки Тимошенко на базе модифицированной моментной теории. Проведен сравнительный анализ статического изгиба и нелинейной динамики оптимальной и неоптимальной нано балок.

Ключевые слова:

Нано балка Тимошенко, наноэлектромеханические системы, температурное и силовое поля, модифицированная моментная теория упругости, метод конечных разностей, метод типа Рунге–Кутта, топологическая оптимизация, нелинейная динамика.

Введение

Современные технологические датчики, используемые при бурении скважин, должны обладать определенным набором свойств, таких как: малая масса, устойчивость к воздействию внешних силовых, электрических и тепловых нагрузок. В связи с этим возникает проблема проектирования элементов датчиков из материалов, свойства которых не зависят от температуры, которые могут работать при больших температурах (более ± 150 °C), постоянных и переменных нагрузках и т. п. Одним из направлений улучшение рабочих характеристик датчиков является использование для изготовления чувствительного элемента датчика конструктивно неоднородных материалов (КНМ). КНМ представляют собой многофазные композиты с объемной долей фаз, меняющейся в любом желаемом направлении. Это дает возможность новому

материалу иметь лучшие прочностные характеристики без возникновения нежелательной концентрации напряжений. Благодаря этим особенностям балки из КНМ широко используется в различных инженерных конструкциях, таких как: газовые турбины, ветровые турбины, лопасти роторов вертолетов, гребные винты кораблей, космические и морские структуры [1].

До настоящего времени закон изменения упругих свойств, то есть микроструктура, таких элементов задавалась заранее конструктором. Изменение свойств материала вдоль произвольного направления выражалась степенным или экспоненциальным законами, которые являются самыми известными из законов для описания изменения свойств КНМ [2–4].

Топологическая оптимизация механических структур становится распространенным инструментом при

проектировании структур с улучшенными физическими характеристиками. Для проектирования микроструктур используются такие методы, как: метод рациональной аппроксимации материала RAMP (rational approximation of material properties) [5], метод SIMP (solid isotropic material with penalization) [6], метод эволюционной структурной оптимизации (ESO) [7] и метод фиксации уровня (level set method) [8]. Среди данных методов использование RAMP приобретает все большую популярность для задач с температурными воздействиями. Основная идея этого метода заключается в определении параметров элемента как проектных переменных, а для расчета параметров в задаче оптимизации устанавливается связь между локальными параметрами (например, плотностью) и глобальными физическими свойствами материала (например, модулем Юнга и/или коэффициентом теплопроводности). С помощью различных алгоритмов поиска оптимума материалы в области оптимизации перераспределяются таким образом, чтобы достигались желаемые функциональные характеристики конструкции. Следует отметить, что существуют два подхода к включению термических и механических критериев в задачи оптимизации топологии. Первый класс рассматривает материал-кандидат как термоупругий без полной связи как теплового, так и механического полей в топологическом смысле, где обычно задано температурное поле, а термическая нагрузка преобразуется в механическую нагрузку [9, 10]. В таком случае конструкция, прежде всего, управляется механическими характеристиками. Второй класс рассматривает материал с учетом и тепловых, и механических полей. Задача заключается в том, чтобы сначала вычислить температурное поле, а затем соединить его с полем деформаций. В таких случаях проектирование может быть обусловлено как механической функцией цели [9], так и сопряженными механическими и тепловыми функциями [11] одновременно.

При моделировании элементов НЭМС необходимо учитывать зависимость упругих свойств конструкции от размера. В классической теории упругости не предусмотрен механизм учета размерно-зависимого поведения. Зависимость упругого поведения от размера может быть объяснена с использованием моделирования на основе молекулярной динамики (MD) или механики сплошной среды более высокого порядка. Хотя подход молекулярной динамики может обеспечить более точные приближения к реальным объектам, он слишком дорог с вычислительной точки зрения. Поэтому при моделировании мелкомасштабных структур интенсивней использовались подходы уточненных теорий упругости твердого тела. На настоящий момент известны следующие теории: градиентные теории, теория микроконтинуума и нелокальная теория. Градиентная теория упругости [12] описывает эффект зависимости упругих свойств от размера с помощью трех параметров, связанных с градиентами дилатации, девиатора тензора растяжения и тензора вращения. Теория микроконтинуума была разработана Эрингеном. Она состоит из микро-

полярной теории, теории микронапряжений и микроморфной теории. Микрополярная теория [13] является самой простой среди этих теорий, в то время как микроморфная теория является наименее общей. Более подробную информацию об этих теориях, а также их приложениях можно найти в [14, 15].

В нелокальной теории упругости напряжение в контрольной точке в континууме зависит от деформаций во всех точках тела, и, таким образом, размерный эффект учитывается с помощью разрешающих уравнений с использованием нелокального параметра. Нелокальная теория упругости изначально была сформулирована в интегральной форме и позже переформулирована в дифференциальной форме, которая рассматривает определенную функцию ядра интегрального уравнения. По сравнению с интегральной моделью дифференциальная широко используется дляnano структур благодаря своей простоте. Кроме того, недавно был предложен еще один класс теории высших порядков, который называется нелокальной теорией градиента деформаций, основанный на сочетании нелокальной теории упругости и теории градиента деформации. В работах [16, 17] более подробно описана эта теория. В работе [18] с помощью нелокальной теории рассмотрен подход к построению математических моделей термомеханических процессов в деформируемом теле с учетом эффектов временной и пространственной нелокальности сплошной среды.

В модифицированной моментной теории упругости (modified couple stress theory) за счет введенного дополнительного уравнения равновесия, приводящего к симметричности тензора моментов, присутствует только один размерный параметр длины материала, отвечающий за учет размерно-зависимого поведения [19]. Это изменение привело к большой популярности этой теории в научном мире. Модифицированная моментная теория применена для исследования нелинейной динамики чувствительного элемента НЭМС в работе [20]. В данной работе для построения математической модели nano балки была выбрана модифицированная моментная теория в связи с адекватным описанием размерно-зависимого поведения и незначительным изменением известных дифференциальных уравнений полноразмерной модели.

Модель Тимошенко [21], в отличие от модели Эйлера–Бернулли, учитывает деформацию сдвига и обладает большими возможностями для изучения поведения конструкций. В [22] рассмотрены КНМ nano балки с изменением свойств по толщине материала с нелинейностью типа Кармана. Для учета размерно-зависимого поведения использована модифицированная моментная теория. Выведены нелинейные уравнения движения для теории балок Тимошенко. Приведено исследование влияния скалярного параметра длины, закона изменения свойств балки по толщине, деформации сдвига и геометрической нелинейности на статические прогибы балки. Однако в этих работах не учитывалось смещение линии изгиба, что приводило к существенно более сложным уравнениям. В известной авторам литературе отсутствуют работы, посвященные исследованию моделей балок из мате-

риалов с переменными в двух направлениях (по толщине и длине) свойствами.

Как показывает обзор литературы, до настоящего времени микроструктура балочных элементов определялась без использования методов оптимизации, а задавалась конструктором.

В данной работе построена многошаговая методология оптимизации армирования балки с заданным материалом с целью увеличения ее сопротивления действующим нагрузкам. Идея методологии: на первом этапе для конкретных условий нагружения, начальных и граничных условий балки, находящейся в температурном поле, проводится топологическая оптимизация структуры армирования балки заданным композитом по критерию минимума податливости (максимума жесткости). В каждом из этих случаев оптимальная структура армирования является оригинальной для данных условий нагружения и закрепления. В результате балка с оптимальной микроструктурой приобретает неоднородность в двух направлениях: по толщине и по длине.

На втором этапе исследуется статическое и динамическое поведение балки, математическая модель которой построена на базе гипотез Тимошенко, модифицированной моментной теории с учетом геометрической нелинейности по Карману. Учет влияния температурного поля вводится на основе соотношений Дюамеля–Неймана. Температурное поле не задается произвольным образом, а определяется из решения двумерного уравнения теплопроводности как стационарного, так и нестационарного.

Постановка задачи

Формулировка методологии топологической оптимизации (1 этап)

Рассмотрим двумерную упругую область $\Omega = \left\{ x \in [0, a]; -\frac{h}{2} \leq z \leq \frac{h}{2} \right\}$, ограниченную замкнутой поверхностью $\Gamma = \Gamma_1 \cup \Gamma_2 \cup \Gamma_3$, находящуюся в плоском напряженном состоянии (рис. 1). На Γ_1 задано граничное условие различного вида, Γ_2 не закреплена и не нагружена. На границе Γ_3 действует вертикальная нагрузка F , направленная вниз. Предполагается, что материал линейно упругий и изотропный.

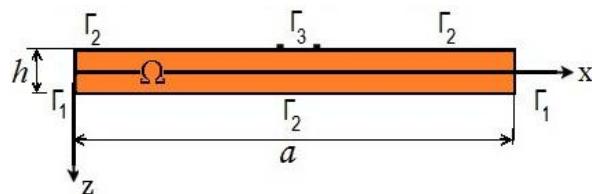


Рис. 1. Расчетная модель

Fig. 1. Calculation model

Область находится в постоянном температурном поле $T(\mathbf{x}), \mathbf{x} = \{x, z\}$. Обозначим $\theta = T(\mathbf{x}) - T_0$ – изменение температуры относительно начальной температуры T_0 , где T_0 – температура в исходном состоянии.

Для поля смещений (u_1, u_3) уравнение равновесия имеют вид

$$\sigma_{ij} = 0 \text{ в } \Omega, \quad (1)$$

где σ_{ij} – тензор напряжений. Связь линейных деформаций с перемещениями определяется по соотношениям

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}), \quad i, j = 1, 2. \quad (2)$$

Соотношение напряжение–деформация записывается по закону Дюамеля–Неймана

$$\sigma_{ij} = E(\mathbf{x}) (\varepsilon_{ij} - \alpha \theta \delta_{ij}), \quad (3)$$

где $E(\mathbf{x})$, $\alpha(\mathbf{x})$, $\theta(\mathbf{x})$ и δ_{ij} обозначают модуль упругости Юнга и температурный коэффициент линейного расширения неоднородного материала области Ω , разницу между текущей и исходной температурой области и символ Кронекера, соответственно. Поля смещений и температуры связаны через уравнения (1)–(3).

Целью топологической оптимизации является отыскание оптимального распределения материала, которое максимизирует жесткость или минимизирует податливость термоупругой области.

Проблема топологической оптимизации для задачи термоупругости может быть сформулирована как [23]

$$\min_{0 \leq r(\mathbf{x}) \leq 1} C = \iint_{\Omega} \beta \theta u_{i,i} d\Omega + \int_{\Gamma} F u_3 d\Gamma \quad (4)$$

при ограничении

$$\int_{\Omega} \rho(\mathbf{x}) d\Omega \leq A(\Omega) \gamma, \quad (5)$$

где $\beta(\mathbf{x}) = \alpha(\mathbf{x})E(\mathbf{x})$, $\rho(\mathbf{x})$ – плотность материала; γ – коэффициент использования базового материала.

Проектная переменная $r(\mathbf{x})$ связана с модулем Юнга $E(\mathbf{x})$, с $\beta(\mathbf{x})$ и с объемной плотностью материала $\rho(\mathbf{x})$ каждого элемента по следующим соотношениям (схема RAMP) [5]:

$$E(\mathbf{x}) = \frac{E_0 r(\mathbf{x})}{(1 + p \cdot (1 - r(\mathbf{x})))},$$

$$\beta(\mathbf{x}) = \frac{\alpha_0 E_0 r(\mathbf{x})}{(1 + q \cdot (1 - r(\mathbf{x})))},$$

$$\rho(\mathbf{x}) = \frac{\rho_0 r(\mathbf{x})}{(1 + p \cdot (1 - r(\mathbf{x})))}, \quad \mathbf{x} \in \Omega, \quad (6)$$

где p, q – параметры штрафа, используемые для обеспечения компактного распределения материала; $r(\mathbf{x})$ – поле проектных переменных $0 < r_0 \leq r(\mathbf{x}) \leq 1$; r_0 – малое число, которое гарантирует ненулевую жесткость конечных элементов. При $r(\mathbf{x})=1$ вся область полностью заполнена армирующим базовым материалом. После применения процедуры топологической оптимизации определяются значения модуля упругости $E(\mathbf{x})$, коэффициента $\beta(\mathbf{x})$ и объемной плотности материала $\rho(\mathbf{x})$ для оптимальной топологии микроструктуры.

Полученные значения $E(\mathbf{x})$, $\beta(\mathbf{x})$ и $\rho(\mathbf{x})$ далее использовались при построении математической модели неоднородной нанобалки Тимошенко.

Математическая модель гибких нанобалок на основе гипотез Тимошенко

Балка представляет собой область Ω пространства R^2 , соотнесенную к декартовой системе координат Oxz . Срединная линия задана при $z=0$, оси Ox и Oz направлены в соответствии с рис. 2. Таким образом, балка определяется как $\Omega = \left\{ x \in [0, a]; -\frac{h}{2} \leq z \leq \frac{h}{2} \right\}$, $0 \leq t \leq \infty$. На основании модифицированной моментной теории [22] запасенная энергия упругой деформации балки U с учетом ее размерно-зависимого поведения может быть записана как

$$U = \frac{1}{2} \iint_{\Omega} \left(\sigma_{xx} \varepsilon_{xx} + \sigma_{xz} \varepsilon_{xz} + m_{xy} \chi_{xy} \right) d\Omega, \quad (7)$$

где σ_{xx}, σ_{xz} – элементы симметричного тензора напряжений σ ; m_{xy} – элементы девиаторной части симметричного тензора момента высшего порядка m ; χ_{xy} – элементы тензора кривизны χ ; $\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{xz}$ – элементы симметричного тензора деформаций ε . Система координат, кинематические параметры и нагрузки для балки Тимошенко, смоделированной на основе модифицированной моментной теории, показаны на рис. 2. Нагрузка $f(x, t)$ связана с осевой массовой силой на единицу длины, $C(x, t)$ – распределенные моменты на единицу длины и $q(x, t)$ обозначает интенсивность распределенной поперечной силы на единицу длины. Считается, что свойства балки изменяются как вдоль осевой координаты Ox , так и в направлении ее толщины, оси Oz .

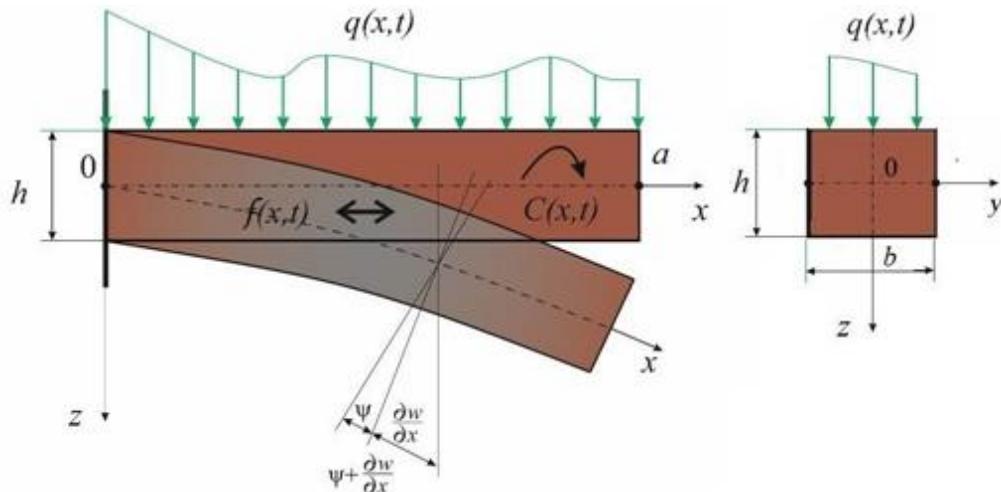


Рис. 2. Расчетная схема балки Тимошенко

Fig. 2. Design model of the Timoshenko beam

Поле смещений в произвольной точке микро балки Тимошенко записываются в виде

$$u_1 = u(x, t) - z\psi(x, t), \quad u_2 = 0, \quad u_3 = w(x, t), \quad (8)$$

где $u(x, t)$, $w(x, t)$ обозначают осевое смещение и поперечное отклонение точек срединной линии, то есть при $z = 0$; $\psi(x, t)$ – угол поворота нормали по отношению к недеформированному состоянию.

Используя нелинейные соотношения Кармана, для модели Тимошенко получим:

$$\varepsilon_{xx} = u_{,x} + \frac{1}{2} \left(w_{,x} \right)^2 + z\psi_{,x}, \quad \varepsilon_{xz} = \frac{1}{2} \left(\psi + w_{,x} \right). \quad (9)$$

Также из равенства $\phi_i = (\text{rot}(\mathbf{u}))_i/2$ можно записать

$$\phi_x = 0, \quad \phi_y = \frac{1}{2} \left(\psi - w_{,x} \right), \quad \phi_z = 0. \quad (10)$$

Отсюда получаем следующее выражение для единственного неравного нулю компонента симметричной части тензора кривизны:

$$\chi_{xy} = \chi_{yx} = \frac{1}{4} \left(\psi_{,x} - w_{,xx} \right). \quad (11)$$

Определяющие соотношения при наличии температурного поля для неравных нулю компонентов

симметричной части тензора напряжения и девиаторной части тензора момента высшего порядка имеют следующие выражения

$$\sigma_{xx} = E(x, z) (\varepsilon_{xx} - \alpha\theta), \quad \sigma_{xz} = k_s G(x, z) (w_{,x} + \psi), \\ m_{xy} = 2l^2 G(x, z) \chi_{xy}, \quad (12)$$

где $E(x, z)$ модуль Юнга оптимального распределения материала, полученный на этапе топологической оптимизации балки; $G(x, z) = E(x, z)/2(1 + \nu)$ – модуль сдвига; ν – коэффициент Пуассона, который принят постоянным; l – материальный параметр длины.

Из уравнений (7)–(12) записана энергия деформации U неоднородной микро балки как

$$U = \frac{1}{2} \iint_{0, A} \left(\sigma_{xx} \varepsilon_{xx} + \sigma_{xz} \varepsilon_{xz} + 2m_{xy} \chi_{xy} \right) dA dx = \\ = \frac{1}{2} \iint_{0, A} \left\{ E \left(u_{,x} + \frac{1}{2} \left(w_{,x} \right)^2 + z\psi_{,x} \right)^2 + \right. \\ \left. + k_s G \left(\psi + w_{,x} \right)^2 + \right. \\ \left. + \frac{1}{8} 2l^2 G \left(\psi_{,x} - w_{,xx} \right)^2 \right\} dA dx, \quad (13)$$

где $A=hb$ – площадь поперечного сечения балки. Кинетическая энергия балки K определяется выражением:

$$K = \frac{1}{2} \int_0^a \int_A \rho \left\{ (u_{,t} - z\psi_{,t})^2 + w_{,t}^2 \right\} dA dx = \\ = \frac{1}{2} \int_0^a \left\{ m_0 (u_{,t})^2 + 2Q u_{,t} \psi_{,t} + \tilde{I} (\psi_{,t})^2 + m_0 (w_{,t})^2 \right\} dx. \quad (14)$$

Внешняя работа, связанная с распределенными силами, распределенными моментами и усилиями на концах балки имеет вид

$$W = \int_0^a \left(G(x, t) u + q(x, t) w + C(x, t) \theta_2 \right) dx + \\ + \left. \left(\tilde{N} u + \tilde{V} w + \tilde{M}_\sigma \psi + \tilde{M}_M w_{,x} \right) \right|_{x=0}^{x=a}, \quad (15)$$

где \tilde{N} является осевой результирующей силой нормальных усилий $\sigma_{11}+N_0/A$; \tilde{V} обозначает поперечную результирующую поперечных усилий; M_σ \tilde{M}_σ – внешний изгибающий момент, вызываемый нормальными напряжениями σ_{11} ; M_M \tilde{M}_M – внешний изгибающий момент, вызываемый моментом m_{12} .

Внешняя работа, связанная с диссипацией энергии, имеет вид

$$W_\varepsilon = \varepsilon \int_0^a \left(\frac{\partial u}{\partial t} u + \frac{\partial w}{\partial t} w + \frac{\partial \psi}{\partial t} \psi \right) dx, \quad (16)$$

где ε – коэффициент диссипации.

Используем принцип Гамильтона

$$\delta \int_{t_1}^{t_2} (K - U + W) dt = 0. \quad (17)$$

Подставим в (17) выражения (13)–(16) проворачиваем по переменным u , w и ψ , интегрируем по частям и, наконец, приравнивая выражения перед δu , δw и $\delta \psi$ к нулю, мы получаем разрешающие уравнения движения, которые представляют собой систему нелинейных дифференциальных уравнений 8-го порядка в частных производных:

$$\left[k_1 \left(u_{,x} + \frac{1}{2} (w_{,x})^2 \right) \right]_{,x} + G = m_0 u_{,tt} + Q \psi_{,tt}, \\ \left[k_2 \psi_{,x} + k_4 (\psi_{,x} - w_{,xx}) \right]_{,x} - k_3 (\psi + w_{,x}) + \frac{C}{2} = \\ = Q u_{,tt} + \tilde{I} \psi_{,tt}, \\ \left\{ \left[k_1 \left(u_{,x} + \frac{1}{2} (w_{,x})^2 \right) \right] w_{,x} + k_3 (\psi + w_{,x}) \right\}_{,x} + \\ + \left[k_4 (\psi_{,x} - w_{,xx}) \right]_{,xx} - q + \frac{C_{,x}}{2} = m_0 w_{,tt}, \quad (18)$$

а также граничные условия:

$$\left[k_1 \left(u_{,x} + \frac{1}{2} (w_{,x})^2 \right) - \tilde{N} \right]_{x=0, a} = 0 \text{ или } \delta u|_{x=0, a} = 0,$$

$$\left[k_2 \psi_{,x} + k_4 (\psi_{,x} - w_{,xx}) - \tilde{M}_\sigma - \frac{\tilde{M}_m}{2} \right]_{x=0, a} = 0 \\ \text{или } \delta \psi|_{x=0, a} = 0, \\ \left\{ \begin{array}{l} \left[k_1 \left(u_{,x} + \frac{1}{2} (w_{,x})^2 \right) \right] w_{,x} + k_3 (\psi + w_{,x}) + \\ + k_4 (\psi_{,xx} - w_{,xxx}) + \frac{C}{2} - \tilde{V} \end{array} \right\}_{x=0, a} = 0 \\ \text{или } \delta w|_{x=0, a} = 0, \\ \left[k_4 (\psi_{,x} - w_{,xx}) + \frac{\tilde{M}_m}{2} \right]_{x=0, a} = 0 \text{ или } \delta w_{,x}|_{x=0, a} = 0, \quad (19)$$

где

$$k_1(x) = \int_A E(x, z) dA, k_2(x) = \int_A E(x, z) z^2 dA, \\ k_3(x) = k_s \int_A G(x, z) dA, k_4(x) = \frac{1}{4} \int_A G(x, z) l^2 dA, \\ m_0(x) = \int_A \rho(x, z) dA, Q(x) = \\ = \int_A \rho(x, z) z dA, \tilde{I}(x) = \int_A \rho(x, z) z^2 dA. \quad (20)$$

Начальные условия имеют вид:

$$w(x, 0) = \phi_1(x); w(x, 0)_{,t} = \phi_2(x); \\ u(x, 0) = \phi_3(x); u(x, 0)_{,t} = \phi_4(x); \\ \psi(x, 0) = \phi_5(x); \psi(x, 0)_{,t} = \phi_6(x). \quad (21)$$

Методы получения численного решения

На первом этапе при оптимизации топологии микроструктуры, задача (4)–(6), плоской области используется метод конечных элементов. Для этого область Ω разбивается на конечные элементы, и плотность материала $\rho(x)$ считается постоянной на каждом элементе. Оптимальная топология микроструктуры получена на основе решения плоской задачи термоупругости с использованием метода подвижных асимптот [24]. После получения оптимальных значений массивы значений модуля упругости, плотности (6) представляются в нелинейные дифференциальные уравнения в частных производных математической модели нанобалки Тимошенко.

Уравнения в частных производных с переменными коэффициентами, граничные и начальные условия (19)–(21) методом конечных разностей, с аппроксимацией $O(h^2)$ по пространственным переменным, приведены к задаче Коши. В свою очередь задача Коши решается методом Рунге–Кутта 4 порядка. Подбор оптимального шага в численных методов проводился с помощью принципа Рунге.

Результаты решения задач статики были получены с помощью динамических уравнений (19). Такой подход носит название метода установления или метода «тяжелого шарика». Метод установления имеет широкий диапазон применения. Этот подход позволяет решить нелинейные уравнения различного типа

(дифференциальные, алгебраические и др.) за счет линеаризации исходной задачи. Это происходит из-за добавления дифференциального оператора по времени. Метод обладает высокой точностью со скоростью сходимости. Кроме этого, если исходная стационарная задача имеет дифференциальный оператор высокого порядка, то за счет второй производной по времени происходит понижение порядка исходной задачи.

В случае если нагрузка q не зависит от времени, мы имеем возможность получить решение статической задачи на основе динамического подхода. Начальное условие играет роль возмущения в статической задаче, а член с первой производной по времени, содержащий коэффициент диссипации, является силой затухания возмущенного решения. Решение динамической задачи можно проводить любым методом решения задачи Коши. В процессе установления возмущенного решения мы приходим к решению статической задачи.

Пример использования методологии топологической оптимизации

Исследования проводились для двумерной области, размеры $a=40$ нм, $h=40$ нм, материал – сталь ($E_0=200$ МПа, $\alpha_0=12,3 \cdot 10^{-6}$ 1/К, $\rho_0=7800$ кг/м³, $\nu=0,3$). Нагрузка, сосредоточенная в центре, т. е. граница Γ_3 ,

Таблица 1. Микроструктуры оптимальных балок

Table 1. Microstructures of optimal beams

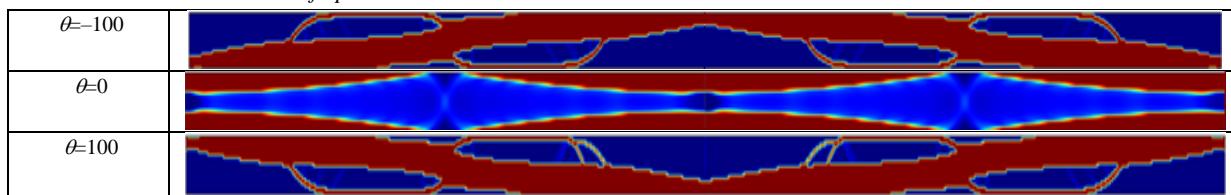
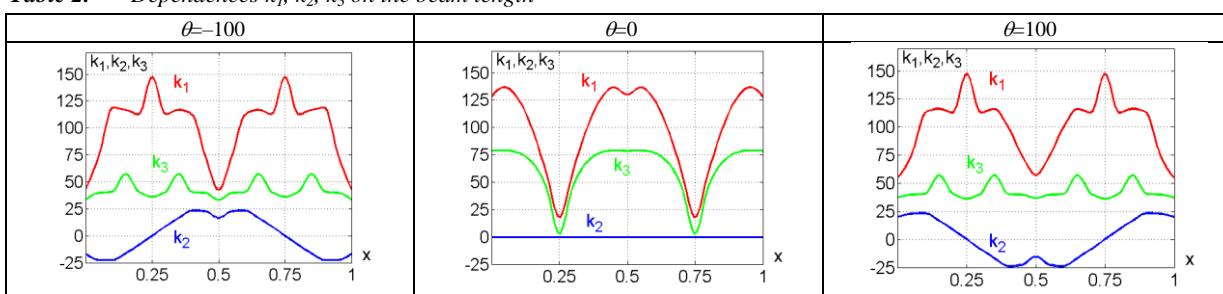


Таблица 2. Зависимости k_1 , k_2 , k_3 по длине балки

Table 2. Dependences k_1 , k_2 , k_3 on the beam length



Результаты решения статических задач

С помощью описанных выше методов было проведено исследование для четырех различных комбинаций параметров: 1 – без учета размерно-зависимого эффекта и однородная; 1* – без учета размерно-зависимого эффекта, но с учетом оптимизации; 2 – с учетом размерно-зависимого эффекта, однородная; 2* – с учетом размерно-зависимого эффекта, оптимальная.

Выигрыш, т. е. уменьшение максимального прогиба топологически оптимальной балки по сравнению с однородной, для $\theta=-100$ составляет при $q=500$ 12,5 % для задачи без учета размерно-зависимого поведения

представляет собой одну точку ($x=20$ нм), граничные условия:

$$u|_{x=0, a} = 0, \psi|_{x=0, a} = 0, w|_{x=0, a} = 0, w_{,x}|_{x=0, a} = 0,$$

начальные условия:

$$w(x, 0) = 0, w_{,t}(x, 0) = 0, u(x, 0) = 0,$$

$$u_{,t}(x, 0) = 0, \psi(x, 0) = 0, \psi_{,t}(x, 0) = 0.$$

Для численного исследования также приняты следующие упрощения: $f(x, t) = 0$, $C(x, t) = 0$. Численные результаты получены для задачи в безразмерных переменных. Безразмерные переменные вводились по формулам, приведенным в [25].

В табл. 1 приведена оптимальная топология распределения материала для нано балок, при действии температур $\theta = \pm 100, 0$. Здесь красный цвет обозначает армирующий базовый материал.

Используя полученную оптимальную микроструктуру балок, по соотношениям (20) были вычислены значения $k_1(x)$, $k_2(x)$, $k_3(x)$, которые являются переменными по длине балки. Графики этих величин приведены в табл. 2.

Полученные значения были использованы для исследования статических и динамических задач нелинейной балки модели Тимошенко.

и 10,1 % для задачи с учетом размерно-зависимого поведения. Для $\theta=+100$ выигрыш составляет при $q=500$ 12,3 % для задачи без учета размерно-зависимого поведения и 10,5 % для задачи с учетом размерно-зависимого поведения. При отсутствии теплового поля выигрыши составляют 13,4 и 11,1 % соответственно. На рис. 3 приведен график нагрузка прогиб $q(w)$ для нелинейной задачи при $\theta=0$. Анализ результатов показал, что для используемых значений коэффициентов и результатов оптимизации графики $q(w)$ для оптимальной и неоптимальной задач как без учета размерно-зависимого поведения, так и с учетом

размерно-зависимого поведения существенно отличны при больших прогибах.

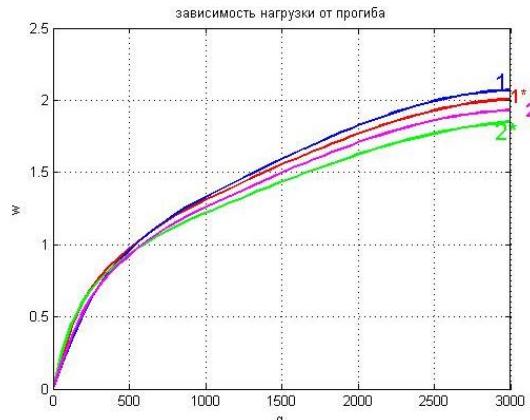


Рис. 3. Зависимость нагрузка–прогиб $q(w)$ для $\theta=0$
 Fig. 3. Load-deflection dependence $q(w)$ for $\theta=0$

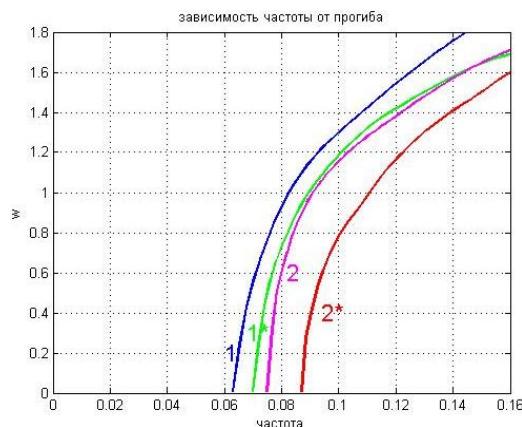


Рис. 4. График частота–прогиб $\omega(w)$ для $\theta=0$
 Fig. 4. Frequency-deflection graph $\omega(w)$ for $\theta=0$

Как и для значений прогиба имеется выигрыш от оптимизации для значений собственных частот для размерно-зависимой задачи и для задачи без учета размерно-зависимого поведения. Для температуры $\theta=100$ разница между значениями частот для однородной и неоднородной (оптимальной) балок, при значении прогиба 0,00001, без учета размерно-зависимого поведения составляет 8,7 %. Для балок с учетом размерно-зависимого поведения 11,76 %. Для прогиба, равного 1, без учета размерно-зависимого поведения разница составляет 9,9 %, 12,15 % – с учетом размерно-зависимого поведения.

Для температуры $\theta=100$ при прогибе 0,00001 разница между результатами оптимальной и неоптимальной балок составляет 7,4 и 5,1 % соответственно и для прогиба, равного 1, разница составляет 4,4 и 4,47 %. При $\theta=0$ для прогиба 0,00001 разница между результатами оптимальной и неоптимальной балок составляет 10,5 и 13,1 %, для прогиба, равного 1, разница равна 11,4 и 19,2 %. Таким образом, зависимость частота–прогиб $\omega(w)$ для всех случаев ($\theta=100$, $\theta=0$, $\theta=100$) демонстрируют отличие результатов для оптимальной и однородной балок.

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что разработанный авторами алгоритм и программа оптимизации позволяют получать конструкции с оптимальными свойствами как с учетом размерно-зависимого поведения, так и без учета размерно-зависимого поведения.

Исследование нелинейной динамики

Для исследования влияния оптимальной топологии балки на нелинейную динамику использовались основные характеристики: спектр Фурье, вейвлет спектр, построенный на базе материнского вейвлета Морле, сечение Пуанкаре, фазовый портрет и значение старшего показателя Ляпунова. Результаты получены при действии знакопеременной поперечной нагрузки $q=q_0\sin(\omega_p t)$. Коэффициент диссипации взят в виде $\varepsilon=1$. Частота возбуждения $\omega_p=9$, амплитуда внешней нагрузки $q_0=14000$. Исследование старших показателей Ляпунова – скорости расходимости траекторий в фазовом пространстве, проводились для выяснения степени хаотизации колебаний. Если старший показатель Ляпунова положителен, колебания хаотические, при стремлении его к нулю колебания становятся квазигармоническими, отрицательный показатель Ляпунова – гармонические колебания. Для проверки достоверности получаемых значений старших показателей Ляпунова использовались три метода, основанные на разных алгоритмах. Метод Wolf [25] рассчитывает старший показатель Ляпунова на основе слежения за долгосрочными темпами роста элементов малого объема в аттракторе. Метод Rosenstein [26] показатель Ляпунова вычисляет как угол наклона наиболее линейного участка функции разностей расстояний между траекториями. Алгоритм Kantz [27] рассчитывает старший показатель Ляпунова путем поиска всех соседей в окрестности опорной траектории и высчитывает среднюю дистанцию между соседями и опорной траекторией как функцию от времени (или относительное время, умноженное на частоту выборки данных).

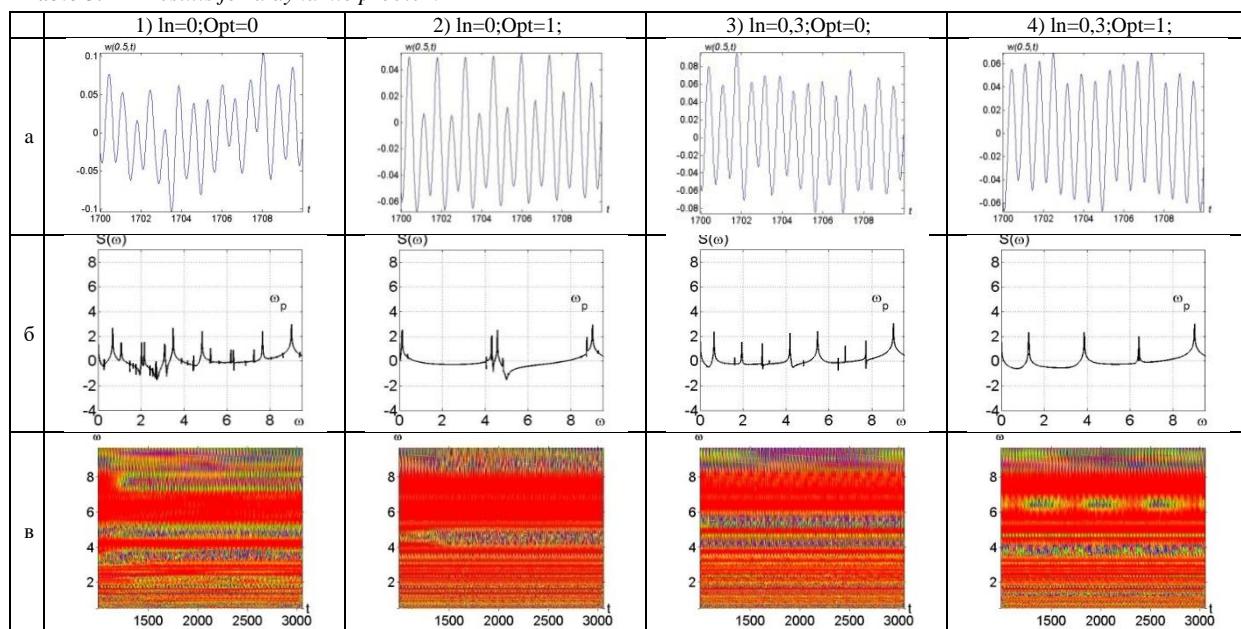
В табл. 3 приведены результаты нелинейной динамики для нано балок. Без учета размерно-зависимого поведения ($\ln=0$): неоптимальная балка ($\text{Opt}=0$) (случай 1) и оптимальная балка ($\text{Opt}=1$) (случай 2), а также с учетом размерно-зависимого поведения ($\ln=0,3$): неоптимальная балка ($\text{Opt}=0$) (случай 3) и оптимальная балка ($\text{Opt}=1$) (случай 4). Рассмотрены следующие характеристики: а) сигнал $w(0,5;t)$; б) спектр Фурье, построенный на основании быстрого преобразования Фурье $S(w)$; в) 2D вейвлет-спектр $w[w(t)]$.

Для случая 1 ($\ln=0$, неоптимальная) спектр частот (1б) содержит семь основных частот $\omega_1=0,91$, $\omega_2=1,12$, $\omega_3=2,17$, $\omega_4=3,47$, $\omega_5=3,71$, $\omega_6=4,76$, $\omega_7=7,96$. Между частотами имеются следующие соотношения: $\omega_p-\omega_1=\omega_6-\omega_5=\omega_3-\omega_2=1,04$, $\omega_2-\omega_1=\omega_5-\omega_4=0,23$, $\omega_7-\omega_6=2(\omega_4+\omega_3)$. Таким образом, все частоты зависимы.

Для случая 2 ($\ln=0$, оптимальная) спектр Фурье содержит следующие основные частоты $\omega_1=0,26$, $\omega_2=4,24$. Связь между частотами $\omega_p=2(\omega_1+\omega_2)$.

Таблица 3. Результаты для динамической задачи

Table 3. Results for a dynamic problem



Для случая 3 ($ln=0$, неоптимальная) спектр частот (2б) содержит шесть основных частот с $\omega_1=0,42$, $\omega_2=2,05$, $\omega_3=2,62$, $\omega_4=4,1$, $\omega_5=5,21$, $\omega_6=7,87$. Между этими частотами выполняется соотношение $\omega_p=\omega_7+\omega_2$, $\omega_p=\omega_4+\omega_3+\omega_2+\omega_1$.

Для случая 4 ($ln=0,3$, оптимальная) спектр частот (2б) содержит три основные частоты $\omega_1=1,32$, $\omega_2=3,91$, $\omega_3=6,44$. Между этими частотами выполняется соотношение $\omega_2-\omega_1=\omega_3-\omega_2=2,52$.

Сравнение результатов однородной и оптимальной балок показывает, что динамические характеристики существенно отличаются, как для балок с учетомnano размера, так и без его учета. При этом частотный характер колебаний существенно меняется, что отчетливо видно на графиках Фурье и вейвлет спектров – количество частот существенно уменьшается. Старшие показатели Ляпунова, вычисленные по трем методам: Wolf, Kantza и Rosenstein, показывают, что для всех четырех случаев присутствует хаотизация колебаний – старший показатель Ляпунова положителен. Однако для оптимальных балок старшие показатели Ляпунова по трем методам близки к нулю, что говорит о стремлении системы к гармоническим колебаниям. В случае неоптимальных балок старшие показатели Ляпунова положительны и существенно отличны от нуля.

Таким образом, построение оптимально микроструктуры nano балки позволяет изменить динамические режимы при заданных граничных условиях и типе нагрузки. В свою очередь это позволит продлить срок службы элементов НЭМС.

Заключение

Проведен сравнительный анализ нелинейной динамики однородных балок и неоднородных балок с оптимальным распределением материала по толщине

и длине. Построена методология получения оптимальной микроструктуры nano балки на основе топологической оптимизации по критерию минимума податливости (максимума жесткости). Построена математическая модель балки на основе кинематических гипотез Тимошенко и на базе модифицированной моментной теории, с учетом геометрической нелинейности по Карману и воздействия теплового поля по закону Дюамеля–Неймана. Модель описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных с переменными коэффициентами. Переменные коэффициенты используются при моделировании балки с оптимальной топологией. В случае однородной (неоптимальной) балки коэффициенты постоянны по величине.

Проведено сравнение статических и динамических результатов оптимальных и однородных балок для различных значений масштабного параметра длины материала и температуры. Численное исследование показало, что прогиб балки с оптимальной микроструктурой меньше, чем для неоптимальной (однородной), причем выигрыш составляет около 12 % для полноразмерных балок и около 10 % для nano балок. Собственные частоты колебаний оптимальных балок отличаются от неоптимальных в среднем на 16 и 13 % соответственно. Таким образом, при использовании топологической оптимизации был создана балка с новыми улучшенными свойствами. Применение этого алгоритма при создании элементов nano-электромеханических систем для нефтегазодобывающей техники позволит создавать приборы с большим сроком службы, приспособленные к более тяжелым условиям эксплуатации.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 16-11-10138-П.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кишов Е.А., Комаров В.А. Топологическая оптимизация силовых конструкций методом выпуклой линеаризации // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2018. – Т. 17. – № 1. – С. 137–149.
2. Товстик П.Е., Товстик Т.П. Уравнения равновесия сильно неоднородной по толщине пологой оболочки // Доклады Академии наук. – 2017. – Т. 477. – № 3. – С. 295–299.
3. Ватулын А.О., Плотников Д.К., Поддубный А.А. О некоторых моделях индентирования функционально градиентных покрытий // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Математика. Механика. Информатика. – 2018. – Т. 18. – № 4. – С. 421–432.
4. Моисеенко И.А. Распространение нормальных волн вдоль трансверсально изотропных функционально градиентных цилиндров // Вестник Донецкого национального университета. Серия А: Естественные науки. – 2018. – № 1. – С. 37–54.
5. Barroqueiro B., Andrade-Campos A., Valente R.A.F. Designing self supported SLM structures via topology optimization // Journal of Manufacturing and Materials Processing. – 2019. – V. 3 (3). URL: <https://doi.org/10.3390/jmmp3030068> (дата обращения 12.02.2020).
6. Павлов С.П., Бодягина К.С., Крысько В.А. К вопросу об оптимизации формы геологических выработок и топологии их укрепления // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 1. – С. 6–13.
7. Xie Y., Steven G. A simple evolutionary procedure for structural optimization // Computers and Structures. – 1993. – № 49. – P. 885–896.
8. Allaire G., Jouve F., Toader A. Structural optimization using sensitivity analysis and a level-set method // Journal of Computational Physics. – 2004. – № 194. – P. 363–393.
9. Li Q., Steven G., Xie Y. Thermoelastic topology optimization for problems with varying temperature fields // Journal of Thermal Stresses. – 2001. – № 24. – P. 347–366.
10. Rodrigues H., Fernandes P. A material based model for topology optimization of thermoelastic structures // International Journal of Numerical Methods in Engineering. – 1995. – № 38 (12). – P. 1951–1965.
11. Cho S., Choi J. Efficient topology optimization of thermoelasticity problems using coupled field adjoint sensitivity analysis method // Finite Elements in Analysis and Design. – 2005. – № 41 (15). – P. 481–495.
12. Короленко В.А. Решение задачи об изгибе балки с трещиной в рамках градиентной теории упругости // Гагаринские чтения-2019. Сборник тезисов докладов XLV Международной молодежной научной конференции. – М., 2019. – С. 961–962.
13. Altenbach H., Eremeyev V.A. Strain rate tensors and constitutive equations of inelastic micropolar materials // International Journal of Plasticity. – 2014. – № 63. – P. 3–17.
14. Chen Y., Lee J. D. Determining material constants in micromorphic theory through phonon dispersion relations // International Journal of Engineering Science. – 2003. – № 41. – P. 871–886.
15. Micromorphic prism element / R. Ansari, M. Bazdidi-Vahdati, A. Shakouri, A. Norouzzadeh, H. Rouhi // Mathematics and Mechanics of Solids. – 2016. – DOI: 10.1177/1081286516637115.
16. Фу Ч., Ян С. Анализ изгиба балки Тимошенко с трещиной с использованием нелокальной градиентной теории упругости // Прикладная механика и техническая физика. – 2019. – Т. 60. – № 3 (355). – С. 196–206.
17. Васильев В.В., Лурье С.А. О корректных нелокальных обобщенных теориях упругости // Физическая мезомеханика. – 2016. – Т. 19. – № 1. – С. 47–59.
18. Кувыркин Г.Н., Савельева И.Ю. Термомеханическая модель нелокального деформирования твердого тела // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. – 2016. – № 3. – С. 20–27.
19. Couple stress based strain gradient theory for elasticity / F. Yang, A.C.M. Chong, D.C.C. Lam, P. Tong // International Journal of Solids and Structures. – 2002. – № 39. – Р. 2731–2743.
20. Барулина М.А., Папкова И.В., Крысько А.В. Динамика круглого чувствительного элемента наноэлектромеханического датчика // Юбилейная XXV Санкт-Петербургская Международная конференция по интегрированным навигационным системам. Сборник материалов / Гл. ред. В.Г. Пешехонов. – СПб., 2018. – С. 216–219.
21. Тимошенко С.П., Войновский-Кригер С. Пластины и оболочки. – М.: Наука, 1966. – 636 с.
22. Павлов С.П., Жигалов М.В. Новая размерно-зависимая модель для нелинейных конструктивно неоднородных балок Тимошенко // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ. – 2015. – № 1 (71). – С. 92–95.
23. Оптимизация армирования элементов микромеханических приборов для геологических изысканий / С.П. Павлов, Н.В. Бекренев, И.В. Злобина, К.С. Бодягина // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 3. – С. 44–52.
24. Колесников В.Л., Бракович А.И. Вероятностные модели с подвижными асимптотами для оптимизации систем с последовательно-параллельным соединением элементов // Труды БГТУ. Серия 3: Физико-математические науки и информатика. – 2018. – № 2 (212). – С. 101–106.
25. Nonlinear behaviour of different flexible size-dependent beams models based on the modified couple stress theory. Part 2. Chaotic dynamics of flexible beams / A.V. Krysko, J. Awrejcewicz, M.V. Zhigalov, S.P. Pavlov, V.A. Krysko // International Journal of Non-Linear Mechanics. – 2017. – № 93. – Р. 106–121.
26. Крысько В.А. мл., Мицкевич С.А. Хаотические колебания размернозависимой гибкой нанооболочки // Компьютерные науки и информационные технологии Материалы Международной научной конференции. – Саратов: ИЦ «Наука», 2018. – С. 205–208.
27. Хаотические колебания геометрически нелинейных наноразмерных пологих осесимметричных оболочек / В.А. Крысько мл., А.В. Кириченко, И.В. Папкова, И.Е. Кутепов // Проблемы прочности и пластичности. – 2018. – Т. 80. – № 4. – С. 446–455.

Поступила 16.06.2020 г.

Информация об авторах

- Павлов С.П.**, доктор физико-математических наук, профессор кафедры математики и моделирования, Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.
- Жигалов М.В.**, доктор физико-математических наук, профессор кафедры математики и моделирования, Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.
- Захарова А.А.**, доктор технических наук, профессор кафедры информатики и программного обеспечения Брянского государственного технического университета.
- Крысько В.А.**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой математики и моделирования, Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.

UDC 539.3

NONLINEAR DYNAMICS OF TOPOLOGICALLY OPTIMAL TIMOSHENKO NANOB EAM BASED ON THE COUPLE STRESS THEORY

Sergey P. Pavlov¹,
pspsar@yandex.ru

Maksim V. Zhigalov¹,
zhigalovm@yandex.ru

Alena A. Zakhарова²,
zaa@tu-bryansk.ru

Vadim A. Krysko¹,
tak@san.ru

¹ Yuri Gagarin Saratov State Technical University,
77, Politekhnicheskaya street, Saratov, 410054, Russia.

² Bryansk State Technical University,
7, blvd. 50 let Octyabrya, Bryansk, 241035, Russia.

The relevance of research. Technological sensors (sensors of load, pressure, liquid temperature, solution yield, liquid density) are used for monitoring data of technical operations of well drilling, various types repair of well, exploration drilling in the oil and gas industry on drilling and repair of all types of wells. Modern sensors are small in size and manufactured on the basis of nanoelectromechanical systems to increase sensitivity. They include constituent elements, nano beams and nano plates. These elements operate at high temperatures and are subjected to mechanical loads of various kinds. Increasing the strength of these elements is undoubtedly an urgent task.

The main aim of the research is to build a mathematical model on the basis of Timoshenko kinematic hypothesis and the modified couple stress theory of a sensing element in the form of a beam, a nano-electro-mechanical sensor under the action of mechanical and thermal fields; to develop methodology for obtaining the optimal topology of nano beams for arbitrary static and dynamic loads and different boundary conditions in order to increase its rigidity; to conduct a comparative analysis of the statics and nonlinear dynamics of optimal and nonoptimal beams.

Objects: element of nanoelectromechanical systems in the form of a beam taking into account the optimal microstructure.

Methods: methods of topological optimization, variational methods, second order finite difference method, Runge–Kutta type methods, Fourier and wavelet analysis, phase portrait and Poincare section.

Results. A methodology for obtaining the optimal microstructure of the nano beam based on topological optimization is developed. On the basis of the Hamilton–Ostrogradsky principle, a mathematical model of a Timoshenko nano beam inhomogeneous in two directions (in thickness and length) is constructed on the basis of a modified moment theory. A comparative analysis of static bending and nonlinear dynamics was performed for optimal and non-optimal nano beams.

Key words:

Timoshenko nanobeam, nanoelectromechanical systems, temperature and force fields, modified couple stress theory of elasticity, finite difference method, Runge–Kutta type methods, topological optimization, nonlinear dynamics.

The research was financially supported by the grant RNF no. 16-11-10138-II.

REFERENCES

1. Kishov E.A., Komarov V.A. Topological optimization of power structures by convex linearization. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*, 2018, vol. 17, no. 1, pp. 137–149. In Rus.
2. Tovstik P.E., Tovstik T.P. The equation of equilibrium of strongly non-uniform thickness shells. *Doklady Akademii nauk*, 2017, vol. 477, no. 3, pp. 295–299. In Rus.
3. Vatulyan A.O., Plotnikov D.K., Poddubny A.A. On some models of functional gradient coatings indentation. *Izvestiya of Saratov University. New Series. Series: Mathematics. Mechanics. Informatics*, 2018, vol. 18, no. 4, pp. 421–432. In Rus.
4. Moiseenko I.A. Propagation of normal waves along a transversely isotropic functionally graded cylinders. *Vestnik Doneckogo naciona'l'nogo universitetu. Seriya A: Estestvennye nauki*, 2018, no. 1, pp. 37–54. In Rus.
5. Barroqueiro B., Andrade-Campos A., Valente R.A.F. Designing self supported SLM structures via topology optimization. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2019, no. 3 (3). Available at: <https://doi.org/10.3390/jmmp3030068> (accessed 12 February 2020).
6. Pavlov S.P., Bodyagina K.S., Krysko V.A. To the question of optimization of the form of geological workings and topology of their strengthening]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 1, pp. 6–13. In Rus.
7. Xie Y., Steven G. A simple evolutionary procedure for structural optimization. *Computers and Structures*, 1993, no. 49, pp. 885–896.
8. Allaire G., Jouve F., Toader A. Structural optimization using sensitivity analysis and a level-set method. *Journal of Computational Physics*, 2004, no. 194, pp. 363–393.
9. Li Q., Steven G., Xie Y. Thermoelastic topology optimization for problems with varying temperature fields. *Journal of Thermal Stresses*, 2001, no. 24, pp. 347–366.
10. Rodrigues H., Fernandes P. A material based model for topology optimization of thermoelastic structures. *International Journal of Numerical Methods in Engineering*, 1995, no. 38 (12), pp. 1951–1965.
11. Cho S., Choi J. Efficient topology optimization of thermoelasticity problems using coupled field adjoint sensitivity analysis method. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2005, no. 41 (15), pp. 1481–1495.
12. Korolenko V.A. Reshenie zadachi ob izgibie balki s treshchinoy v ramkakh gradientnoy teorii uprugosti [Solution of the problem of

- bending a beam with a crack in the framework of the gradient theory of elasticity]. *Gagarinskie chteniya-2019. Sbornik tezisov dokladov XLV Mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchnoy konferentsii* [Gagarin's readings-2019. Collection of abstracts of the XLV International youth scientific conference]. Moscow, 2019. pp. 961–962.
13. Altenbach H., Eremeyev V.A. Strain rate tensors and constitutive equations of inelastic micropolar materials. *International Journal of Plasticity*, 2014, no. 63, pp. 3–17.
 14. Chen Y., Lee J.D. Determining material constants in micromorphic theory through phonon dispersion relations. *International Journal of Engineering Science*, 2003, no. 41, pp. 871–886.
 15. Ansari R., Bazdidi-Vahdati M., Shakouri A., Norouzzadeh A., Rouhi H. Micromorphic prism element. *Mathematics and Mechanics of Solids*, 2016. DOI: 10.1177/1081286516637115.
 16. Fu Ch., Yan S. Analysis of the bending of a Timoshenko beam with a crack using the nonlocal gradient elasticity theory. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2019, vol. 60, no. 3 (355), pp. 196–206. In Rus.
 17. Vasil'ev V.V., Lur'e S.A. The correct generalized nonlocal theories of elasticity. *Physical Mesomechanics journal*, 2016, vol. 19, no. 1, pp. 47–59. In Rus.
 18. Kuvyrkin G.N., Savel'eva I.Yu. Thermomechanical model of nonlocal deformation of a solid body. *Mechanics of Solids*, 2016, no. 3, pp. 20–27. In Rus.
 19. Yang F., Chong A.C.M., Lam D.C.C., Tong P. Couple stress based strain gradient theory for elasticity. *International Journal of Solids and Structures*, 2002, no. 39, pp. 2731–2743.
 20. Barulina M.A., Papkova I.V., Krysko A.V. Dinamika kruglogo chuvstvitelnogo elementa nanoelektromekhanicheskogo datchika [Dynamics of the round sensing element of the nanoelectromechanical sensor]. *Yubileynaya XXV Sankt-Peterburgskaya Mezhdunarodnaya konferentsiya po integrirovannym navigatsionnym sistemam. Sbornik materialov* [Anniversary XXV St. Petersburg international conference on integrated navigation systems. Collection of materials]. St-Petersburg, 2018. pp. 216–219.
 21. Timoshenko S.P., Voynovskiy-Kriger S. *Plastiny i obolochki* [Plates and shells]. Moscow, Nauka Publ., 1966. 636 p.
 22. Pavlov S.P., Zhigalov M.V. Novaya razmerno-zavisimaya model dlya nelineynykh konstruktivno neodnorodnykh balok Timoshenko [A new size-dependent model for nonlinear structurally inhomogeneous Timoshenko beams]. *Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiyah – MMTT*, 2015, no. 1 (71), pp. 92–95.
 23. Pavlov S.P., Bekrenev N.V., Zlobina I.V., Bodyagina K.S. Optimization of reinforcement of elements of micromechanical devices for geological surveys. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 3, pp. 44–52. In Rus.
 24. Kolesnikov V.L., Brakovich A.I. Probabilistic models with movable asymptotes for optimization of systems with series-parallel connection of elements. *Proceedings of BSTU. Physics and Mathematics. Informatics*, 2018, no. 2 (212), pp. 101–106. In Rus.
 25. Krysko A.V., Awrejcewicz J., Zhigalov M.V., Pavlov S.P., Krysko V.A. Nonlinear behaviour of different flexible size-dependent beams models based on the modified couple stress theory. Part 2. Chaotic dynamics of flexible beams. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 2017, no. 93, pp. 106–121.
 26. Krysko V.A. Jr., Mickevich S.A. Khaoticheskie kolebaniya razmerno-zavisimoy gibkoy nanoobolochki [Chaotic oscillations of the dimension dependent flexible nanoshell]. *Kompyuternye nauki i informatsionnye tekhnologii. Materialy Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii* [Computer science and information technology Materials of the International scientific conference]. Saratov, Nauka Publ., 2018. pp. 205–208.
 27. Krysko V.A. Jr., Kirichenko A.V., Papkova I.V., Kutepov I.E. Chaotic oscillations of geometrically nonlinear nanoscale sloping axisymmetric shells. *Problemy prochnosti i plastichnosti*, 2018, vol. 80, no. 4, pp. 446–455. In Rus.

Received: 16 June 2020.

Information about the authors

Sergey P. Pavlov, Dr. Sc., professor, Yuri Gagarin Saratov State Technical University.

Maksim V. Zhigalov, Dr. Sc., professor, Yuri Gagarin Saratov State Technical University.

Alena A. Zakhарова, Dr. Sc., professor, Bryansk State Technical University.

Vadim A. Krysko, Dr. Sc., professor, head of the Mathematics and Modeling Department, Yuri Gagarin Saratov State Technical University.

УДК 624.131.1:528.7

СХОДИМОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИСТАНЦИОННОГО МЕТОДА ДЕШИФРИРОВАНИЯ С ПОЛЕВЫМИ РАБОТАМИ НА ЛИНЕЙНОМ ОБЪЕКТЕ. НА ПРИМЕРЕ ОПОЛЗНЕВОГО УЧАСТКА

Баборыкин Максим Юрьевич,
mybaborykin@rntc.ru

ООО «НК «Роснефть» – НТЦ»,
Россия, 350000, г. Краснодар, ул. Красная, 54.

Рассматривается технология воздушного лазерного сканирования, применяемая для изучения топографии, геоморфологии и картирования опасных геологических процессов с описанием, требуемым в нормативных документах, а также сопоставление данных дистанционного метода прогнозного определения зеркала скольжения с геофизическими и геологическими методами исследований.

Цель: проведение работ для получения положительной статистики применения метода дешифрирования материалов воздушного лазерного сканирования совмещенного с цифровой аэрофотосъёмкой для изучения оползней; сопоставление прогнозных данных зеркала скольжения с классическими геологическими и геофизическими исследованиями оползневого участка и, как следствие, выявление надежности применения метода дешифрирования материалов воздушного лазерного сканирования.

Объект: участок склона проектного проложения магистрального трубопровода. Предмет исследования – гравитационные геологические процессы, их форма, состояние и активность.

Методы: метод дешифрирования материалов воздушного лазерного сканирования с выделением оползней по прямым признакам. Так как лазерное сканирование местности позволяет получать массив точек лазерных отражений от поверхности грунта при наличии растительности, выделение оползней по прямым признакам позволяет установить их границы и текучестурные особенности. Применялись традиционные методы исследований, геодезическая съёмка местности, бурение скважин, геофизические исследования и т. д.

Результаты. Сопоставление дистанционного метода и полевых изысканий показало достаточно высокую сходимость по выявлению оползней (границ тел и их внешнего облика). Определение предполагаемого зеркала скольжения оползня по его внешнему облику для дополнительной оценки также показывает сходимость результатов достаточную для оценки при выборе конкурентных направлений. Мировой опыт, накопленный в области применения аэрометодов в съемках, показывает их исключительную эффективность. Таким образом, метод эффективен для принятия проектных решений перед полевыми исследованиями, а также исключает возможность недоизученности территории непосредственно перед началом полевых исследований.

Ключевые слова:

Рельеф, опасные геологические процессы, дешифрирование, изучение оползней, инженерно-геологическое картирование, воздушное лазерное сканирование, геофизические методы исследований, магистральный трубопровод.

Введение

Практически любое строительство начинается с изучения природных условий, влияющих и определяющих размещение проектируемых сооружений, а также их эксплуатацию. В зависимости от назначения проектируемого сооружения оценка его природной обстановки проводится по факторам, составляющим инженерно-геологические условия, которые определяют решение инженерной задачи. Одним из главных факторов инженерно-геологических условий является рельеф – то есть его морфометрические и морфографические данные в сочетании с его развитием [1].

Рельеф представляет собой результат сложного взаимодействия эндогенных и экзогенных сил и выполняет роль контактной поверхности между литосферой, с одной стороны, и атмосферой, гидросферой, криосферой – с другой [1].

Эндогенные силы, проявляющиеся главным образом в форме тектонических движений, приводят к образованию наиболее крупных форм рельефа – гор, равнин, межгорных котловин и др.

Экзогенные проявления в процессах выветривания, денудации и аккумуляции приводят, с одной стороны, к более дробному расчленению форм рельефа, созда-

емых тектоническими движениями, а с другой – к образованию новых, аккумулятивных форм рельефа.

На всех этапах инженерно-геологических исследований, начиная со съёмок мелкого и среднего масштаба и заканчивая изысканиями под конкретные инженерные объекты, большое внимание уделяется изучению геологических процессов, главным образом экзогенных и, в известной форме, эндогенных – землетрясений (точнее их проявлений). Экзогенные геологические процессы развиваются в результате сложного взаимодействия большого числа природных факторов. Важными факторами, определяющими возникновение и контролирующими развитие геологических процессов, являются рельеф, климат, геологическое строение территории, направление и интенсивность современных тектонических движений, степень сейсмической активности территории.

Дешифрирование материалов воздушного лазерного сканирования для изучения инженерно-геологических и гидрологических условий

Инженерно-геологические изыскания включают в себя дешифрирование аэрокосмических материалов и аэрофотоснимков [2]. Данные, полученные при про-

ведении съёмки LiDAR, являются одним из видов аэро-материалов.

Согласно СП 11-105-97, ч. I, работы по проведению дешифрирования материалов аэросъёмки предусматриваются при изучении и проведении оценки инженерно-геологических условий территорий, отведенных под проекты линейных сооружений с большой протяжённостью и площадных объектов значительных по площади, а также, на объектах, на которых необходимо проводить изучение динамики изменения природной и природно-технической систем [3].

Под дешифрированием материалов воздушного лазерного сканирования (ВЛС) понимается получение информации о геологических условиях изучаемой территории путем их выявления и распознавания на цифровых моделях рельефа (ЦМР), построенного из массива точек лазерных отражений (ТЛО), класс «земля». Совмещение ЦМР с другими классами ТЛО (травяная растительность, кустарниковая растительность, древесная растительность и т. д.) и аэрофотоснимков в каналах RGB (R – красный, G – зелёный, B – синий) с ортотрансформацией дает полную модель местности для дистанционного обследования изучаемой территории. Также для повышения информативности модели могут быть включены космо-, спектрально-зональные, гиперспектральные аэрофотоснимки и данные аэрогеофизических методов [4].

Дешифрирование материалов ВЛС для изучения инженерно-геологических условий на участке исследования включало в себя [5]:

- сбор исходных данных (топографические карты, физико-географическое описание района) при необходимости;
- проведение съёмки LiDAR по треку сканирования с выбором высоты и скорости полета летательного аппарата для наилучшего сканирования;
- классификацию точек лазерных отражений, ортотрансформацию аэрофотоснимков, построение карт интенсивности отражений;
- построение ЦМР;
- проведение ортотрансформации цифровой аэрофотосъёмкой (ЦАФС);
- загрузку подготовленных ЦМР и ортотрансформированных ЦМР в географическую информационную систему (ГИС);
- распознавание очертаний экзогенных геологических процессов, проявленных в рельефе, и линеаментов по типичным элементам, составляющим очертания геологических процессов и образованных геологических тел (оползни, конусы выноса, осыпи и т. д.), для построения контурных карт экзогенных геологических процессов [6];
- построение тематических карт (уклонов, градиентов уклонов, текстуры поверхности, выпуклости и вогнутости склонов и т. д.); совмещение полученных карт в ГИС с цифровой моделью рельефа для проведения дешифрирования материалов ВЛС для изучения экзогенных геологических процессов с определением качественных и количественных характеристик, линеаментов и геологических

структур; проведение расчета вероятности появления склоновых процессов;

- создание векторных слоев и баз данных в ГИС;
- составление предварительных карт инженерно-геологических условий, карты экзогенных геологических процессов, контурных карт экзогенных геологических процессов и линеаментов;
- присвоение класса (опасный геологический процесс) к выявленным экзогенным геологическим процессам по отношению к будущему сооружению [7–10].

Алгоритм проведения дешифрирования материалов ВЛС, представленный на рис. 1, позволяет получить качественные и количественные характеристики выявленных опасных геологических процессов, морфометрические характеристики рельефа, а также экзогенных геологических процессов и проявленных на поверхности земли эндогенных геологических процессов и геологических структур.

Определение качественных характеристик оползневого тела. Данный подход основан на определении физиономических характеристик, отраженных на ЦММ сопоставляемых с эталонными моделями оползней, которые обладают набором признаков, характерных для определенного типа оползня [11–29]. Изучается форма оползневого тела в рельефе, его элементы: бровка срыва, бровка главного уступа, бугры, западины, наличие струйчатой эрозии на теле оползня и т. п., а также их явное или неявное проявление в рельефе, наличие или отсутствие растительности.

Определение количественных характеристик оползневого тела. Получение метрических характеристик, размеров, определяется посредством инструментария ГИС, а прогнозное определение зеркала скольжения производится на 3D ЦМР по внешнему облику оползневого тела, по углу падения главного уступа, крутизне склона, подошве оползня и расположению оползневого тела в пространстве [11].

Исследуемый участок в геологическом отношении расположен в Кизилташской антиклинальной зоне (рис. 2).

Полный комплекс методов анализа показал:

Тип рельефа: низкогорный структурно-эрэзионно-денудационный.

Морфометрические характеристики: длина склона около 340 м (от вершины водораздела до подошвы). Средняя величина уклона участка изысканий составляет 13 град. Приводораздельный склон 9 град., уклон бровки срыва 20 град., уклон поверхности оползневого тела 11 град. (головная часть 12 град., язык 8 град.). Густая эрозионная сеть временных водотоков. Эрозионные врезы V-образные, что говорит об активной донной эрозии, превышающей аккумуляцию.

Характер эрозионных врезов и оползней по распространению и «геоморфологическому облику опасных геологических процессов (ОГП)» говорит о грунтах, сложенных мелкодисперсным материалом (суглинки, глины). Для унификации и обобщения пред-

лагается понятие «геоморфологический образ опасных геологических процессов – устойчивое сочетание морфометрических элементов и форм, типичных для того или иного опасного геологического процесса» [3].

При дешифрировании материалов ВЛС (мезорельеф) выделены грязевулканические отложения, перекрытые делювием на водоразделе и приводораздельном склоне. Слоны в основном представлены гравитационными отложениями, делящимися. В эрозионных врезах выделяются конусы выноса временных водотоков, представленных пролювиальными отложениями (мелкодисперсный материал). Речная долина в районе ирригационного канала и рисовых чеков представлена аквальными отложениями (аллювиально-лимническими).

Эндогенные геологические процессы представлены грязевулканической деятельностью в виде конуса неактивного древнего грязевого вулкана.

Выявленные экзогенные геологические процессы:

1. Криповое течение грунта по склонам. Выявляется микроступенчатость на ЦМР при изучении форм микрорельефа. Образование крипа связано с сезонным переувлажнением грунтов, прилегающих к дневной поверхности.
2. Оползневые процессы. Выделяются три типа оползней по механизму (классификация оползней по типам их механизма В.В. Кюнцеля): а) вращения – образованы дугообразные цирки оползней, бровки срыва и главный уступ подверглись денудации, контура оползней на момент дистанционного обследования (2014 г.) ярко выражены в телях оползней, видны образования линейной эрозии временных водотоков, не имеющих пережа-

тий, сдвигов осей стока или иных видимых изменений. Предварительно оползневые тела сложены дисперсными отложениями (по характеру бровки срыва), имеют длительную стабилизацию (рис. 3); б) вязкопластические – образованы дугообразные цирки оползней, бровки срыва ярко выражены, не сдлендированы. Хорошо различимы особенности микрорельефа: остроугольные перегибы к главному уступу, наличие бугров и западин. Вывод: новое геологическое тело (оползень), недавно образованное в более древнем геологическом теле (оползне) – недавно сошедший. При проведении дешифрирования материалов ВЛС по косвенным признакам выявлено близкое расположение грунтовых вод к дневной поверхности в подошве склона (присутствие в почвенном покрове растений, относящихся к группе влаголюбивых: камыш), происходит циклическая разгрузка, которая является одним из важных факторов образования оползней (рис. 3); в) плоского смещения – образован дугообразный цирк отрыва, бровка отрыва подверглась денудации, блок оползневого тела перемещен до подножья склона, отчетливо видна переработка нижней части смещенного блока (рис. 3).

Донная эрозия временного водотока. Площадь водосбора для образования достаточно глубоких эрозионных врезов небольшая. Возможно близкое расположение грунтовых вод к дневной поверхности, происходит циклическая разгрузка, позволяющая сформировать эрозионные врезы и спровоцировать появление осолов грунта (мелких оползней) и оползней по бортам вреза.

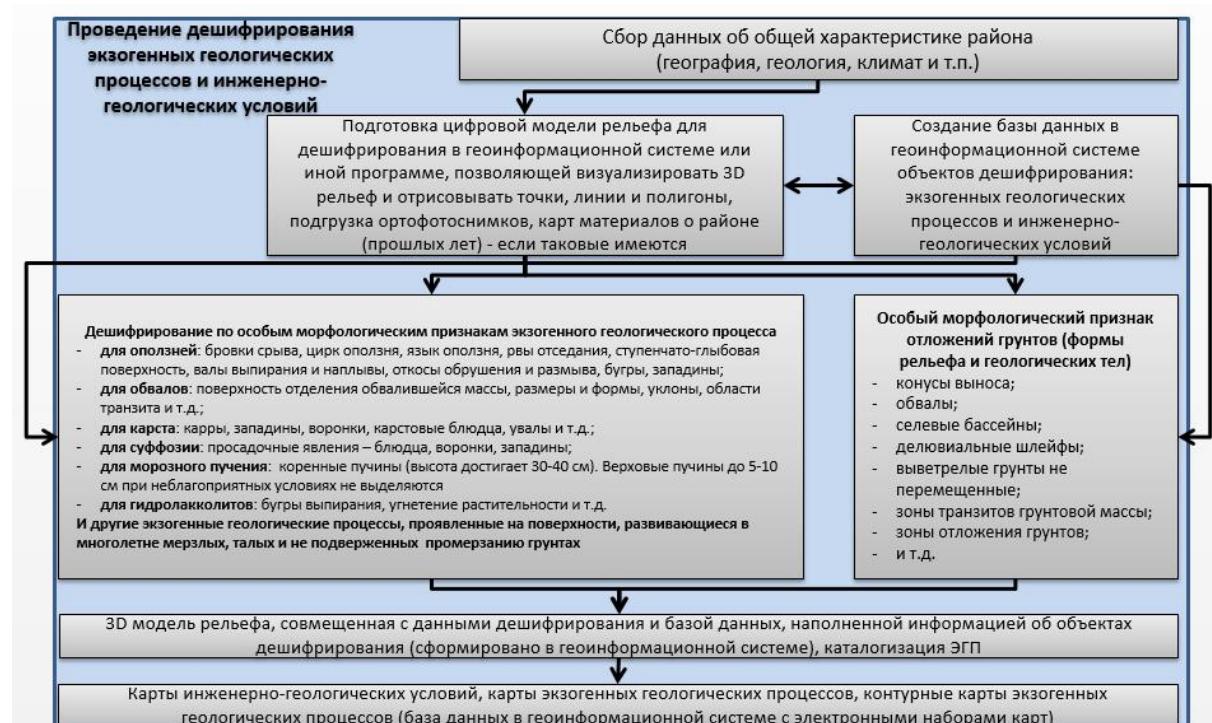


Рис. 1. Схема алгоритма проведения дешифрирования материалов ВЛС (Патент № 2655955)

Fig. 1. Scheme of the interpretation algorithm (Patent No. 2655955 (RU))

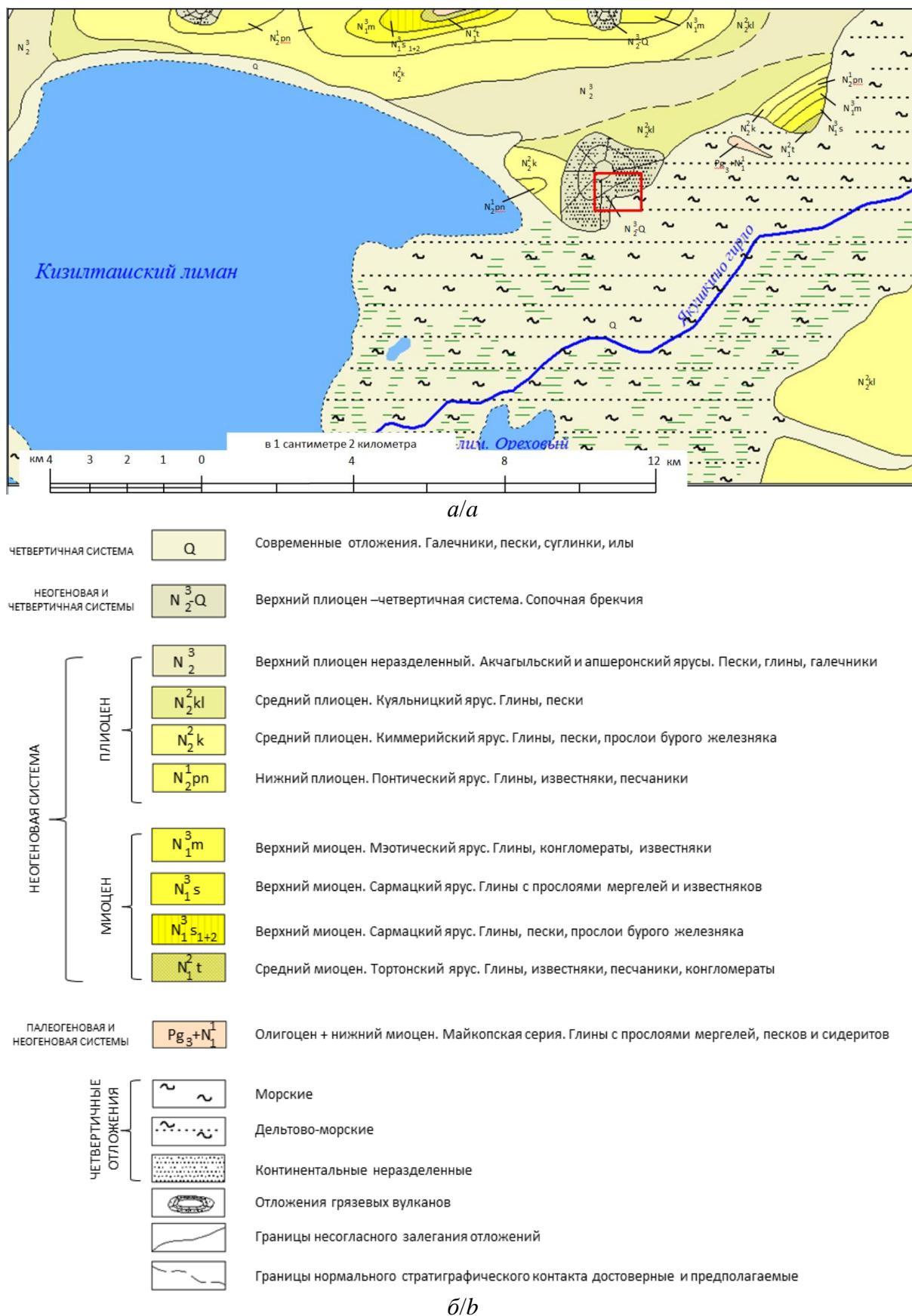


Рис. 2. а) Фрагмент геологической карты района работ. Район исследований обозначен красным прямоугольником; б) условные обозначения к фрагменту геологической карты

Fig. 2. a) fragment of a geological map of the area of work. The study area is indicated by a red rectangle; b) legend for a fragment of a geological map

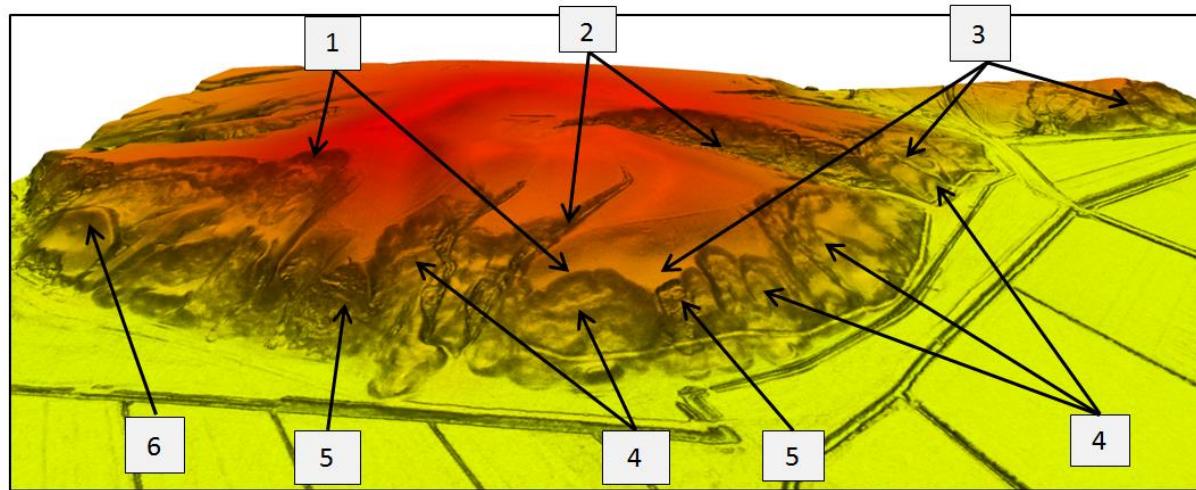


Рис. 3. Оползневый участок: 1) бровка срыва; 2) донная эрозия временного водотока; 3) геоморфологический уступ; 4) оползень вращения; 5) оползень вязкопластического течения; 6) оползень плоского смещения

Fig. 3. Landslide plot: 1) crown; 2) downcutting temporary watercourse; 3) geomorphological ledge; 4) rotational landslide; 5) debris avalanche; 6) translational landslide

Схема современных геологических процессов и условий выполнена на основе данных воздушного лазерного сканирования, в состав которых входит массив точек лазерных отложений, аэрофотоснимок (RGB). Включены картографические материалы ранее выпущенных геологических, гидрогеологических карт и карт четвертичных отложений. На основе собранного материала и полученной модели произошло уточнение границ распространения генетических типов грунтов [7–10].

Таблица 1. Фрагмент таблицы типизированных моделей опасных геологических процессов

Table 1. Fragment of a table of typed models of hazardous geological processes

| Класс/Geological process class | Вид/Kind of geological process | Тип/Type of geological process | Эталонная модель Geological process reference model | Геоморфологический образ на лазерном скане Geomorphological image on a laser scan |
|---------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|---|---|
| Гравитационный Gravitational | Оползни Landslides | Вращения Rotational | | |
| | Плоского смещения Translational | | | |
| Вязкопластический Debris avalanche | | | | |

Полученная ЦМР высокой точности (с высокой плотностью точек лазерных отражений), выполненная с высоты 600 м от поверхности земли (количество точек лазерных отражений составило 10 точек на метр квадратный, оборудование компании Leica ALS70-CM было установлено на АН-2), хорошо отображает прямые признаки геологических процессов, их облик и метрические характеристики (рис. 4).

Основные технические характеристики сканера Leica ALS70-CM:

- максимальная высота сканирования 1600 м над земной поверхностью;
- максимальная частота сканирования 500000 импульсов в секунду;
- максимальный поперечный угол сканирования 75 градусов;
- стабилизация по крену при углах крена до 5 градусов на всем диапазоне поперечного угла сканирования;
- количество возвращаемых импульсов неограниченно;
- объем запоминающего устройства 6 ч. непрерывного сканирования;
- рабочие температуры от 0 до 40 градусов Цельсия внутри воздушного судна;
- воздушный лазерный сканер Leica ALS70-CM обеспечивает точность измерений 7–10 см по высоте и 5–15 см в плане в зависимости от высоты сканирования.

Определение типов оползней проводилось путем метода эквивалента при сравнении типизированных моделей оползней (табл. 1).

Выявление опасных геологических процессов (ОГП) на ранних стадиях по данным ВЛС до проведения инженерно-геологических работ дает возможность принятия более качественных предпроектных решений, снижает временные затраты на выявление ОГП, так как обследование проводится точечно для

фактического подтверждения наличия ОГП. Появляется возможность более качественно расставить гор-

ные выработки для изучения природно-геологической среды и обосновать их расположение.

| Рядом Ranks | Коллювиальный Colluvial | Генетические типы Genetic Types | Краткое описание Short description |
|-------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|--|
| | | | Символ, цвет Symbol, color |
| | | gr | Оползневые отложения Landslide deposits |
| | | p | Отложения временных водных потоков Deposits of temporary streams |
| | | al | Неразделимые отложения рек и прибрежных озёр Inseparable sediments of rivers and coastal lakes |
| Вулканический Volcanogenic | Грязевулканический Mud volcanic | π Q-N | Отложения грязевых вулканов, перекрытые делявиальными отложениями Sediments of mud volcanoes overlapped by deluvial deposits |

Схема современных геологических процессов и условий.
 3D модель рельефа соответствует масштабу топографо-геодезической съемке 1:500
 Scheme of modern geological processes and conditions.
 3D relief model corresponds to the scale of topographic and geodetic survey 1: 500

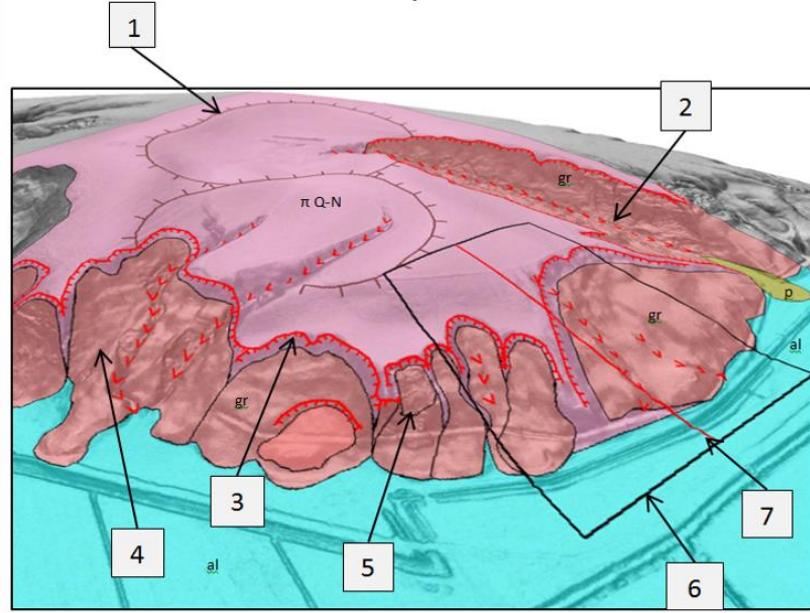


Рис. 4. Схема современных геологических процессов и условий (создана на основе методики дешифрирования материалов воздушного лазерного сканирования): 1) древний кратер грязевого вулкана; 2) донная эрозия временного водотока; 3) бровка срыва; 4) оползень вращения; 5) оползень вязкопластического течения; 6) граница участка исследований; 7) участок трассы проектируемого трубопровода

Fig. 4. Scheme of modern geological processes and conditions (created based on the method of interpretation of LiDAR data): 1) ancient crater of a mud volcano; 2) downcutting temporary watercourse; 3) crown; 4) rotational landslide; 5) debris avalanche; 6) research site boundary; 7) section of the route of the designed pipeline

Полевые исследования на оползневом участке

При проведении полевых работ были выполнены буровые работы в количестве 44 скв. и комплекс геофизических работ (электроразведка, сейсморазведка по 3 профиля), лабораторные испытания грунтов и др.

По итогам полевых, лабораторных и камеральных работ составлен отчет по инженерно-геологическим изысканиям.

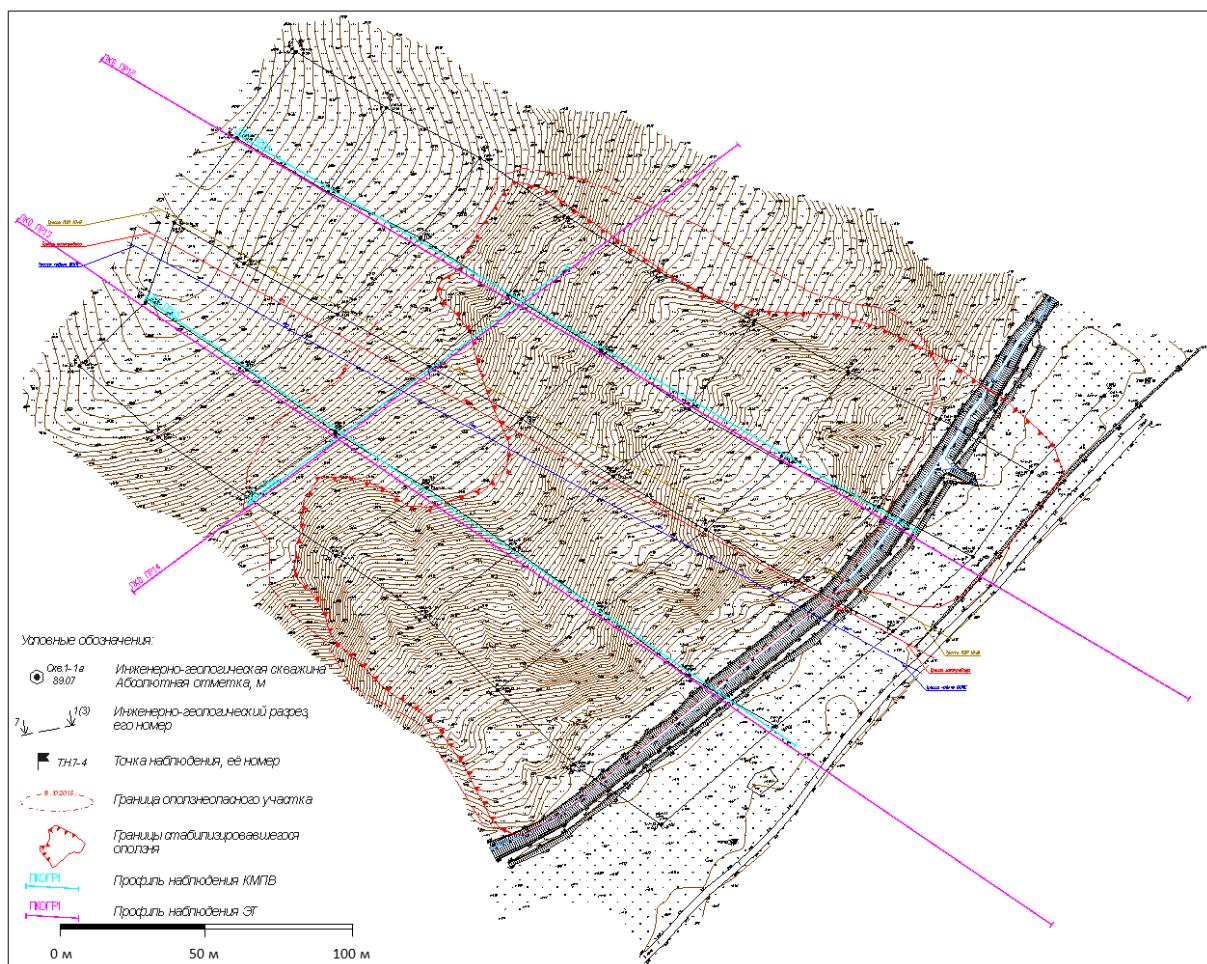
Для демонстрации сопоставления данных дешифрирования материалов ВЛС с данными полевых работ представлена схема фактического материала из отчета по инженерно-геологическим изысканиям (рис. 5).

В целях проведения эксперимента сходимости результатов дистанционного метода дешифрирования материалов ВЛС с полевыми работами производилось сопоставление количественных характеристик оползня, полученных при дешифрировании и полевых работах (периметр, поперечник, площадь и зеркало скольжения по данным дешифрирования и полевых работ) (рис. 4, 5). Карта фактического материала построена по данным воздушного лазерного сканирования, совмещенного с аэрофотосъемкой. При по-

строении изолиний с сечением, соответствующим масштабу 1:500, теряется часть информации о микрорельефе, отображающем четкость отражения границ и активность процесса. Для описания качественных и количественных характеристик информативной является цифровая модель рельефа, полученная по данным воздушного лазерного сканирования. Высокая плотность точек лазерных отражений позволяет отобразить мельчайшие подробности геологического процесса.

Границы оползней на карте фактического материала выделялись геологами при натурах исследованиях. Сопоставляя границы, выделенные на цифровой модели рельефа (рис. 4) и на карте фактов (рис. 5), выявлена неточность определения границы оползня геологами, что может повлечь за собой неверные принятия проектных решений.

Для демонстрации сходимости геологического дешифрирования материалов ВЛС с полевыми работами дополнительные профили (для прогнозного определения зеркала скольжения по 3D ЦМР) отстраиваются по профилям полевого исследования [11, 30].



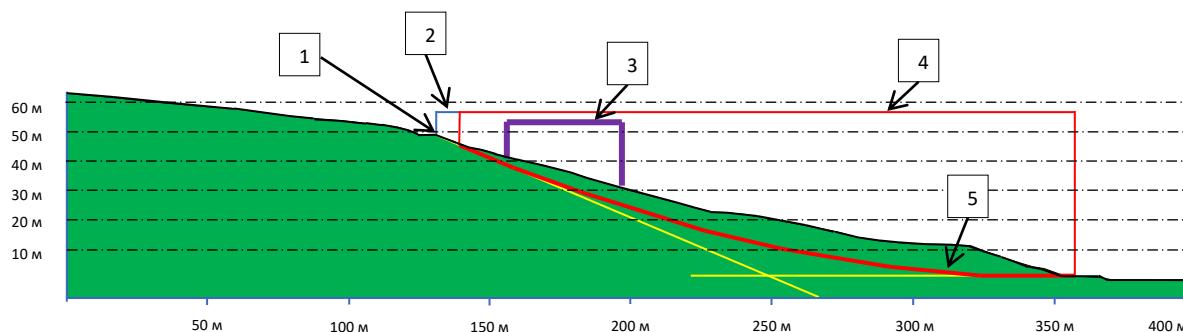


Рис. 6. Профиль по линии 4-4: 1) бровка срыва; 2) проекция главного уступа оползня; 3) проекция геоморфологического уступа; 4) проекция тела оползня; 5) предполагаемое зеркало скольжения

Fig. 6. Profile on line 4-4: 1) crown; 2) projection of the main scarp of a landslide; 3) projection of a geomorphological ledge; 4) landslide body projection; 5) alleged surface of rupture

Сравнивая представленные на рис. 7 зеркала скольжения, было установлено, что расчетное зеркало скольжения, произведенное в программном продукте GeoStudio (Slope/W) методом Моргенштерн–Прайса (на рис. 7 обозначено цифрой 6), не совпадает с:

- 1) зеркалом скольжения оползневого тела при дешифрировании по внешним признакам (по форме бровки срыва, уклону главного уступа, общему уклону склона, форме подошвы оползня и типу оползня по внешним признакам), на рис. 6–9 обозначено цифрой 5
- 2) зеркалом скольжения по данным геологических и геофизических исследований, на рис. 7 обозначено цифрой 7.

Метод Моргенштерн–Прайса является более точным в том смысле, что он учитывает все три уравнения равновесия: уравнения сил равновесия в горизонтальном и вертикальном направлении, а также уравнение момента равновесия. Коэффициент надежности FS определяется через решение уравнения сил, действующих между блоками, и коэффициента надежности FS [31].

На рис. 7 видна разница определения зеркала скольжения программным продуктом GeoStudio (Slope/W) и методом определения по данным дистанционного метода.

Дальнейшее сопоставление зеркала скольжения, выявленного геофизическими методами, с прогнозным определением зеркала скольжения, отстроенного по данным дистанционного метода, представлено на рис. 8, 9.

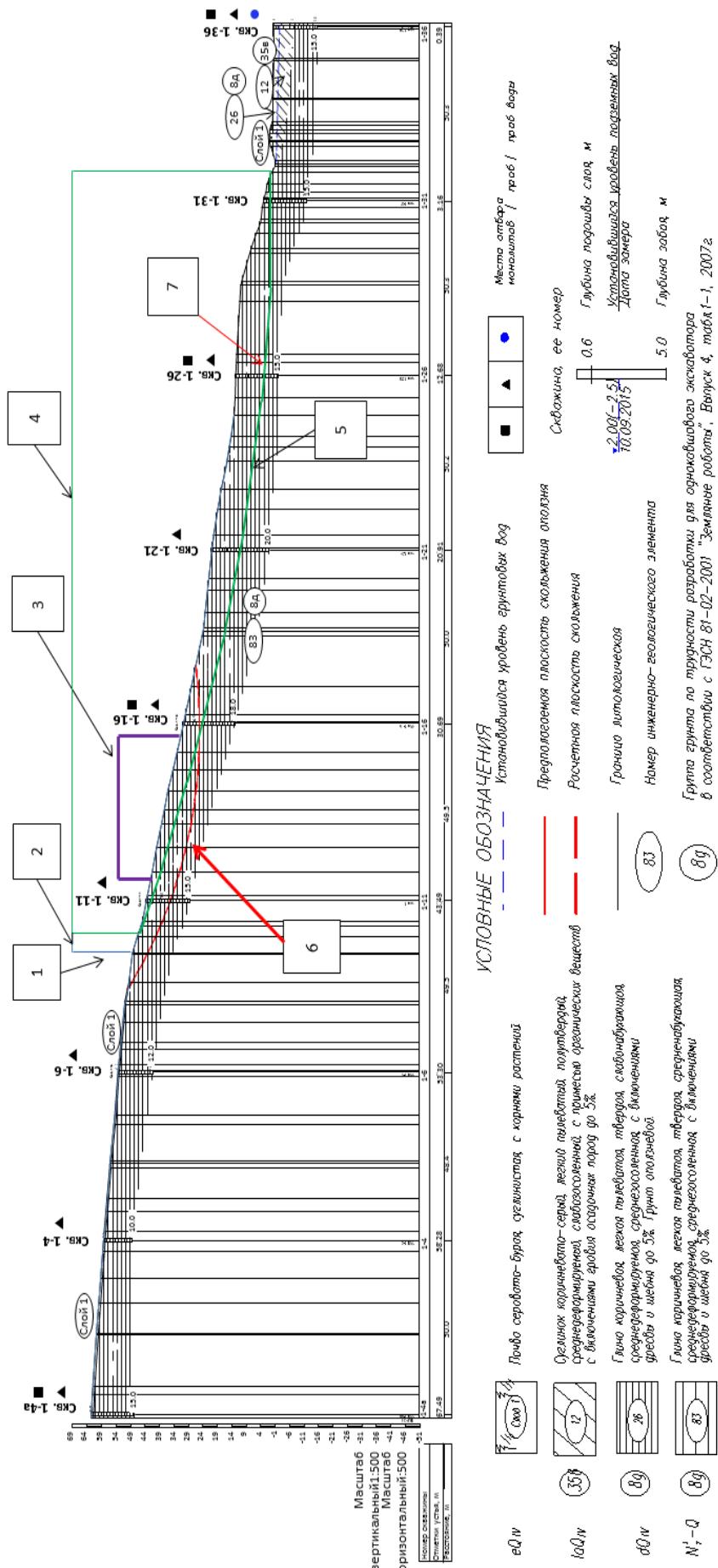
На псевдо-разрезе кажущегося сопротивления (рис. 8), построенного с учетом рельефа, выделяются грунты с низким сопротивлением (обозначено тонами синего цвета). Выделенные границы грунтов с низким сопротивлением приурочены к увлажненным грунтам, что частично отображает строение древнего грязевого вулкана. Прослеживается канал разгрузки флюидов, что является одним из важных факторов активизации оползневых процессов. Массив оползневого тела также характеризуется низкими скоростями распространения продольных волн, тем самым подтверждая

ранее выделенное положение зеркала скольжения изучаемого оползня по данным дистанционного метода (рис. 8).

Сейсмический разрез склона, характеризующий распределение скоростей продольных (V_p) и поперечных (V_s) волн, их отношения, отображает границы, разделяющие слои вдоль линий повышенных градиентов изменений этих сейсмических свойств (рис. 9). На сейсмическом разрезе значения скоростей увеличиваются с глубиной: V_p – от 200 до 2150 м/с, V_s – от 86 до 312 м/с (рис. 9). Данные диапазоны указывают на неоднородность дисперсных грунтов, слагающих оползневый склон. На сейсмическом разрезе низкие значения скоростей продольных V_p – от 200 до 1170 м/с и поперечных V_s – от 94 до 217 м/с волн, соответствующие разуплотненным дисперсным грунтам, выделяются по пикетажу от отметки 150 м до отметки 370 м до глубины 4–10 м.

Значения поперечных V_p и продольных V_s волн тесно связаны с напряженным состоянием грунтового массива. Скорости упругих волн падают с уменьшением сжимающих напряжений и переходом их в растягивающие. На фоне понижения V_s и V_p их отношение V_s/V_p возрастает, что характеризует уменьшение значений динамического коэффициента Пуассона. При совмещении выделенной по данным дистанционного метода предполагаемой границы зеркала скольжения с данными сейсмических исследований, происходит прослеживание корреляции этой границы с зоной низких скоростей продольных и поперечных волн, соответствующей зоне разуплотнения дисперсных грунтов.

При сопоставлении выделения границ оползневого тела по данным дистанционного метода и сведениям полевых работ, на рис. 4, 5 видно, что дистанционное выделение оползней, по материалам воздушного лазерного сканирования точнее определяет границы, чем при натурном выделении. В данном случае на неверное установление границ оползневого тела мог повлиять человеческий фактор. Выделение зеркала скольжения при дистанционном методе практически совпало с данными бурения и геофизики (рис. 7–9).



Геологический разрез по линии 4-4: 1) бровка срыва; 2) проекция главного уступа оползня; 3) проекция геоморфологического уступа; 4) проекция тела оползня; 5) предполагаемое зеркало скольжения; 6) зеркало скольжения рассчитано в специализированном программном продукте GeoStudio (SlopeW); 7) зеркало скольжения установленное при помощи буриения и геофизики

Geological section along the line 4-4: 1) crown; 2) projection of the main scarp of an landslide; 3) projection of a geomorphological ledge; 4) landside body projection; 5) allegedly surface of rupture; 6) surface of rupture calculated in a specialized software product GeoStudio (SlopeW); 7) surface of rupture detected using drilling and geophysics

Fig. 7. Geological section along the line 4-4: 1) crown; 2) projection of the main scarp of a landslide; 3) projection of a geomorphological ledge; 4) landslide body projection; 5) alleged surface of rupture; 6) surface of rupture calculated in a specialized software product GeoStudio (SlopeW); 7) surface of rupture detected using drilling and geophysics

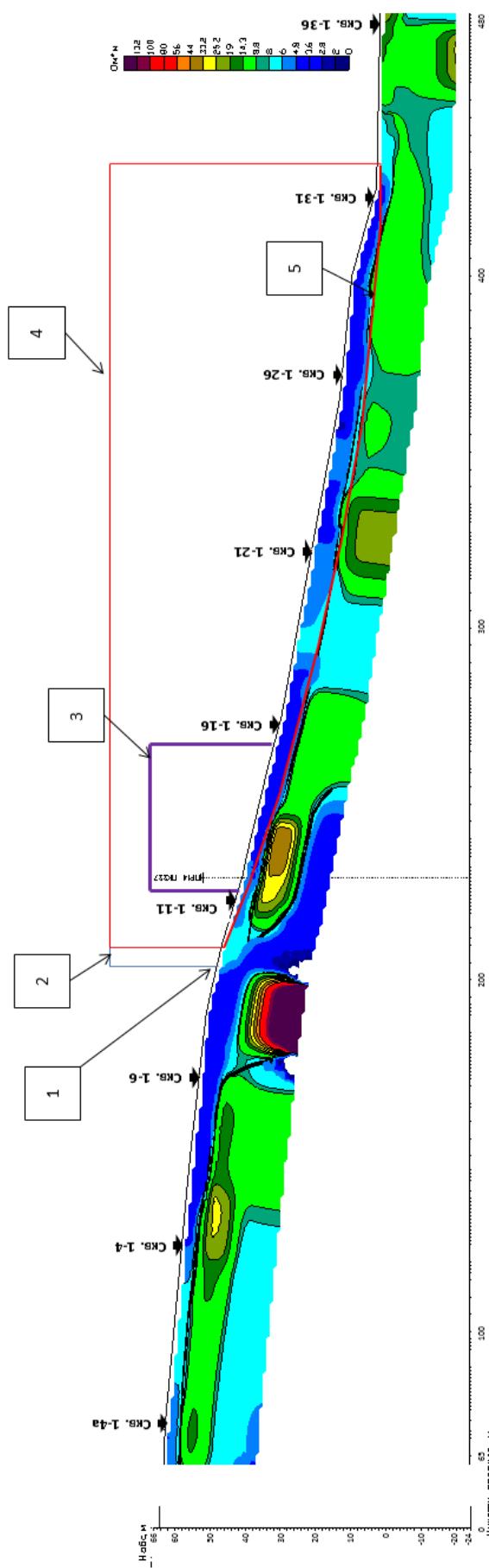


Рис. 8. Разрез электротомографии, сопряжённый с линией разреза 4-4: 1) бровка срыва; 2) проекция главного уступа оползня; 3) проекция геоморфологического уступа; 4) проекция тела оползня; 5) предполагаемое зеркало скольжения

Fig. 8. Section of electrotomography associated with the section line 4-4: 1) crown; 2) projection of the main scarp of a landslide; 3) projection of a geomorphological ledge; 4) landslide body projection; 5) alleged surface of rupture

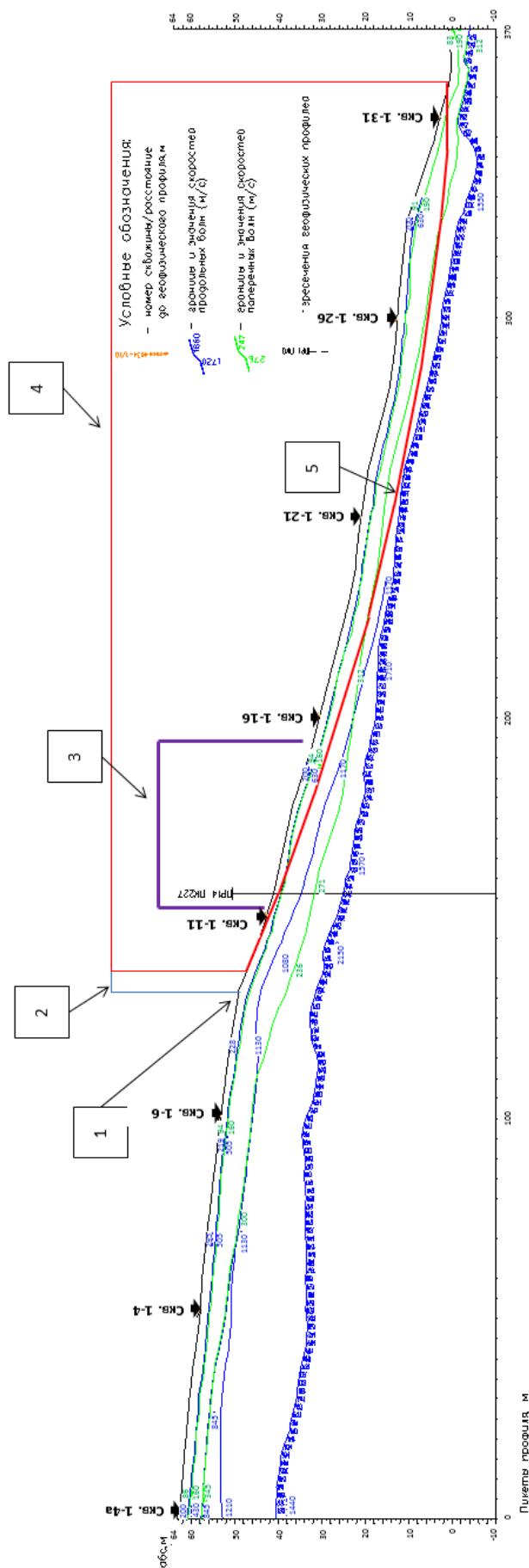


Рис. 9. Разрез геофизический (метод корреляционный преломленных волн), сопряжённый с линией разреза 4-4: 1) бровка срыва; 2) проекция главного уступа оползня; 3) проекция геоморфологического уступа; 4) проекция тела оползня; 5) проекция тела оползня.
Fig. 9. Section refraction wave correlation method associated to the section line 4-4: 1) crown; 2) projection of the main scarp of a landslide; 3) projection of a geomorphological ledge; 4) landslide body projection; 5) alleged surface of rupture

Заключение

Первоначальная оценка распространения оползней, их качественные и количественные характеристики (включая прогнозное определение зеркала скольжения по геометрическим признакам) являются перспективным методом (с учетом применения воздушного лазерного сканирования для получения ЦММ) при изучении местности на стадии принятия проектных решений. Применение данного метода позволяет получить важную инженерно-геологическую информа-

цию до проведения полномасштабных полевых работ.

Опыт, накопленный в области применения аэрометодов при изысканиях, показывает их исключительную эффективность по сравнению с традиционными методами сбора информации как в части значительного снижения трудоемкости и сокращения сроков изысканий, так и в части широты охвата различных видов информации, необходимой для проектирования и планирования дальнейших (детальных) инженерно-геологических работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Звонкова Т.В. Прикладная геоморфология. – М.: Высшая школа, 1970. – 237 с.
2. Свод Правил 47.13330.2016 (Свод Правил 47.13330.2012) Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. Актуализированная редакция – Свод Норм и Правил 11-02-96. – М.: Стандартинформ, 2017. – 90 с.
3. Свод Правил 11-105-97 часть I. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Государственный Комитет Российской Федерации по Жилой и Строительной Политике. – М.: Госстрой России, 1997. – 47 с.
4. Баборыкин М.Ю., Жидиляева Е.В., Погосян А.Г. 2015. Выявление опасных геологических процессов при проведении инженерно-геологических изысканий на основе цифровых моделей рельефа // Инженерные Изыскания. – 2015. – № 2. – С. 30–36.
5. Способ дешифрирования экзогенных геологических процессов и геологических условий: пат. Рос. Федерации, № 2655955, заявл. 16.03.2017; опубл. 30.05.2018. Бюл № 16. – 8 с.
6. Баборыкин М.Ю. Выстраивание практики и методики взаимодействия проектировщиков и изыскателей при решении задач проектирования на основе данных дешифрирования на объекте Газификация Юго-Западных районов Краснодарского края. – М.: ИЦ «Геомаркетинг», 2015. URL: http://www.geomark.ru/ecwd_event/19-marta-2015-god-i-prakticheskaya-konferenciya/attachment/9-baborykin-output/ (дата обращения 12.12.2019).
7. Баборыкин М.Ю. Дистанционное зондирование Земли в инженерной геологии. Создание опережающих инженерно-геологических карт // Геоинженеринг. – 2011. – № 1 (10). – С. 38–44.
8. Свод Правил 11-105-97 часть II. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Государственный Комитет Российской Федерации по Жилой и Строительной Политике. – М.: Госстрой России, 1997. – 88 с.
9. Свод Правил 115.13330.2016. Геофизика опасных природных воздействий. Актуализированная редакция – Свод Норм и Правил 22-01-95. – М.: Министерство Строительства и Жилищно-Коммунального Хозяйства Российской Федерации, 2016. – 36 с.
10. Свод Правил 116.13330.2012. Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения. Актуализированная редакция – Свод Норм и Правил 22-02-2003. – М.: Министерство Строительства и Жилищно-Коммунального Хозяйства Российской Федерации, 2012. – 59 с.
11. Баборыкин М.Ю. Дешифрирование экзогенных геологических процессов по данным воздушного лазерного сканирования. – М.: ИЦ «Геомаркетинг», 2016, URL: http://www.geomark.ru/ecwd_event/21-22-aprelya-2016-goda-i-nauchno-prakticheskaya-ko/attachment/8-baborykin-myu-deshfrirovaniye-yekzogen/ (дата обращения 12.12.2019).
12. Ackerman A. Using geologic maps to reduce landslide risk // Factsheet 2018-003, April 2018. April 2018. URL: https://www.americangeosciences.org/sites/default/files/CI_Factsheet_2018_LandslideGeologicMapping_04202018.pdf (дата обращения 12.12.2019).
13. Baltsavias E.P. Airborne laser scanning: basic relations and formulas. Isprs journal of photogrammetry and remote sensing. – 1999. – V. 2–3. – P. 199–214.
14. Monroy J.D., Khan Sh. Remote sensing techniques make high-resolution terrain mapping easier and quicker // Principles of Photogrammetry and LiDAR. – September 1, 2018. URL: <https://csengineermag.com/principles-of-photogrammetry-and-lidar/> (дата обращения 12.12.2019).
15. Landslide hazard detection from LiDAR data / Ch.K. Toth, O.E. Mora, M.G. Lenzano, D.A. Grejner-Brzezinska. March 2013. URL: https://www.researchgate.net/publication/287398017_Landslide_Hazard_Detection_From_LiDAR_Data (дата обращения 12.12.2019).
16. Calculation of the rockwall recession rate of a limestone cliff, affected by rockfalls, using cosmogenic chlorine-36. Case study of the Montsec Range (Eastern Pyrenees, Spain) / G. Domènech, J. Corominas, O. Mavrouli, S. Merchel, A. Abellán, S. Pavetich, G. Rugel // Geomorphology. – 2018. – V. 306. – P. 325–335.
17. Cigna F. Observing geohazards from space // Geosciences. – 8 February 2018. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3263/8/2/59> (дата обращения 12.12.2019).
18. Geological outcrop modelling and interpretation using ground based hyperspectral and laser scanning data fusion / J. Howell, T.H. Kurz, S.J. Buckley, D. Schneider. – January 2008. URL: https://www.researchgate.net/publication/228652853_Geological_outcrop_modelling_and_interpretation_using_ground_based_hyperspectral_and_laser_scanning_data_fusion (дата обращения 12.12.2019).
19. Vertical geology: from remote sensing to 3D geological modelling / F. Humair, B. Matasci, M. Jaboyedoff, A. Abellán, D. Carrea, M.H. Derron, A. Guerin, C. Michoud, P. Nicolet, L. Nguyen, I. Penna, J. Voumard, M. Wyser // Proc. of the first Vertical Geology conference. –Switzerland, 5–7 February 2014. – P. 75–78.
20. Mapping and monitoring geological hazards using optical, LiDAR, and synthetic aperture RADAR image data / K.E. Joyce, S.V. Samsonov, S.R. Levick, J. Engelbrecht, S. Belliss // Nat Hazards. DOI 10.1007/s11069-014-1122-7. URL: <https://www.researchgate.net/publication/261070509> (дата обращения 12.12.2019).
21. Mapping and monitoring geological hazards using optical, LiDAR, and synthetic aperture RADAR image data / K.E. Joyce, S.V. Samsonov, Sh.R. Levick, J. Engelbrecht // Natural Hazards. – September 2014. URL: https://www.researchgate.net/publication/261070509_Mapping_and_monitoring_geological_hazards_using_optical_LiDAR_and_synthetic_aperture_RADAR_image_data (дата обращения 12.12.2019).
22. Analysis of air-launched ground-penetrating radar techniques to measure the soil surface water content / S. Lambot, L. Weihermüller, J.A. Huisman, C.E. Slob // Water Resources Research. November 2006. URL: https://www.researchgate.net/publication/46059620_Analysis_of_air-launched_ground-penetrating_radar_techniques_to_measure_the_soil_surface_water_content (дата обращения 12.12.2019).
23. Detecting large-scale landslides using lidar data and aerial photos in the Namasha-Liuoguey Area, Taiwan / Meei-Ling Lin, Te-Wei Chen, Ching-Wee Lin, Dia-Jie Ho, Keng-Ping Cheng, Hsiao-Yuan Yin, Mei-Chen Chen // Remote Sens. – 2014. – V. 6. – P. 42–63. DOI: 10.3390/rs6010042.
24. Review of techniques for landslide detection, fast characterization, rapid mapping and long-term monitoring / C. Michoud, A. Abellán, M.H. Derron, M. Jaboyedoff // SafeLand European project. – January 2010. – V. 1. – P. 17–19.
25. Landslide research at the British Geological Survey: capture, storage and interpretation on a national and site-specific scale / C.V.L. Pennington, C. Foster, J.E. Chambers, G.O. Jenkins.

- October 2009. – V. 83. – Iss. 5. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1755-6724.2009.00124.x> (дата обращения 12.12.2019).
26. Mahalingam R., Olsen M.J., O'Banion M.S. Evaluation of landslide susceptibility mapping techniques using lidar-derived conditioning factors (Oregon case study). URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/19475705.2016.1172520> (дата обращения 12.12.2019).
27. Syed Omar, Zainab Mohamed, Khamarrul Azahari Razak. Landslide susceptibility mapping using LiDAR in Kundasang area: a review // Conference Paper. – March 2018. URL: <https://www.researchgate.net/publication/324056936> (дата обращения 12.12.2019).
28. SPH Engineering GPR drone integrated system. URL: <https://geomatching.com/uas-for-mapping-and-3d-modelling/gpr-drone-integrated-system> (дата обращения 12.12.2019).
29. Assessment of the evolution of a landslide using digital photogrammetry and LiDAR techniques in the Alpujarras Region (Granada, Southeastern Spain) / T. Fernández, J.L. Pérez, C. Colomo, J. Cardenal, J. Delgado, J.A. Palenzuela, C. Irigaray, J. Chacón // Geosciences. – 2017. – V. 7 (2). URL: <https://www.mdpi.com/2076-3263/7/2/32> (дата обращения 12.12.2019).
30. Баборыкин М.Ю., Кулижников А.М., Еремин Р.А. Комплексное обследование оползней // Автомобильные дороги. – 2018. – № 2 (1035). – С. 106–133.
31. Устойчивость бортов карьеров / С.Г. Оника, Ф.Г. Халявкин, Е.И. Ганцовский, М.В. Семёнова. – Минск: БНТУ, 2016. – 43 с.

Поступила 16.06.2020 г.

Информация об авторах

Баборыкин М.Ю., ведущий специалист отдела развития инженерных изысканий и проектирования, Специализированный институт по инженерным изысканиям, ООО «НК «Роснефть» – НТЦ».

UDC 624.131.1:528.7

CONVERGENCE OF THE RESULTS OF INTERPRETATION REMOTE METHOD WITH FIELD WORK ON A LINEAR OBJECT. ON THE EXAMPLE OF LANDSLIDE PLOT

Maxim Yu. Baborykin,
mybaborykin@rntc.ru

LTD «NC «Rosneft» – Research-and-Technical Centre»,
54, Krasnaya street, Krasnodar, 350000, Russia.

The article discusses the technology of airborne laser scanning used to study the topography, geomorphology and mapping of dangerous geological processes with the description required in the regulatory documents, as well as comparison of the forecast data of the remote method for determining the slip mirror compared with geophysical and geological research methods.

The aim of the study is to obtain positive statistics on using the method of interpretation of hazards geological processes using airborne laser scanning combined with digital aerial photography; to compare the forecast data of the surface of rupture with the classical geological and geophysical studies of the landslide area and, as a result, reveal the reliability of using the interpretation method.

Object: section of the slope of the project pipeline layout. The subject is gravitational geological processes, their form, state and activity.

Methods: direct method of interpretation. Since laser scanning of a terrain allows obtaining an array of laser reflection points from the ground surface in the presence of vegetation, the direct method of interpretation allows determining the boundaries and textural features of landslides. Traditional research methods, geodetic survey of the area, drilling of wells, geophysical studies, etc. were used.

Results. Comparison of the remote method and field studies showed a fairly high convergence in identification of landslides (the boundaries of bodies and their appearance). Determination of the proposed surface of rupture landslide in appearance for an assessment in front of the field also shows the convergence of results sufficient for an assessment when choosing competitive areas. World experience gained in the field of application of aerometodes in surveys shows their exceptional efficiency. Thus, the method is effective for making design decisions before field research, and also eliminates the possibility of under-exploration of the territory immediately before the start of field research.

Key words:

Relief, hazards geological processes, interpretation, study of landslides, engineering-geological mapping, LiDAR, geophysical methods of research, main pipeline.

REFERENCES

1. Zvonkova T.V. *Prikladnaya geomorfologiya* [Applied Geomorphology] Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1970. 237 p.
2. Svod Pravil 47.13330.2016 (SP 47.13330.2012) *Inzhenernyye izyskaniya dlya stroitelstva. Osnovnye polozheniya*. Aktualizirovannaya redaktsiya – Svod Norm i Pravil 11-02-96 [Code of Rules 47.13330.2016 (Code of Rules 47.13330.2012). Engineering surveys for construction. The main provisions. Updated edition of the Code of Norms and Rules 11-02-96]. Moscow, Standardinform Publ., 2017. 90 p.
3. Svod Pravil 11-105-97 chast I. *Inzhenerno-geologicheskie izyskaniya dlya stroitelstva* [Code of rules 11-105-97 part I. Geological engineering surveys for construction]. Moscow, State Committee of the Russian Federation on Residential and Construction Policy, 1997. 47 p.
4. Baborykin M.Yu., Zhidilyaeva E.V., Pogosyan A.G. Identification of hazardous geological processes in engineering surveys based on digital elevation models. *Engineering survey*, 2015, no. 2, pp. 30–36. In Rus.
5. Baborykin M.Yu. *Sposob deshifrirovaniya ekzogennykh geologicheskikh protsessov i geologicheskikh usloviy* [The method of interpretation of exogenous geological processes and geological conditions]. Patent RF no. 2655955, 2018.
6. Baborykin M.Yu. *Vystraivanie praktiki i metodiki vzaimodeystviya proektirovshikov i izyskately pri reshenii zadach proyektirovaniya na osnove dannykh deshifrirovaniya na obyekte Gazifikatsiya Yugo-Zapadnykh rayonov Krasnodarskogo kraya* [Building practice and methods of interaction between designers and surveyors in solving design problems based on decryption data at the Gasification Facility in the South-Western regions of the Krasnodar Territory]. Moscow, Geomarketing Publ., March 19, 2015. Available at: http://www.geomark.ru/ecwd_event/19-marta-2015-goda-i-prakticheskaya-konferenciya/attachment/9-baborykin-output/ (accessed 12 December 2019).
7. Baborykin M.Yu. Remote sensing of the Earth in engineering geology. Creation of engineering-geological maps. *Geoengineering*, summer, 2011, no. 1 (10), pp. 38–44. In Rus.
8. Svod Pravil 11-105-97 chast II. *Inzhenerno-geologicheskie izyskaniya dlya stroitelstva* [Code of Rules 11-105-97 Part II. Engineering and geological surveys for construction]. Moscow, State Committee of the Russian Federation on Residential and Construction Policy, 1997. 88 p.
9. Svod Pravil 115.13330.2016. *Geofizika opasnykh prirodnnykh vozdeystviy*. Aktualizirovannaya redaktsiya – Svod Norm i Pravil 22-01-95 [Code of practice 115.13330.2016. Geophysics of natural hazards. Updated edition of the Code of Norms and Rules 22-01-95]. Moscow, Ministry of construction and housing and communal services of the Russian Federation, 2016. 36 p.
10. Svod Pravil 116.13330.2012. *Inzhenernaya zashchita territoriy, zdaniy i sooruzheniy ot opasnykh geologicheskikh protsessov. Osnovnye polozheniya*. Aktualizirovannaya redaktsiya – Svod Norm i Pravil 22-02-2003 [Code of Rules 116.13330.2012. Engineering protection of territories, buildings and structures from dangerous geological processes. The main provisions. Updated edition of the Code of Norms and Rules 22-02-2003]. Moscow, Ministry of construction and housing and communal services of the Russian Federation, 2012. 59 p.
11. Baborykin M.Yu. *Deshifrirovaniye ekzogennykh geologicheskikh protsessov po dannym vozduzhnogo lazernogo skanirovaniya* [Interpretation of exogenous geological processes according to LiDAR]. Moscow, Geomarketing Publ. Center, April 21–22, 2016. Available at: http://www.geomark.ru/ecwd_event/21-22-aprely-2016-goda-i-nauchno-prakticheskaya-ko/attachment/8-baborykin-myu-deshifrirovaniye-yekzogen/ (accessed 12 December 2019).
12. Ackerman A. Using geologic maps to reduce landslide risk. *Factsheet*, 2018-003, April 2018. Available at: https://www.americangeosciences.org/sites/default/files/CI_Factsheet_2018_LandslideGeologicMapping_04202018.pdf (accessed 12 December 2019).
13. Baltsavias E.P. Airborne laser scanning: basic relations and formulas. *Isprs journal of photogrammetry and remote sensing*, 1999, vol. 2–3, pp. 199–214.
14. Monroy J.D., Khan Sh. Remote sensing techniques make high-resolution terrain mapping easier and quicker. *Principles of Photogrammetry and LiDAR*. September 1, 2018. Available at:

- <https://csengineermag.com/principles-of-photogrammetry-and-lidar/> (accessed 12 December 2019).
15. Toth Ch.K., Mora O.E., Lenzano M.G., Grejner-Brzezinska D.A. *Landslide hazard detection from LiDAR data*. March 2013. Available at: https://www.researchgate.net/publication/287398017_Landslide_Hazard_Detection_From_LiDAR_Data (accessed 12 December 2019).
 16. Domènec G., Corominas J., Mavrouli O., Merchel S., Abellán A., Pavetich S., Rugel G. Calculation of the rockwall recession rate of a limestone cliff, affected by rockfalls, using cosmogenic chlorine-36. Case study of the Montsec Range (Eastern Pyrenees, Spain). *Geomorphology*, 2018, vol. 306, pp. 325–335.
 17. Cigna F. Observing geohazards from space. *Geosciences*. 8 February 2018. Available at: <https://www.mdpi.com/2076-3263/8/2/59> (accessed 12 December 2019).
 18. Howell J., Kurz T.H., Buckley S.J., Schneider D. *Geological outcrop modelling and interpretation using ground based hyperspectral and laser scanning data fusion*. January 2008. Available at: https://www.researchgate.net/publication/228652853_Geological_outcrop_modelling_and_interpretation_using_ground_based_hyperspectral_and_laser_scanning_data_fusion (accessed 12 December 2019).
 19. Humair F., Matasci B., Jaboyedoff M., Abellán A., Carrea D., Derron M.H., Guerin A., Michoud C., Nicolet P., Nguyen L., Penna I., Voumard J., Wyser M. Vertical Geology: from remote sensing to 3D geological modeling. *Proc. of the first Vertical Geology conference*. Switzerland, 5–7 February 2014. pp. 75–78.
 20. Joyce K.E., Samsonov S.V., Levick S.R., Engelbrecht J., Belliss S. Mapping and monitoring geological hazards using optical, LiDAR, and synthetic aperture RADAR image data. *Nat Hazards*. DOI: 10.1007/s11069-014-1122-7. 18 March 2014. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/261070509> (accessed 12 December 2019).
 21. Joyce K.E., Samsonov S.V., Levick Sh.R., Engelbrecht J. Mapping and monitoring geological hazards using optical, LiDAR, and synthetic aperture RADAR image data. *Natural Hazards*, September 2014, vol. 73 (2), pp. 1–27. Available at: https://www.researchgate.net/publication/261070509_Mapping_and_monitoring_geological_hazards_using_optical_LiDAR_and_synthetic_aperture_RADAR_image_data (accessed 12 December 2019).
 22. Lambot S., Weihermüller L., Huisman J.A., Slob E.C. Analysis of air-launched ground-penetrating radar techniques to measure the soil surface water content. *Water Resources Research*, November 2006. Available at: https://www.researchgate.net/publication/46059620_Analysis_of_air-launched_ground-penetrating_radar_techniques_to_measure_the_soil_surface_water_content (accessed 12 December 2019).
 23. Meei-Ling Lin, Te-Wei Chen, Ching-Wei Lin, Dia-Jie Ho, Keng-Ping Cheng, Hsiao-Yuan Yin, Mei-Chen Chen. Detecting large-scale landslides using lidar data and aerial photos in the Namasha-Liuoguey Area, Taiwan. *Remote Sens.*, 2014, vol. 6, pp. 42–63. DOI: 10.3390/rs6010042.
 24. Michoud C., Abellán A., Derron M.H., Jaboyedoff M. Review of techniques for landslide detection, fast characterization, rapid mapping and long-term monitoring. *SafeLand European project*, January 2010, vol. 1, pp. 17–19.
 25. Pennington C.V.L., Foster C., Chambers J.E., Jenkins G.O. *Landslide research at the British Geological Survey: capture, storage and interpretation on a national and site-specific scale*. October 2009, Vol. 83, Iss. 5. Available at: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1755-6724.2009.00124.x> (accessed 12 December 2019).
 26. Mahalingam R., Olsen M.J., O'Banion M.S. *Evaluation of landslide susceptibility mapping techniques using lidar-derived conditioning factors (Oregon case study)*. Available at: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/19475705.2016.1172520> (accessed 12 December 2019).
 27. Syed Omar, Zainab Mohamed, Khamarrul Azahari Razak. Landslide susceptibility mapping using LiDAR in Kundasang area: a review. *Conference Paper*, March 2018. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/324056936> (accessed 12 December 2019).
 28. SPH Engineering GPR drone integrated system. Available at: <https://geo-matching.com/uas-for-mapping-and-3d-modelling/gpr-drone-integrated-system> (accessed 12 December 2019).
 29. Fernández T., Pérez J.L., Colomo C., Cardenal J., Delgado J., Palenzuela J.A., Irigaray C., Chacón J. Assessment of the Evolution of a Landslide Using Digital Photogrammetry and LiDAR Techniques in the Alpujarras Region (Granada, Southeastern Spain). *Geosciences*, 2017, vol. 7 (2). Available at: <https://www.mdpi.com/2076-3263/7/2/32> (accessed 12 December 2019).
 30. Baborykin M.Yu., Kulizhnikov A.M., Eremin R.A. A comprehensive survey of landslides. *Highways*, 2018, no. 2 (1035), pp. 106–133. In Rus.
 31. Onika S.G., Khalyavkin F.G., Gantsovsky E.I., Semenova M.V. *Ustoychivost bortov karyerov* [Stability of the sides of quarries]. Minsk, BNTU Publ., 2016. 43 p.

Received: 16 June 2020.

Information about the authors

Maxim Yu. Baborykin, chief specialist, Special Institute for Engineering Survey, LTD «NC «Rosneft» – Research-and-Technical Centre».

УДК 553. 98(479.24): 550.8.072

ПЕРСПЕКТИВЫ НЕФТЕГАЗОНОСНОСТИ АНТИКЛИНАЛЬНОЙ ЗОНЫ ХАЛИ-НЕФТ ДАШЛАРЫ В СВЯЗИ С ЕЁ ПАЛЕОТЕКТОНИЧЕСКИМИ УСЛОВИЯМИ

Мухтарова Хурман Зиядхан гызы¹,
kmtkhtarova.khuraman@mail.ru

Насибова Гюльтар Джумшуд гызы¹,
gultar_nasibova_1@yahoo.com

¹ Азербайджанский Государственный университет нефти и промышленности,
Азербайджан, AZE1010, г. Баку, пр. Азадлыг, 34.

Актуальность. Абшеронский нефтегазоносный район, где были проведены исследования, является одним из продуктивных в Азербайджане. Цель поисково-разведочных работ в основном заключается в увеличении добычи углеводородов, а это достигается выявлением новых нефтегазоносных объектов. С этой точки зрения в антиклинальном поясе Хали-Нефт Дашилары в разрезе палеоген-миоценовых отложений выявление залежей, связанных с антиклинальными и неантиклинальными типами ловушками, имеет важную практическую особенность и это однозначно сыграет немаловажную роль в повышении добычи нефти и газа в республике. Наши исследования были проведены по определяющим нефтегазоносность критериям: геотермическим, литофаunalным, тектоническим, палеотектоническим и т. д., по стратиграфическому разрезу палеоген-миоцен и плиоцена для определения новых объектов.

Цель: определить с геотермической точки зрения в какой зоне нефтегазообразования в настоящее время находятся отложения продуктивной толщи и, в соответствии с этим, уточнить перспективность зоны, а также исследовать распространенность неантиклинальных ловушек в связи с палеотектоническими особенностями и конседиментационным развитием зоны.

Объекты: отдельные структуры, представляющие антиклинальную зону Хали-Нефт Дашилары, свиты нижнего отела продуктивной толщи.

Методы. Изменения общей мощности и песчанистости отложений продуктивной толщи в исследуемых структурах были проанализированы в локальном и региональном направлениях, были построены соответствующие диаграммы, отражающие закономерности изменения мощности и песчанистости по свитам. Наряду с этим были построены палеопрофили, отражающие палеотектоническое развитие структур антиклинальной зоны Хали-Нефт Дашилары.

Результаты. Построение графика скорости осадконакопления и, в связи с этим, анализ данных, изучение палеотемпературных условий Пираллахи-Келькорской впадины и проведенный анализ позволяют определить время нахождения отложений как продуктивной толщи, так и нижележащих отложений миоцена, палеогена и мезозоя в главной зоне нефтегазообразования, а также сопоставить главные этапы миграции со временем образования структур в пределах данной территории. Результаты всех исследований, проведенных в этом направлении, позволяют утверждать, что область исследований и ее окрестности также являются перспективными с точки зрения нефтегазоносности.

Ключевые слова:

Мощность, песчанистость, перспективность, зона, структура, отложения, палеопрофиль, продуктивная толща, палеотектоника, нефть, газ.

Введение

Абшеронский архипелаг с тектонической точки зрения является морским продолжением юго-восточного погружения мегаантиклиниориума Большого Кавказа [1].

В морской акватории Абшеронского нефтегазоносного района было обнаружено 19 нефтегазоконденсатных месторождений: Западный Абшерон, Абшерон Кюпеси, Чилов Адасы, Ази Асланов, Палчыг Пильпилеси, Нефт Дашилары, Гюнешли, Чыраг, Азери, Кяпаз, Дарвин Кюпеси, Пираллахи, Гюргян-дениз, Джануб, Джануб-2, Гум-дениз, Бахар, Шах-дениз, 8 Марта [2].

Кроме указанных нефтегазоконденсатных месторождений были обнаружены и подготовлены к глубинному поисково-разведочному бурению еще 13 перспективных структур: Шимали Абшерон, Хазри, Арзу, Дан Улдузу, Ашрефи, Айпара, Хамдам, Гошадаш, Новханы, Гарабах, Сайяр, Саба, Абшерон (рис. 1).

Отложения, присутствующие в геологическом строении участков, относящихся к Абшеронскому архипелагу, охватывают довольно обширный стратиграфический интервал от палеогена до четвертичного периода.

На площадях были пробурены, соответственно, Хали – 15, Чилов адасы – 54, Ази Асланов – 9, Палчыг Пильпилеси – 56 поисково-разведочных скважин. На площади Хали в сважинах 3, 6, 10 отложения продуктивной толщи (ПТ) и подстилающие их отложения представлены глинистой (пелитовой) и песчанистой (псаммитовой) фациями.

Неперспективное с точки зрения нефтегазоносности поднятие Хали является брахиантиклинальной складкой, простирающейся с северо-запада на юго-восток, величиной $12,5 \times 4,5$ км. Вдоль оси поднятия проходит крупный продольный разрыв, в результате чего северо-восточное крыло надвинуто на опустившееся юго-западное. Другим продольным разломом юго-западное крыло разделяется на две части, что привело к более опущенному (по сравнению с северо-восточным) юго-западному крылу. Кроме этих разрывных нарушений структура осложнена и попечерными разрывами, которые придают складке блоковый характер. Ввиду малого количества пробуренных здесь скважин, небольшого объема проведенных исследований, скучного материала особенности дан-

ной складки освещены в данной статье невсесторонним образом [3, 4].

Структура Чилов асады имеет то же простижение, что и Хали, с размерами 10×4 км. Складка близка к симметричной, углы залегания в крыльях составляют 55–80° (рис. 2).

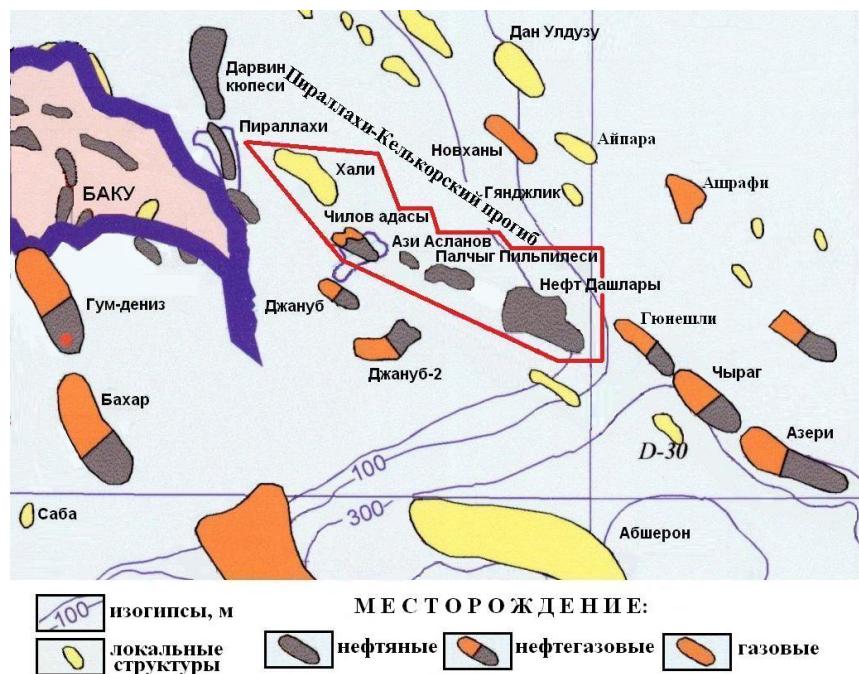


Рис. 1. Абшеронский нефтегазоносный район. Обзорная карта
 Fig. 1. Absheron oil and gas region. General map

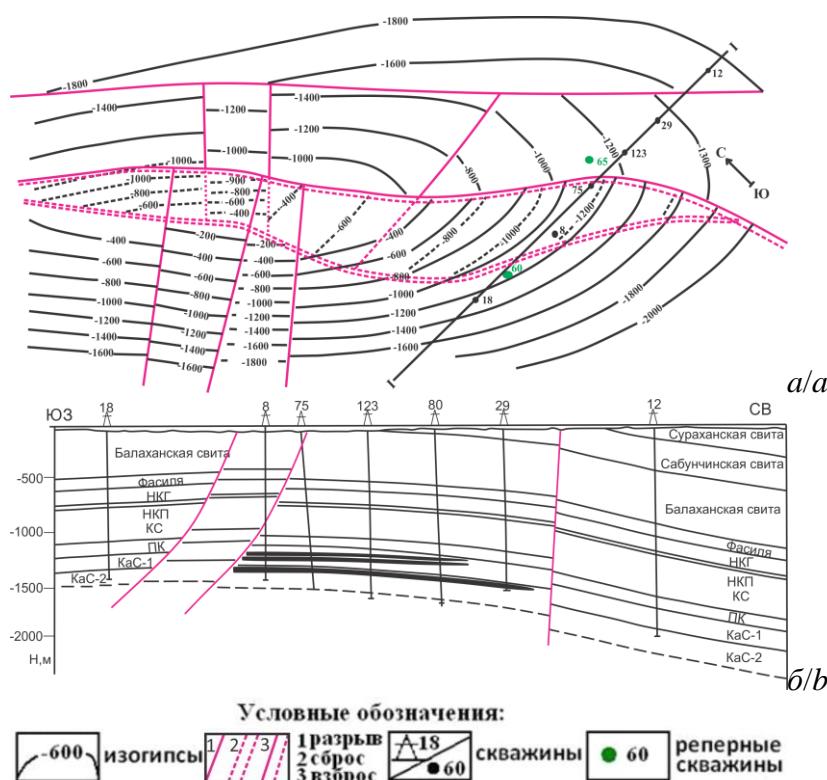


Рис. 2. Месторождение Чилов асады: а) структурная карта по кровле калинской свиты продуктивной толщи (масштаб 1:25000); б) профиль по линии I-I (масштаб 1:10000)
 Fig. 2. Chilov adasy oilfield: a) structural map for the top of the Gala suite of the productive series (scale 1:25000); b) cross-section through the line I-I (scale 1:10000)

Складку осложняют разрывы продольного и поперечного характера. Основные продольные разрывы надвижного типа. Юго-западное крыло надвинуто на северо-восточное. Складка расчленена на 10 блоков многочисленными поперечными разрывами амплитудой 250 м.

Структура Ази Асланов, величиной $2,9 \times 1,4$ км (рис. 3), с тектонической точки зрения является асимметричной складкой. Присводовая часть и северо-восточное крыло складки осложнены продольными разрывами амплитудой 250 м. Указанные относительно объема имеющегося материала выше данные о площади Хали полностью можно отнести и к структуре Ази Асланов. Несмотря на недостаточность информации, данная структура является более интересной с точки зрения перспектив нефтегазоносности ввиду ее расположения между двумя месторождениями с промышленными запасами углеводородов [5].

С тектонической точки зрения структура Палтыг Пильпилеси (рис. 4) представляет собой брахиантиклинальную складку северо-запад–юго-восточного простирания.

Складка осложнена многочисленными продольными и поперечными разрывами и расчленена на несколько блоков. Складка размерами 9×1 км расчленена продольными нарушениями на три блока и проявляет себя в виде горста юго-восток–северо-западного направления.

На площади Хали при проведении работ по опробованию и освоению скважины 10 в интервале 966–1048 м из калинской свиты (КаC) была получена нефть дебитом 0,5 т/сут [6, 7].

На площади Чилов асады КаC дала нефть в 30 скважинах. На площади Ази Асланова из КаC в скв. 1 во время опробования с интервала 1806–1813 м была получена нефть дебитом 25 т/сут, в скв. 3 с интервала 1902–1923 м – нефть дебитом 18 т/сут, газ – 100–150 тыс. м³/сут, в скв. 5 с интервала 1781–1817 м – газ дебитом 2 тыс. м³/сут, в скв. 6 с интервала 1574–1610 м – нефть дебитом 30 т/сут, с интервала 1729–1743 м – нефть дебитом 8–12 т/сут [8, 9].

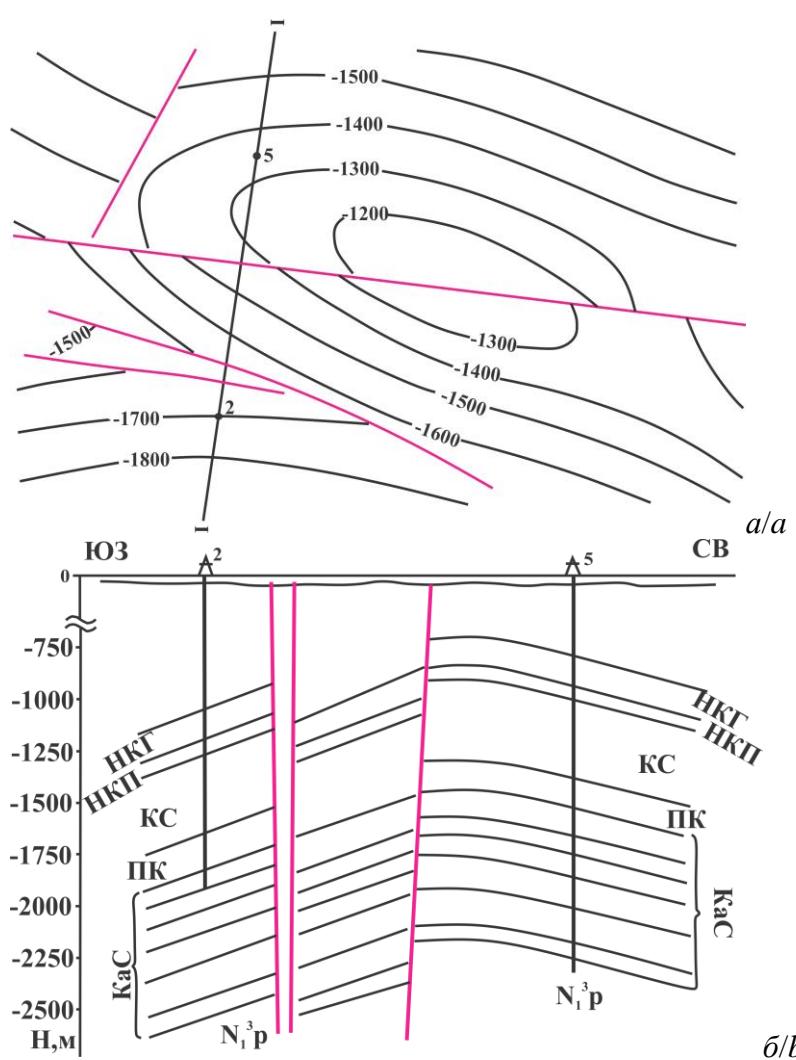


Рис. 3. Месторождение Ази Асланов: а) структурная карта по кровле подкирмакинской свиты продуктивной толщи (масштаб 1:25000); б) профиль по линии I-I (масштаб 1:10000) (Условные обозначения см. на рис. 2)

Fig. 3. Hazi Aslanov oilfield: a) structural map for the top of the Girmakialti suite of the productive series (scale 1:25000); b) cross-section through the line I-I (scale 1:10000) (see legend for Fig. 2)

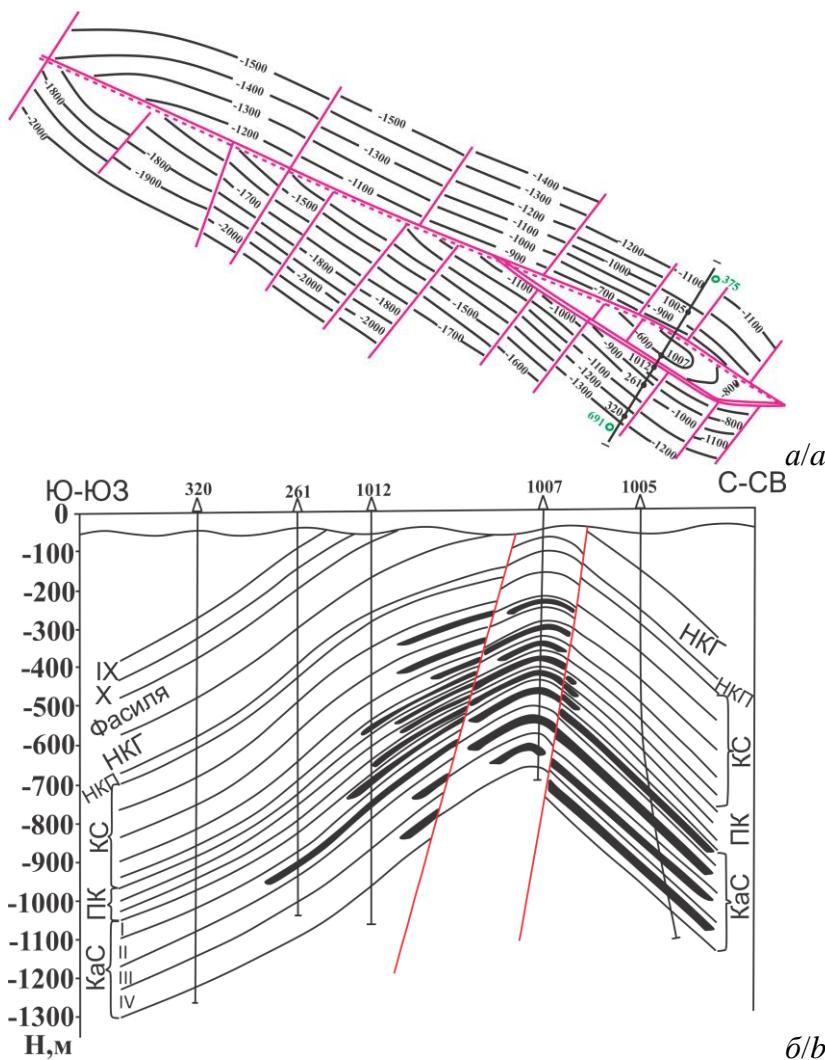


Рис. 4. Месторождение Палчыг Пильпилеси: а) структурная карта по кровле IV горизонта калинской свиты продуктивной толщи (масштаб 1:30000); б) профиль по линии I-I (масштаб 1:15000) (Условные обозначения см. на рис. 2)

Fig. 4. Palchig Pilpilesi oilfield: a) Structural map for the top of the horizon IV of the Gala suite of the productive series (scale 1:30000); b) cross-section through the line I-I (scale 1:15000) (see legend for Fig. 2)

На площади Палчыг Пильпилеси из КаC из 46 скважин были получены углеводороды. Надо отметить, что в Абшеронской зоне все разведанные месторождения нефти и газа связаны с плиоценовыми отложениями. В целом подверженность площадей Пираллахи, Гюргян-дениз, Хали, Чилов асады, Джануб, Ази Асланов, Палчыг Пильпилеси вымыванию в определенные периоды времени, в особенности к концу нижнего плиоцена, способствовала либо частичному, либо же полному вымыванию отложений верхней ПТ, а также повлияло на изменение их литологического состава, привело к выклиниванию ряда пластов. Вышеописанные процессы оказали прямое либо косвенное влияние на формирование ловушек неантеклинального типа, привели к определенным ограничениям с точки зрения перспектив нефтегазоносности, которые в данных структурах связаны с нижним отделом ПТ, а если точнее, с отложениями кирмакинской свиты (КС), подкирмакинской свиты (ПК) и КаC [10].

Методы

Были рассмотрены данные кернов из 69 скважин, которые содействовали попыткам проследить песчанистость и мощность горизонтов и свит ПТ.

Исследования были проведены для всех структур. Было изучено изменение общей мощности и песчанистости осадков ПТ как по площади, так и в региональном масштабе.

Средняя мощность надкирмакинской песчанистой (НКП) свиты на структуре Чилов асады в 34 м, на Ази Асланов – 38 м, Палчыг Пильпилеси – 39 м и на Нефт Дашлары – 46 м указывает на более интенсивное осадконакопление в юго-восточном направлении (табл. 1). Средние показатели песчанистости данных отложений в 24 % для площади Ази Асланов, 39 % – для Чилов асады, 94 % – для Нефт Дашлары и 19 % – для Палчыг Пильпилеси позволяют высказать предположение о том, что по всей зоне структура Палчыг Пильпилеси в данный век являлась наиболее глубоководным участком бассейна (табл. 2).

На основе средних значений табл. 1, 2 были построены диаграммы изменения мощности (рис. 5) и песчанистости (рис. 6) для четырех свит ПТ по отдельности для всей антиклинальной зоны Чилов адасы–Нефт Дашилары, которые были использованы при определении там, где это возможно, закономерностей во взаимоотношениях мощности и песчанистости этих же свит.

Таблица 1. Средние значения мощностей отдельных свит продуктивной толщи антиклинальной зоны Чилов адасы–Нефт Дашилары

Table 1. Average thickness values for the individual productive series suites of the Chilov adasi–Neft Dashlari anticline zone

| Структуры/Structures | Средние значения мощностей отдельных свит ПТ Average thickness values for individual PS suites | | | |
|--|---|-------|-------|---------|
| | НКП/NKP | КС/KS | ПК/PK | КаC/KaS |
| Чилов адасы/Chilov adasi | 34 | 287 | 90 | 433 |
| Ази Асланов/Azi Aslanov | 38 | 364 | 92 | 606 |
| Палчыг Пильпилеси Palchig Pilpilesi | 39 | 273 | 117 | 411 |
| Нефт Дашилары Neft Dashlari | 46 | 298 | 80 | 170 |

Таблица 2. Средние значения песчанистости отдельных свит продуктивной толщи антиклинальной зоны Чилов адасы–Нефт Дашилары

Table 2. Average sandiness values for the individual Productive Series suites of the Chilov adasi–Neft Dashlari anticline zone

| Структуры/Structures | Средние значения песчанистость отдельных свит ПТ Average sandiness values for individual PS suites | | | |
|--|---|-------|-------|---------|
| | НКП/NKP | КС/KS | ПК/PK | КаC/KaS |
| Чилов адасы/Chilovadasi | 39 | 6 | 46 | 28 |
| Ази Асланов Azi Aslanov | 24 | 3 | 35 | 29 |
| Палчыг Пильпилеси Palchig Pilpilesi | 19 | 10 | 32 | 31 |
| Нефт Дашилары Neft Dashlari | 94 | 3 | 45 | 22 |



Рис. 5. Диаграмма изменения средних значений мощностей отдельных свит продуктивной толщи антиклинальной зоны Чилов адасы–Нефт Дашилары

Fig. 5. Chart of the average thickness values variation for individual productive series suites of the Chilov adasi–Neft Dashlari anticline zone

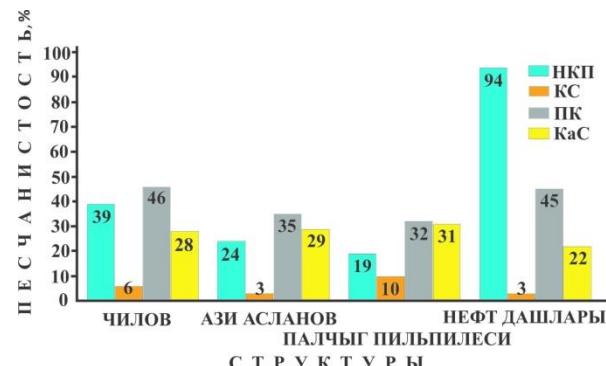


Рис. 6. Диаграмма изменения средних значений песчанистости отдельных свит продуктивной толщи антиклинальной зоны Чилов адасы–Нефт Дашилары

Fig. 6. Chart of the average sandiness values variation for individual productive series suites of the Chilov adasi–Neft Dashlari anticline zone

Средняя мощность свиты КС, в разы превосходящая таковую НКП, при максимальном значении 364 м на площади Ази Асланов составляет 287 м на Чилов адасы, 273 м – на Палчыг Пильпилеси, 298 м – Нефт Дашилары, а песчанистость – в несколько раз меньше, т. е. изменяется в пределах 3–10 % (учитываются средние значения песчанистости отдельных структур), что дает возможность прийти к выводу о том, что в данный промежуток времени дно бассейна располагалось на относительно большей глубине. Следует отметить, что мощность КС в 364 м на структуре Ази Асланов антиклинальной зоны, а песчанистость в 10 % на площади Палчыг Пильпилеси, будучи максимальными, уменьшаются как в северо-западном, так и в юго-восточном направлениях. Значения песчанистости на участках Ази Асланов и Нефт Дашилары составили 3 %, а на Чилов адасы – 6 %.

Минимальное значение средней мощности свиты ПК в 80 м наблюдается на структуре Нефт Дашилары, а максимальное – 117 м – на Палчыг Пильпилеси (Ази Асланов – 92 м, Чилов адасы – 90 м). Мощность данной свиты в пределах антиклинальной зоны падает от участка Палчыг Пильпилеси как в северо-западном, так и в юго-восточном направлениях. Песчанистость составляет 46 % на Чилов адасы, 45 % – на Нефт Дашилары, 25 % – на структуре Ази Асланов и 32 % – на Палчыг Пильпилеси. Таким образом, мощность и песчанистость на площади Палчыг Пильпилеси характеризуются обратной пропорциональной зависимостью, вдоль антиклинальной зоны Чилов адасы – Ази Асланов – Палчыг Пильпилеси – Нефт Дашилары наблюдается почти симметричное изменение песчанистости (ее уменьшение к центральной части). Вышеуказанные данные указывают на отсутствие закономерности между песчанистостью и мощностью.

Мощность отложений КаC свиты достигают максимального значения в 606 м на структуре Ази Асланов, от которой отмечается ее сокращение как в северо-западном, так и в юго-восточном направлениях (на Чилов адасы – 433 м, Палчыг Пильпилеси – 411 м,

Нефт Дашилары – 170 м). Максимальная песчанистость этих же отложений при значении 31 % наблюдается на структуре Палчыг Пильпилеси. Песчанистость падает от данной площади в северо-западном направлении к структурам Ази Асланов и Чилов адасы, составляя 28–29 %, а также к юго-востоку, в сторону Нефт Дашилары, со значением 22 %.

Проведенные исследования показывают, что свиты КС и КаС характеризуются большой мощностью, а свиты НКП и ПК – высокой песчанистостью.

Увеличение мощности (взяв структуру Ази Асланов в качестве точки отсчета) в северо-западном и в юго-восточном направлениях связано со структурно-тектоническим развитием антиклинальной зоны. Вышеуказанные закономерности наблюдаются ввиду того, что указанная антиклинальная зона сформировалась на оси Абшероно-Прибалханского структурного мегаседла.

Нами также были рассмотрены перспективы нефтегазоносности антиклинальной зоны Хали-Нефт Дашилары в связи с особенностями палеоразвития локальных структур этой зоны [11–13].

Поднятия этой зоны в основном относятся к структурам диапирого типа, которые были осложнены грязевым вулканизмом – показателем перспектив нефтегазоносности [14–16].

С целью определения времени образования и изучения особенностей дальнейшего развития поднятий Чилов адасы и Палчыг Пильпилеси были построены и проанализированы палеопрофили верхнего и нижнего отделов ПТ, а также конца позднего плиоцена.

Обсуждение

По палеопрофилю для конца нижнего отдела ПТ было выявлено, что структура Чилов адасы начала свое формирование не позднее плиоцена, и даже к этому времени была осложнена двумя тектоническими нарушениями [17]. Наличие именно этих нарушений дают основание для предположения более раннего заложения формирования структуры. Уменьшение мощности отложений нижнего отдела ПТ к сводовой части структуры доказывает, что развитие складки происходило одновременно с осадконакоплением, но скорость осадконакопления уступала ему.

По палеопрофилю, построенному к концу второго полувека ПТ (верхний отдел), видно, что, несмотря на заложение еще двух тектонических нарушений, общий темп развития складки в данный промежуток времени не превышал таковой нижнего отдела.

Палеопрофиль, построенный к концу Акчагильского века, дает возможность утверждать, что в данный век развитие структуры происходило относительно менее интенсивными темпами в сравнении с предыдущим геологическим промежутком времени. Анализируя палеопрофили, построенные для отдельных промежутков геологического времени, следует отметить, что поднятие Чилов адасы развивалось в виде диапира с глинистым ядром и имеет коседименационный характер. В четвертичный век поднятие Чилов адасы развивалось чрезвычайно интенсивно (рис. 7).

Из палеопрофиля, построенного к концу нижнего отдела ПТ для структуры Палчыг Пильпилеси, выясняется, что формирование и развитие этого поднятия началось не позднее плиоцена. Развиваясь структура одновременно осложнялась разрывным нарушением. Вероятно, этот разрыв в начале века ПТ (в нижнем) «омолаживался», а это дает возможность считать, что структура была сформирована до плиоцена. Омоложение разрыва в нижнем полувеке ПТ доказывает, что образование этой складки совпадало одновременно с осадконакоплением. Но в верхнем полувеке ПТ скорость развития осадконакопления отставала от раннего полувека ПТ. По палеопрофилю, построенному для конца абшеронского века, можно сказать, что скорость развития складкообразования относительно верхнему полувеку ПТ была высокой.

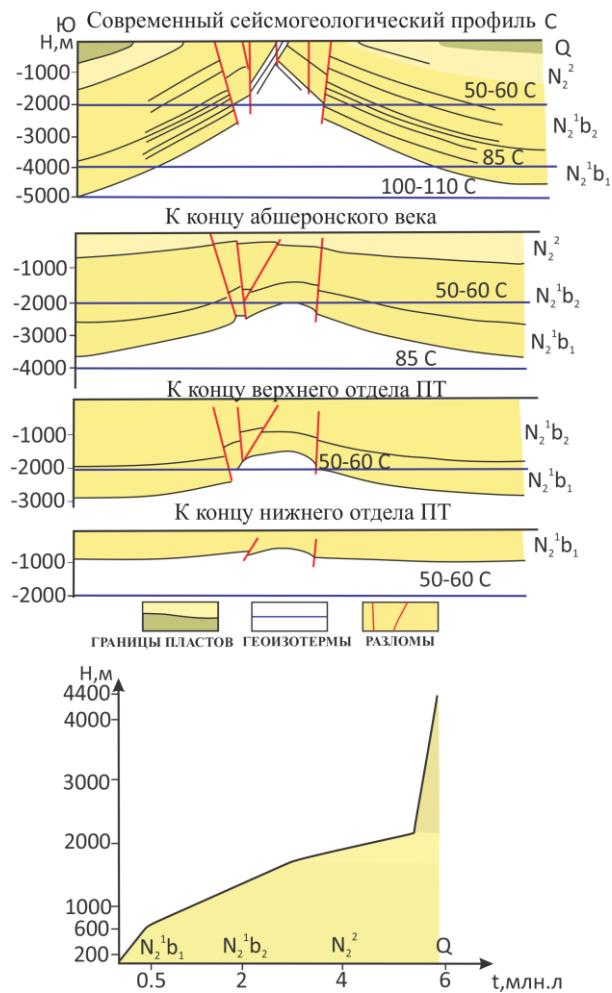


Рис. 7. Палеопрофили и график интенсивности развития поднятия Чилов адасы

Fig. 7. Paleoprofiles and evolution intensity graph of the Chilov adasy uplift

В позднем плиоцене скорость осадконакопления была выше, чем скорость развития складки, как и в предыдущем полувеке.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что поднятие Палчыг Пильпилеси, относящееся к диапи-

ровому типу структуры в рассматриваемом геологическом времени, имело конседиментационный характер развития. Надо отметить, что в четвертичный век развитие этой структуры характеризуется большой интенсивностью. Об этом свидетельствует и тот факт, что если до четвертичного века высота складки достигала 1050 м, то только в период этого века ее высота прибавилась на 1300 м, и в результате этого складка была еще более осложнена нарушениями тектонического характера и ее сводовая часть была смыта еще более. Из графика развития интенсивности складки выясняется, что скорость развития складки со временем усиливалась и именно в четвертичном веке складкообразование на этой территории достигло самой большой интенсивности развития (рис. 8).

Поднятия Чилов асады и Палчыг Пильпилеси, которые относятся к северной части Абшеронского архипелага, сформировались в южной части Пираллахи-Келькорской впадины на тектонической зоне Хали-Нефт Дашлары [15, 17]. На палеопрофилях, построенных к концу нижней ПТ (ранней), явно наблюдается, что эти складки начинали формироваться не позднее раннего плиоцена, а по некоторым фактам в миоцене. Это можно утверждать по соображениям того, что в ЮКВ в кайнозойских отложениях реологически активные тела, т. е. не томпонированные глины (вещества – кутля), играют непосредственную роль в формировании диапировых структур и имеют именно олигоцен-миоценовый возраст.

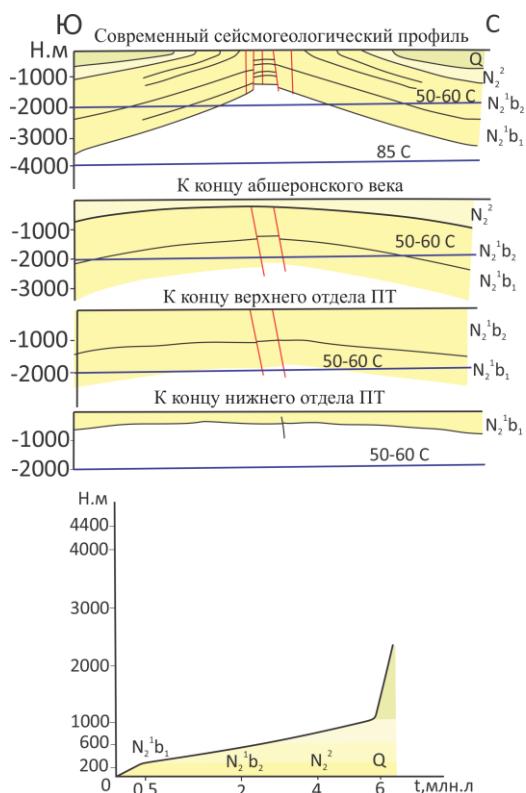


Рис. 8. Палеопрофили и график интенсивности развития поднятия Палчыг Пильпилеси (условные обозначения см. рис. 7)

Fig. 8. Paleoprofiles and the evolution intensity graph of the Palchig Pilpilesi uplift (see legend for Fig. 7)

Проведенный анализ дает возможность прийти к выводам о том, что в рассматриваемый геологический период антиклинальные складки Чилов асады и Палчыг Пильпилеси, несмотря на различную интенсивность развития, эволюционировали как диапировые складки и характеризуются конседиментационным режимом. Конседиментационное развитие этих поднятий способствует развитию в их пределах ловушек неантклинального типа, связанных с выклиниванием или же с литофацальным изменением пород в крыльевых частях структур [18].

Как известно, в седиментационном бассейне основная стадия миграции УВ начинается именно тогда, когда потенциальные нефтематеринские пласти входят в главную нефтепораждающую зону и этим превращаются в нефтепораждающий пласт. Надо отметить, что осадки возраста плиоцен-четвертичного века антиклинальной зоны Хали-Палчыг Пильпилеси имели благоприятные условия для накопления и сохранности в них ОВ. Именно здесь по условиям палеотемпературного режима можно определить несколько главных стадий миграции УВ. Для более детального решения этого вопроса нами были построены на основе современного сейсмического профиля палеопрофили для нижнего и верхнего отделов ПТ, и к концу абшеронского века. Кроме этого, выявлены палеотемпературные условия этих стратиграфических единиц. Основываясь на результатах исследований других ученых и по данным отдельных скважин нами проведена палеогеотемпературная линия в палеопрофилях Чилов асады и Палчыг Пильпилеси (рис. 7, 8) [15, 19, 20].

По данным палеореконструкций, проведенных на основе построенных палеопрофилей, где обозначены границы палеоизотерм, можно прийти к выводу о том, что осадки нижней ПТ находятся в зоне протокатагенеза [15].

По данным графических материалов, т. е. палеопрофилей и палеоизотерм (рис. 7, 8), построенных для осадков верхней ПТ, утверждают, что большая часть отложений нижней ПТ в результате погружения находится в интервале 2000–3000 м; эта зона характеризуется как главная зона нефтепорождения (ГЗН). По палеопрофилям и палеоизотермам, построенным для конца абшеронского века, выясняется, что осадки нижней ПТ полностью, а верхней ПТ частично (относительно малая часть) погружены в ГЗН, которая находится на глубине 2000–4000 м.

Современное положение геоизотерм поднятий Чилов асады и Палчыг Пильпилеси было определено по температурным данным, взятым из скважин № 375, 691 площади Чилов асады и скважин № 60, 65 площади Палчыг Пильпилеси, а также по расчетам, основанным на исследовательских работах ряда ученых. Из-за нехватки сведений, касающихся именно изучаемой зоны, нами были использованы данные по территории впадины Пираллахи-Келькор, в пределах которой сформировалась антиклинальная зона Хали-Нефт Дашлары [15, 19].

По литолого-стратиграфическому разрезу изучаемой территории можно прийти к выводам о том, что

на данной территории начиная с юрской эпохи до современного геологического времени осадконакопление происходило в бассейнах, имеющих различные глубины. Надо отметить, что осадконакопление происходило в довольно благоприятных с литофацальной точки зрения условиях для накопления и сохранения ОВ и по этой причине каждый литофацальный комплекс можно рассматривать как потенциально нефтематеринский.

В этом бассейне от юры до позднего мела средняя скорость осадконакопления составляла 124 м/млн лет (рис. 9). Такой показатель скорости осадконакопления свойственен нефтегазоносным бассейнам с высокой активностью. Исследования ученых показали, что в осадках при скорости в 130 м/млн лет может накопиться до 2 % органического вещества (ОВ) [10].

Как было отмечено ранее, в стратиграфическом интервале от верхнего мела до нижнего плиоцена средняя скорость осадконакопления была равна 30 м/млн лет. При данных палеогеографических условиях в осадках этого возраста могло быть накоплено лишь 0,3 % ОВ [10], и поэтому сложно предположить наличие нефтематеринских пород в данном стратиграфическом интервале.

В интервале нижний плиоцен–четвертичный век средняя скорость осадконакопления составляла 770 м/млн лет, что свидетельствует о наличии благоприятных условий для накопления достаточного количества ОВ в осадках. Как известно, в присутствии других положительных факторов, при скорости осадконакопления, превышающей 660 м/млн лет, в осадочных комплексах бассейнов могло, предположительно, накопиться до 11–18 % ОВ.

Проведенные исследования дают возможность прийти к выводам о том, что в стратиграфическом интервале юра–ранний мел и ранний плиоцен–четвертичный век на изучаемой территории существовали наиболее благоприятные условия для накопления и сохранения ОВ.

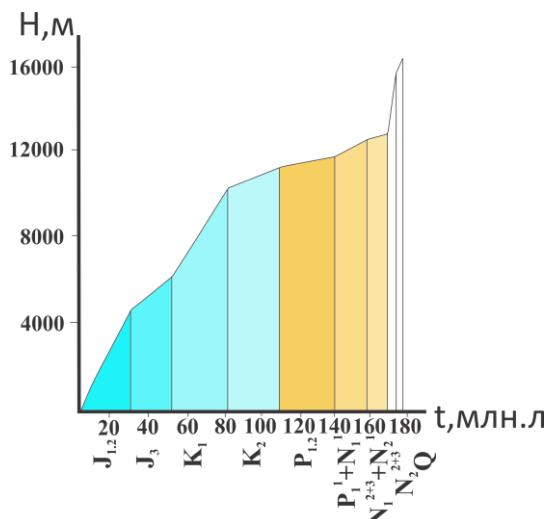


Рис. 9. График скорости осадконакопления в Пираллахи-Келькорской впадине

Fig. 9. Deposition rate diagram for the Pirallahi-Kelkor depression

Изучая геотермическую обстановку бассейна, можно определить глубины температурных интервалов, соответствующих основным зонам нефтегазообразования. Таким образом, данный анализ позволяет определить, в какой зоне в настоящее время находится каждый потенциальный нефтематеринский пласт [15].

Ввиду того, что построенные на основе современных сейсмогеологических профилей палеопрофили не охватывают обширный стратиграфический интервал времени, в целях более детального анализа основных этапов миграции углеводородов (УВ) были использованы научные работы в области Пираллахи-Келькорской впадины, где расположена антиклинальная зона Хали-Чилов-Палчыг Пильпилеси [10, 15, 16].

На основе данных глубокого бурения в Пираллахи-Келькорской впадине было установлено, что осадочный чехол в пределах территории исследований был изучен вплоть до нижнего мела. Более глубокие части разреза (юрские отложения) были описаны на основании данных сопредельных территорий.

Для изучения более глубоких частей разреза на основании сейсмогеологического профиля, проходящего перпендикулярно простиранию Пираллахи-Келькорской впадины, были построены палеотектонические профили для юры, нижнего мела, миоцена и конца плиоцена. Кроме этого, к концу каждого из вышеуказанных стратиграфических единиц были установлены палеотемпературные условия суббассейна [20, 21].

Согласно палеопрофилю конца юрского периода наблюдается глубина залегания кристаллического фундамента в 6000 м и погружение юрских отложений с 1000 до 4000 м в пределы главной зоны нефтегазообразования (ГЗН).

В конце нижнего мела верхняя часть юры и большая часть нижнего мела находятся в ГЗН. В это время основная масса юрских отложений вошла в главную зону газообразования (ГЗГ).

В конце миоцена в ГЗН находилась основная часть меловых, а в ГЗГ больше половины юрских и нижняя часть меловых отложений. В конце плиоцена вторая половина юрских и большая часть нижнемеловых отложений вошли в ГЗГ, а верхняя часть нижнемеловых и плиоценовых отложений перешли в ГЗН.

Так как Пираллахи-Келькорская впадина была многоочаговым суббассейном, в процессе своего развития она охватывала несколько главных этапов миграции УВ. Несмотря на то, что эти миграционные этапы происходили в разные геологические времена (относительно молодые стратиграфические комплексы погребали более древние), они последовательно сменяли друг друга [15].

Так, например, к концу нижнего мела большая часть отложений накопилась на отложениях юры, тогда как юрские отложения, находясь в ГЗН, не покинули эту зону. Это свидетельствует о том, что в конце нижнего мела главный этап миграции УВ соответствовал отложениям юры и первой половины нижнего мела.

В конце миоцена отложения верхнего мела и палеогена, содержащие в достаточном количестве ОВ, погрузились в ГЗН. Это указывает на то, что в конце миоцена главный этап миграции охватывал нижний и верхний мел и первую половину палеогена. В конце плиоцена отложения верхней половины нижнего мела и нижнего плиоцена находились в ГЗН и отложения нижнего мела и нижнего плиоцена находились в главной зоне миграции УВ. Наконец, в настоящее время в ГЗН находятся отложения от верхов нижнего мела до низов верхнего плиоцена. Как видно, главный этап миграции охватывает отложения нижнего мела и нижнего плиоцена [15].

По данным сейсмологии можно прийти к выводу о том, что до периода формирования складок Чилов асады и Палчыг Пильпилеси нефтематеринские породы нижней части юрских и меловых отложений уже вошли в ГЗГ, пройдя зону ГЗН не позднее конца миоцена или же начала раннего плиоцена. Результаты исследований дают возможность утверждать, что майкопская серия вошла в ГЗН несколько позже и данная ситуация соответствует геологическому времени, когда вышеизложенные локальные поднятия уже были сформированы.

Весь вышеописанный анализ дает основание утверждать, что площадь Ази Асланов, расположенная среди исследуемых структур, а также расположенная к северо-западу от структуры Чилов асады, т. е. в начале зоны, и площадь Хали могут считаться перспективными.

Результаты

Таким образом, можно утверждать, что главный этап миграции УВ, порожденных отложениями майкопской серии, имел место после формирования локальных поднятий, что позволяет предполагать высокие перспективы нефтегазоносности этих структур.

Если учесть, что формирование рассматриваемых локальных поднятий произошло не позднее, и даже ранее, миоценовой эпохи, можно сказать, что их природные резервуары могут быть насыщены УВ, образованными в отложениях мелового, палеогенового и нижнеплиоценового возраста. Ввиду того, что до четвертичного века интенсивность развития складок отставала от скорости осадконакопления, такая ситуация создавала благоприятные условия для сохранения УВ, насыщающих ловушки.

Однако отложения ПТ не полностью вошли в ГЗН и не полностью реализовали свой нефтепродуцирующий потенциал. Данные отложения, лишь частично присутствуя в ГЗН, не всецело участвуют в процессе нефтепорождения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зоненшайн Л.П., Кузьмин М.И., Натапов Л.М. Тектоника литосферных плит территории СССР. – М.: Недра, 1990. – 328 с.
2. Narimanov A.A. Concept on the formation of the oil and gas fields in the South Caspian Basin // Transaction of the International Academy of Science. – 2005–2006. – V. 2. – P. 483–499.
3. Мухтарова Х.З., Насибова Г.Д. Перспективы нефтегазоносности возможных залежей нестандартного типа (литологически ограниченного) антиклинального пояса Хали-Кяпаз в связи с его историей геологического развития // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2018. – № 10. – С. 8–20.
4. Рахманов И.П. Грязевые вулканы и их значение в прогнозировании нефтегазоносности недр. – М.: Недра, 1987. – 271 с.

Таким образом, как о Хали-Палчыг Пильпилеси, так и о других исследуемых месторождениях Пираллахи-Келькорской впадины можно высказать мнение о том, что скопившиеся в ловушках в разных фазовых состояниях УВ сформировались благодаря нефтепродуцирующему потенциалу отложений, в основном юры, раннего мела и палеогена.

Выводы

По геолого-геофизическим данным антиклинальной зоны Чилов асады–Нефт Дашилары и согласно изучению истории геологического развития, а также анализов, проведенных в результате палеотемпературного, литофацциального моделирования, можно прийти к выводам:

1. В результате сравнительного анализа мощностей и песчанистости площадей было определено, что по антиклинальной зоне песчанистость увеличивается в юго-восточном направлении.
2. Локальные поднятия исследуемой антиклинальной зоны конседиментационного происхождения, их формирование началось не позднее миоцена и до четвертичного века скорость их развития уступала скорости осадконакопления. Темпы развития локальных поднятий в четвертичном веке существенно увеличились, что привело к размытию сводовых частей структур, частичному разрушению и повторному формированию УВ залежей.
3. Конседиментационное развитие поднятий исследуемой антиклинальной зоны способствует развитию в их пределах ловушек неантиклинального типа, связанных с выклиниванием или же с литофацциальным изменением пород в крыльевых частях структур.
4. До того, как сформировались поднятия Чилов асады и Палчыг Пильпилеси, нефтематеринские породы низов юры и нижнего мела уже вошли в ГЗГ, пройдя зону ГЗН не позднее конца миоцена или же с начала раннего плиоцена. Майкопская серия вошла в ГЗН несколько позже, и данная ситуация соответствует геологическому времени, когда вышеизложенные локальные поднятия уже были сформированы. Главный этап миграции УВ, порожденных отложениями майкопской серии, имел место после формирования локальных поднятий, что позволяет предполагать высокие перспективы нефтегазоносности этих структур.
5. Вышеописанный анализ дает основание утверждать, что площадь Ази Асланов, расположенная среди исследуемых структур, а также к северо-западу от структуры Чилов асады, т. е. в начале зоны, и площадь Хали могут считаться перспективными.

5. Мухтарова Х.З., Насибова Г.Д. Перспективные нефтегазоносные структуры Абшеронского архипелага ЮКВ и основные направления их дальнейших исследований // International Scientific and Practical Conference: Worldscience. – Abu-Dhabi, UAE, August, 2016. – Р. 32–39.
6. Mukhtarova K.Z., Nəsibova G.C. Oil and gas content perspectives of potential non-standard pool types (lithologically confined) of Khali-Kapaz anticlinal belt in connection with its geological development history // National Science Review. – December 2017. – V. 4. – Iss. 4. – P. 1397–1416.
7. Hydrocarbon systems of the South Caspian basin / I.S. Guliyev, P.Z. Mamedov, A.A. Feyzullayev, D.A. Huseynov, F.A. Kadirov, E.H. Aliyeva, M.F. Tagiyev. – Baku: Nafta-Press, 2003. – 206 p.
8. Мухтарова Х.З., Насибова Г.Д. Палеотектонические условия формирования структур в Южно-Каспийской впадине и перспективы нефтегазоносности ловушек неантклинального типа // «Геолог Азербайджана». Научный бюллетень Азербайджанского Общества Нефтяных Геологов. – 2017. – № 21. – С. 82–93.
9. Feyzullayev A.A., Guliyev I.S., Tagiyev M.F. Source potential of the Mesozoic-Cenozoic rocks in the South Caspian Basin and their role in forming the oil accumulations in the Lower Pliocene reservoirs // Petroleum Geoscience. – 2001. – V. 7 (4). – P. 409–417.
10. Нариманов Н.Р. Геодинамические аспекты формирования осадочного чехла Южно-Каспийской впадины // Геология нефти и газа. – 2003. – № 6. – С. 26–31.
11. Артошков Е.В. Образование Южно-Каспийской впадины в результате фазовых переходов в нижней части континентальной коры // Доклады Российской Академии Наук. – 2007. – Т. 416. – № 5. – С. 647–652.
12. Нариманов Н.Р. Геодинамическая обстановка обрамления Южно-Каспийской мегавпадины // Геолог Азербайджана. – 2005. – № 10. – С. 26–32.
13. Narimanov A.A. The petroleum systems of the South Caspian Basin // Basin Modelling: Advanced Application. – 1993. – Amsterdam. NPF Special Publication 3. – P. 599–608. URL: <http://www.akifnarimanov.com/akif/extdocs/PetroleumSystemsOfSouthCaspianBasis.pdf> (дата обращения 12.12.2019).
14. Deep petroleum occurrences in the Lower Kura Depression, South Caspian Basin, Azerbaijan: an organic geochemical and basin modelling study / S. Inan, M.N. Yalcin, I.S. Guliev, K. Kuliev, A.A. Feizullayev // Marine and Petroleum Geology. – 1997. – V. 14. – № 7–8. – P. 731–762.
15. Нариманов Н.Р., Халилов Н.О., Хыдырова Р.А. Геотемпературное условие и потенциал нефтегазообразования Пираллахи-Келькорского прогиба // Азербайджанское Нефтяное Хозяйство. – 2002. – № 9. – С. 7–11.
16. Нариманов Н.Н. Влияния геодинамических процессов на нефтегазообразование в Южно-Каспийской впадине // Азербайджанское Нефтяное Хозяйство. – 2008. – № 8. – С. 13–18.
17. Jackson J., Priestley K., Allen M. Active tectonics of the South Caspian Basin // Geophysical Journal International. – 2002. – V. 148. – Iss. 2. – P. 214–245.
18. Салманов А.М., Сулейманов А.М., Магеррамов Б.И. Палеогеология нефтегазоносных районов Азербайджана. – Баку: Mars Print, 2015. – 470 с.
19. Onset of subduction as the cause of rapid Pliocene-Quaternary subsidence in the South Caspian basin / M.B. Allen, L. Anderson, S. Jones, A. Ismail-Zadeh, M. Simmons // Geology. – 2002. – V. 30. – № 9. – P. 775–778.
20. Геотемпературные условия нефтегазоносности мезокайнозойского комплекса Южно-Каспийского бассейна / К.Н. Каграманов, М.С. Бабаев, С.Г. Шпырко, Х.З. Мухтарова // Геофизический журнал. Инст. Геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины. – 2019. – № 5 (42). – С. 222–234.
21. Vahabov U.G. About the structure stages and plans of the Azerbaijan section of South Caspian Basin // Conference Proc. 74th EAGE Conference and Exhibition incorporating. – EUROPEC, 2012. – P. 293–302. URL: <https://www.earthdoc.org/content/serial/2214-4609> (дата обращения 12.12.2019).

Поступила: 18.12.2019 г.

Информация об авторах

Мухтарова Х.З., кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры геологии нефти и газа Азербайджанского Государственного университета нефти и промышленности.

Насибова Г.Д., кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры геологии нефти и газа Азербайджанского Государственного университета нефти и промышленности.

UDC 553.98(479.24): 550.8.072

OIL AND GAS POTENTIAL OF THE KHALI-NEFT DASHLARY ANTICLINE ZONE IN RELATION TO ITS PALEOTECTONIC SETTINGS

Khuraman Z. Mukhtarova¹,
mukhtarova.khuraman@mail.ru

Guitar J. Nasibova¹,
guitar_nasibova_1@yahoo.com

¹ Azerbaijan State Oil and Industry University,
34, Azadlig avenue, Baku, AZ1010, Azerbaijan.

Relevance. The study was carried out in Absheron oil and gas region, which is one of the productive in Azerbaijan. The aim of implemented researches consists in increasing hydrocarbon production which is achieved by identifying new oil and gas reservoirs within deposit. From this point of view reservoirs associated with anticlinal and non-anticlinal types of traps within the Khali-Neft Dashlari anticlinal belt were identified. The approach was based on section Paleogene-Miocene sediments, the identification of reservoirs was associated with anticlinal and non-anticlinal types of traps. Such approach has an important practical feature and this will definitely play an important role in increasing oil and gas production in the republic. Our studies were carried out according to the criteria determining oil and gas potential, such as geothermal, lithofacial, tectonic, paleotectonic, etc. Estimations and attempts to identify new reservoirs were carried out along the stratigraphic profile of the Paleogene-Miocene and Pliocene ages.

The main aim of the research is to determine, from geothermal aspect, present location of the productive series deposits within the oil and gas generation zone and, in this relation, clarify prospectivity of the zone, as well as to investigate the prevalence of non-anticline traps in association with paleotectonic properties and syndepositional evolution of the zone.

Research area: individual structures representing Khali-Neft Dashlari anticline zone, Lower productive series suites.

Methods. Changes in total thickness and sandiness of the productive series deposits within the structures under investigation were analyzed at local and regional scales, the corresponding diagrams reflecting the patterns of changes in thickness and sandiness of individual suites were plotted. Paleoprofiles reflecting the paleotectonic evolution of the structures of the Khali-Neft Dashlari anticline zone were constructed.

Results. Construction of the deposition rate diagram and, in this regard, the data analysis, study of the paleotemperature environment of the Pirallahi-Kelkor depression and the analysis performed allow us to determine the terms of staying of both the productive series and the underlying Miocene, Paleogene and Mesozoic sediments within the main oil and gas formation zone, as well as to compare the major migration stages with the structure formation periods within a given territory. The results of all studies carried out in this direction allow us to state that the research area and its environs are also promising from the point of view of oil and gas potential.

Key words:

Thickness, sandiness, prospectivity, zone, structure, deposit, paleoprofile, productive series, paleotectonics, oil, gas.

REFERENCES

1. Zonenshain L.P., Kuzmin M.I., Natapov L.M. *Tektonika litosfernnykh plit territorii SSSR* [Lithospheric plate tectonics of the USSR]. Moscow, Nedra Publ., 1990. 328 p.
2. Narimanov A.A. Concept on the formation of the oil and gas fields in the South Caspian Basin. *Transaction of the international Academy of Science*, 2005–2006, vol. 2, pp. 483–499.
3. Mukhtarova K.Z., Nasibova G.J. Hydrocarbon potential of possible non-standard type pools (lithologically confined) of the Khali-Kapaz anticline belt in connection with its history of geologic evolution. *Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanikh i gazovykh mestorozhdeniy*, 2018, no. 10, pp. 8–20. In Rus.
4. Rakhmanov I.P. *Gryazevye vulkany i ikh znacheniya v prognozirovaniy neftegazonosnosti nedr* [Mud volcanoes and their importance in predicting hydrocarbon potential of the depths]. Moscow, Nedra Publ., 1987. 271 p.
5. Mukhtarova K.Z., Nasibova G.J. Perspektivniye neftegazonosnye strukturny Absherskogo arkipelaga YuKV i osnovnoe napravleniye ikh dalneyshikh issledovaniy [Prospective oil and gas bearing structures of the Absheron archipelago of the SCB and major trends of their further study]. *International Scientific and Practical Conference. Worldscience*. Abu-Dhabi, UAE, August, 2016. pp. 32–39.
6. Mukhtarova K.Z., Nasibova G.J. Oil and gas content perspectives of potential non-standard pool types (lithologically confined) of Khali-Kapaz anticlinal belt in connection with its geological development history. *National Science Review*, December, 2017, vol. 4, Iss. 4, pp. 1397–1416.
7. Gulyev I.S., Mamedov P.Z., Feyzullayev A.A., Huseynov D.A., Kadirov F.A., Aliyeva E.H., Tagiyev M.F. *Hydrocarbon systems of the South Caspian basin*. Baku, Nafta-Press, 2003. 206 p.
8. Mukhtarova K.Z., Nasibova G.J. Paleotectonic environment of formation of structures in the South Caspian basin and oil and gas prospectives of the non-anticline traps. *Geolog Azerbayana. Nauchniy bulleten Azerbajanskogo Obshestva Neftyanikh Geologov*, 2017, no. 21, pp. 82–93.
9. Feyzullayev A.A., Gulyev I.S., Tagiyev M.F. Source potential of the Mesozoic-Cenozoic rocks in the South Caspian Basin and their role in forming the oil accumulations in the Lower Pliocene reservoirs. *Petroleum Geoscience*, 2001, vol. 7 (4), pp. 409–417.
10. Narimanov N.N. Geodynamic aspects of formation of the sedimentary mantle of the South Caspian depression. *Geologiya nefti i gaza*, 2003, no. 6, pp. 26–31. In Rus.
11. Artyushkov Y.B. Formation of the South Caspian depression as a result of phase transitions in the lower part of the continental crust. *Dokladi Rossiyskoy Akademii Nauk*, 2007, vol. 416, no. 5, pp. 647–652. In Rus.
12. Narimanov N.N. Geodynamic settings of the borders of the South Caspian megadepression. *Geolog Azerbayana*, 2005, no. 10, pp. 26–32.
13. Narimanov A.A. The petroleum systems of the South Caspian Basin. *Basin Modelling: Advanced Application*. 1993. pp. 599–608. Available at: <http://www.akifnarimanov.com/akif/extdocs/Petroleum-SystemsOfSouthCaspianBasis.pdf> (accessed 12 December 2019).
14. Inan S., Yalcin M.N., Guliev I.S., Kuliev K., Feizullayev A.A. Deep petroleum occurrences in the Lower Kura Depression, South Caspian Basin, Azerbaijan: an organic geochemical and basin

- modelling study. *Marine and Petroleum Geology*, 1997, vol. 14, no. 7–8, pp. 731–762.
15. Narimanov N.N., Khalilov N.O., Khidirova R.A. Geotemperature environment and oil and gas generation potential of the Pirallahi-Kelkor depression. *Azerbayzhanskoe Neftyanoe Khozyaystvo*, 2002, no. 9, pp. 7–11.
16. Narimanov N.N. Impact of geodynamic processes upon oil and gas generation in the South Caspian basin. *Azerbayzhanskoe Neftyanoe Khozyaystvo*, 2008, no. 8, pp. 13–18.
17. Jackson J., Priestley K., Allen M. Active tectonics of the South Caspian Basin. *Geophysical Journal International*, 2002, vol. 148, Iss. 2, pp. 214–245.
18. Salmanov A.M., Suleymanov A.M., Magerramov B.I. *Paleogeologiya neftegazonosnykh rayonov Azerbajjana* [Paleogeology of oil and gas regions of Azerbaijan]. Baku, Mars Print, 2015. 470 p.
19. Allen M.B., Anderson L., Jones S., Ismail-Zadeh A., Simmons M. Onset of subduction as the cause of rapid Pliocene-Quaternary subsidence in the South Caspian basin. *Geology*, 2002, vol. 30, no. 9, pp. 775–778.
20. Kagramanov K.N., Babayev M.S., Shpirko, Mukhtarova K.Z. Geothermal conditions of hydrocarbon prospectivity of Meso-Cenozoic formations in South Caspian basin. *Geofizicheskiy jurnal. Inst. Geofiziki im. S.I. Subbotina*, 2019, no. 5 (42), pp. 222–234. InRus.
21. Vahabov U.G. About the structure stages and plans of the Azerbaijan section of South Caspian Basin. *Conference Proc. 74th EAGE Conference and Exhibition incorporating. EUROPEC*, 2012. pp. 293–302. Available at: <https://www.earthdoc.org/content/serial/2214-4609> (accessed 12 December 2019).

Received: 18 December 2019.

Information about the authors

Khuraman Z. Mukhtarova, Cand. Sc., associate professor, Azerbaijan State Oil and Industry University.
Gultar J. Nasibova, Cand. Sc., associate professor, Azerbaijan State Oil and Industry University.

УДК 528.8/37/38

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ В ОБЛАСТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ГЕОПРОСТРАНСТВЕННОЙ ИНФОРМАЦИИ О МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДАХ И ОБЪЕКТАХ ИХ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Аврунев Евгений Ильич¹,
avryunev_ei@ngs.ru

Уставич Георгий Афанасьевич¹,
ystavich@mail.ru

Грекова Антонина Олеговна¹,
antoninaop@mail.ru

Никонов Антон Викторович^{1,2},
sibte@bk.ru

Мелкий Вячеслав Анатольевич³,
vamelkiy@mail.ru

Долгополов Даниил Валентинович⁴,
daniil.dolgopolov@gmail.com

¹ Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
Россия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10.

² АО «Сибтехэнерго»,
Россия, 630032, г. Новосибирск, ул. Планировочная, 18/1.

³ Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН,
Россия, 693022, г. Южно-Сахалинск, ул. Науки, 1Б.

⁴ АО «СпейсИнфо Геоматикс»,
Россия, 127490, г. Москва, ул. Декабристов, 51.

Актуальность исследования обусловлена тем, что в настоящее время в Российской Федерации для целей обслуживания добычи и разработки полезных ископаемых необходимо выполнять съемочные и геодезические работы, по результатам которых формируются массивы геопространственных данных, которые являются основой для проектирования и обустройства нефтяных и газовых месторождений и являются исходной информацией для трехмерного моделирования земной поверхности, геологических структур месторождений и инфраструктуры трубопроводных систем. Кроме того, геопространственные данные необходимы для подготовки документов при постановке на государственный кадастровый учет и оформления прав землепользования. На основании этого в статье поставлена научно-техническая задача: проанализировать возможности применения различных способов обеспечения геопространственной информацией ГИС трубопроводных систем данными для 3D моделирования исследуемых месторождений и трубопроводов. Корпоративные ГИС наполняют данными о состоянии трубопроводного транспорта, используя информацию о космических съемочных системах с высоким и средним пространственным разрешением, а также материалы съемок с беспилотных летательных аппаратов и воздушного лазерного сканирования. Мониторинг трубопроводных систем осуществляют также с использованием данных наземных геодезических съемок. Одним из распространенных видов современного геодезического оборудования являются высокоточные и точные электронные тахеометры, позволяющие получать геопространственную информацию о местности и антропогенных объектах как в плане, так и по высоте. Высотная составляющая определяется в результате выполнения тригонометрического нивелирования. Применение способа тригонометрического нивелирования особенно актуально при работе в пересеченной местности и неблагоприятных условиях, к которым в частности относятся районы Крайнего Севера.

Цель: проанализировать возможности применения различных способов обеспечения геопространственной информацией ГИС трубопроводных систем: космических съемок с различным пространственным разрешением, данных беспилотных летательных аппаратов и воздушного лазерного сканирования, тригонометрического нивелирования III и IV классов с применением высокоточных электронных тахеометров при формировании массивов геопространственных данных систем мониторинга магистральных трубопроводов.

Методы: дешифрирование аэрокосмических изображений, экспериментальные исследования в полевых условиях с материалами космических съемок, данными беспилотных летательных аппаратов и воздушного лазерного сканирования, использование высокоточных нивелиров и электронных тахеометров для тригонометрического нивелирования, геоинформационные технологии.

Результаты. Выполнена оценка качества геопространственной информации для ГИС-мониторинга трубопроводных систем. Работа показала, что данные дистанционного зондирования Земли с различными пространственными разрешениями, беспилотных летательных аппаратов и воздушного лазерного сканирования позволяют сформировать массивы геопространственных данных, необходимых для служб, эксплуатирующих трубопроводные системы, обеспечивающих плановую привязку с достаточной точностью; при создании высотного геодезического обоснования, когда точность необходимо повысить до III и IV классов, вместо трудоемкого геометрического нивелирования целесообразно дополнять массивы информацией, полученной методом тригонометрического нивелирования с использованием высокоточных электронных тахеометров.

Ключевые слова:

Геопространственные данные, дешифрирование аэрокосмических изображений, геоинформационные технологии, беспилотные летательные аппараты, воздушное лазерное сканирование, трехмерная модель земной поверхности, тригонометрическое нивелирование, высокоточный электронный тахеометр.

Введение

В настоящее время одним из ключевых направлений развития экономики Российской Федерации, особенно ее цифровой составляющей, является создание трехмерных моделей разрабатываемых месторождений и трубопроводных систем. Такая постановка проблемы обусловлена необходимостью пространственного представления мест прокладки и эксплуатации трубопроводов, планирования их перспективного использования, оформления соответствующих правоустанавливающих документов, внесения кадастровой информации в единый государственный реестр недвижимости (ЕГРН). Пространственное 3D-моделирование позволяет представить разрабатываемые месторождения нефти и газа в виде цифровой модели местности, в которой отражается рельеф поверхности, геологическая структура и объекты инфраструктуры трубопроводного транспорта.

Разработка корпоративных геоинформационных систем (ГИС) для предприятий трубопроводного транспорта вызывает потребность в информации о состоянии магистральных трубопроводов и их геометрических характеристиках. Дешифрирование материалов дистанционного зондирования производственных объектов действующего нефтегазового комплекса позволяет распознавать площадки магистральных трубопроводов (МТ), определять их габаритные размеры и не-

которые характеристики оборудования, расположенного в их пределах, а также оформлять результаты в виде графических схем (рис. 1).

Результаты съёмки трубопроводного оборудования, полученные с разрешением 0,5 м/пикс, обладают информативностью, позволяющей при использовании эксплуатационной или проектной документации дешифрировать объекты в соответствии с требованиями к составу топографических планов масштаба 1:2000, и могут быть использованы для инвентаризации объектов линейной части МТ и площадок нефтеперекачивающих станций.

Данные дистанционного зондирования Земли – основа геопространственной информации трубопроводных систем

Основным источником информации для решения наибольшего числа задач являются аэрокосмические изображения, получаемые в оптическом диапазоне длин волн. В то же время для решения отдельных задач могут быть востребованы: данные космической радиолокационной съёмки (задачи определения динамики поверхности земли, объектов МТ в зонах сложных природно-климатических условий), тепловой съёмки, материалы воздушного лазерного сканирования (ВЛС) (задачи построения ЦМР и последующего анализа их изменения).

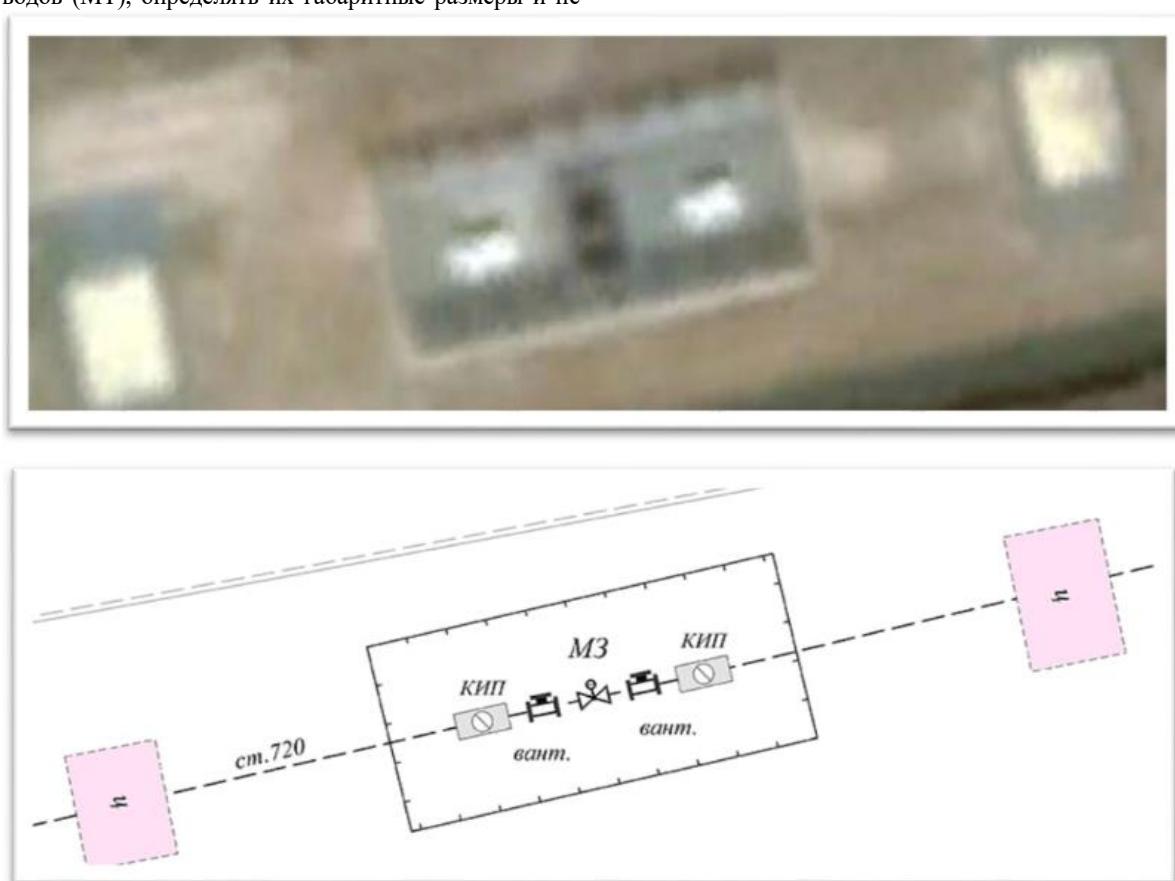


Рис. 1. Пример изображения объекта линейной части трубопровода на космическом снимке (пространственное разрешение 0,5 м/пиксель) (а) и схема, полученная при дешифрировании (б) [1]

Fig. 1. Example of the object on linear part of the pipeline on satellite image (spatial resolution of 0,5 m/pixel) (a) and schema obtained during decoding (b) [1]

Для формирования базовой мульти尺度ной пространственной основы ГИС могут быть использованы следующие наборы данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ):

- космическая съемка среднего разрешения (от 5–30 м) – обзорное покрытие космической съемкой, данные должны быть представлены на всю территорию России;
- космическая съемка высокого разрешения (1–5 м) – базовое покрытие космической съемкой линейной части и прилегающих территорий объектов инфраструктуры МТ (не менее 10 км от оси МТ);
- космическая съемка сверхвысокого разрешения (<1 м), используется для детализации базовой пространственной основы вдоль трассы трубопровода.

Для уточнения/детализации базовой картографической основы вдоль коридора трассы могут использоваться данные космической съемки сверхвысокого разрешения (<1 м) наряду с другими методами инструментального дистанционного обследования (АФС, ВЛС и т. д.) (табл. 1).

Таблица 1. Пространственное разрешение съемочных систем [1, 2]

Table 1. Spatial resolution of imaging systems [1, 2]

| Тип аэрокосмической съемки Type of aerospace survey | Пространств. разрешение, м/пикс Spatial resolution, m/pixels | Съемочная система Survey system |
|--|---|--|
| Аэрофотосъемка с БПЛА ZALA Aerial photography from UAV ZALA | 0,05–0,08 | MSC Z-16AGRO1 |
| Космическая съемка (КС) сверхвысокого разрешения (0,3–1 м/пикс) Ultra-high-resolution Space survey (SS) (0,3–1 m/pix) | 0,31 | WorldView 3,4 |
| КС высокого разрешения (1–5 м/пикс) High-resolution SS (1–5 m/pix) | 2,5 3,5 | SPOT 5 PlanetScope |
| КС среднего разрешения (5–30 м/пикс) Medium-resolution SS (5–30 m/pix) | 10,0 15,0 | Sentinel-2A, 2B Landsat 8 |
| КС низкого разрешения (>30 м/пикс) Low-resolution SS (>30 m/pix) | 250,0 | Terra (Modis) |

Обеспечение высокоточной высотной привязки геопространственных данных

Материалы космической съемки и эксплуатационная документация не всегда являются достаточными источниками для полного отображения на графических схемах объектов и/или их характеристик. Например, сведения о подземных коммуникациях, типе растительности, назначении зданий могут быть получены в результате полевого дешифрирования и полевой досъемки [1].

Для обеспечения высокоточного пространственного моделирования необходимо создавать цифровое обоснование в виде трехмерной координатной системы (x, y, H). До недавнего времени высотная состав-

ляющая определялась геометрическим нивелированием с использованием оптических и цифровых нивелиров. Для определения третьей координаты H в этой системе, согласно действующей инструкции по государственному нивелированию I, II, III и IV классов, используется исключительно метод геометрического нивелирования. Этот метод основан на измерении превышения между двумя точками местности с использованием визирной оси нивелира, которая устанавливается строго горизонтально. Поэтому в условиях всхолмленной и заболоченной местности (последняя, в том числе, имеет место в условиях Крайнего Севера) выполнение геометрического нивелирования связано с рядом сложных технологических особенностей: строгое соблюдение равенства плеч при установке нивелира, минимальная высота визирного луча над подстилающей поверхностью и, как следствие этого, существенное увеличение трудоемкости выполнения данного технологического процесса.

В связи с широким внедрением в геодезическое производство высокоточных электронных тахеометров появилась возможность замены трудоемкого геометрического нивелирования на высокотехнологичное тригонометрическое нивелирование (ТН). В этом случае превышение между точками вычисляется по измеренному углу наклона и расстоянию до визирной цели. Такой способ определения превышений исключает отмеченные выше сложности, что существенно повышает производительность труда [3–9].

При проведении геодезических работ широко применяются высокоточные электронные тахеометры, позволяющие измерять углы наклона со средней квадратической ошибкой (СКО) 0,5°–2,0° и расстояния с ошибкой 1,5–2,0 мм [10–14]. Это открывает новые возможности для применения тригонометрического нивелирования и позволяет обеспечить точность получаемых результатов, соответствующих геометрическому нивелированию III и IV классов. Достижение такой точности позволяет решить все отмеченные выше технологические задачи для создания 3D-моделей всех объектов недвижимости, расположенных, в том числе, в районе залежей полезных ископаемых.

При создании высотного обоснования выбор класса нивелирования предлагается осуществлять на основании категорий земель, на которых располагается соответствующий объект. Например, на землях населенных пунктов, где отмечается высокая кадастровая стоимость объектов недвижимости, для формирования 3D-модели рекомендуется использовать нивелирование III, а на землях других категорий – нивелирование IV класса. То же касается ответственных объектов трубопроводов.

Создание пространственных моделей является важным шагом не только для формирования геопространственной информации ГИС трубопроводных систем, когда в результате формирования таких моделей появляется возможность контроля строительства соответствующих инженерных сооружений (в том числе МТ), но и для решения разнообразных научно-технических и эксплуатационных задач.

В настоящее время при определении плоских прямоугольных координат (x, y) точек земной поверхности для построения 2D-моделей применяются следующие основные методы геодезических измерений (независимо или в комбинации): тахеометрическая съемка, спутниковые измерения, лазерное сканирование (наземное, воздушное, а для протяженных объектов и мобильноное), аэрофотосъемка и применение беспилотных авиационных систем (БАС). При формировании 3D-моделей способ полярных координат, составной частью которого является тригонометрическое нивелирование, следует признать наиболее доступным и точным. Применение лазерного сканирования и БАС является весьма перспективным [15, 16].

Необходимо отметить, что становление и применение 4D-моделирования потребует определения координат x, y, H через определенные промежутки времени t . Актуальность этого направления обусловлена необходимостью выполнения мониторинга состояния земной поверхности, на которой расположены системы трубопроводного транспорта и объекты их инфраструктуры.

Различают следующие способы тригонометрического нивелирования: одностороннее, двустороннее и из середины (рис. 2). *Одностороннее нивелирование*

применяется для определения высоты объекта (здания или сооружения), а также отметок пикетных точек при производстве тахеометрической съемки. При одностороннем нивелировании ошибки за влияние вертикальной рефракции и кривизны Земли не исключаются, однако при длине визирного луча до 150–200 м эти ошибки, как правило, пренебрегают.

Сущность *двустороннего тригонометрического нивелирования* (ДТН) заключается в двухкратном измерении превышения между точками 1 и 2: сначала – в прямом, а затем, после перестановки местами тахеометра и визирной цели, – в обратном направлении (рис. 3, а). Среднее значение двух полученных при этом превышений освобождается от влияния кривизны Земли, а влияние рефракции в большей степени компенсируется [17, 18]. Чем меньше интервал времени между измерениями в прямом и обратном направлениях, тем надежнее исключается рефракционная ошибка из результатов нивелирования. Рекомендуется, чтобы указанный интервал времени не превышал получаса. Главным преимуществом двустороннего нивелирования является возможность его выполнения одновременно с созданием планового геодезического обоснования, для чего на точках хода дополнительно измеряются горизонтальные углы.

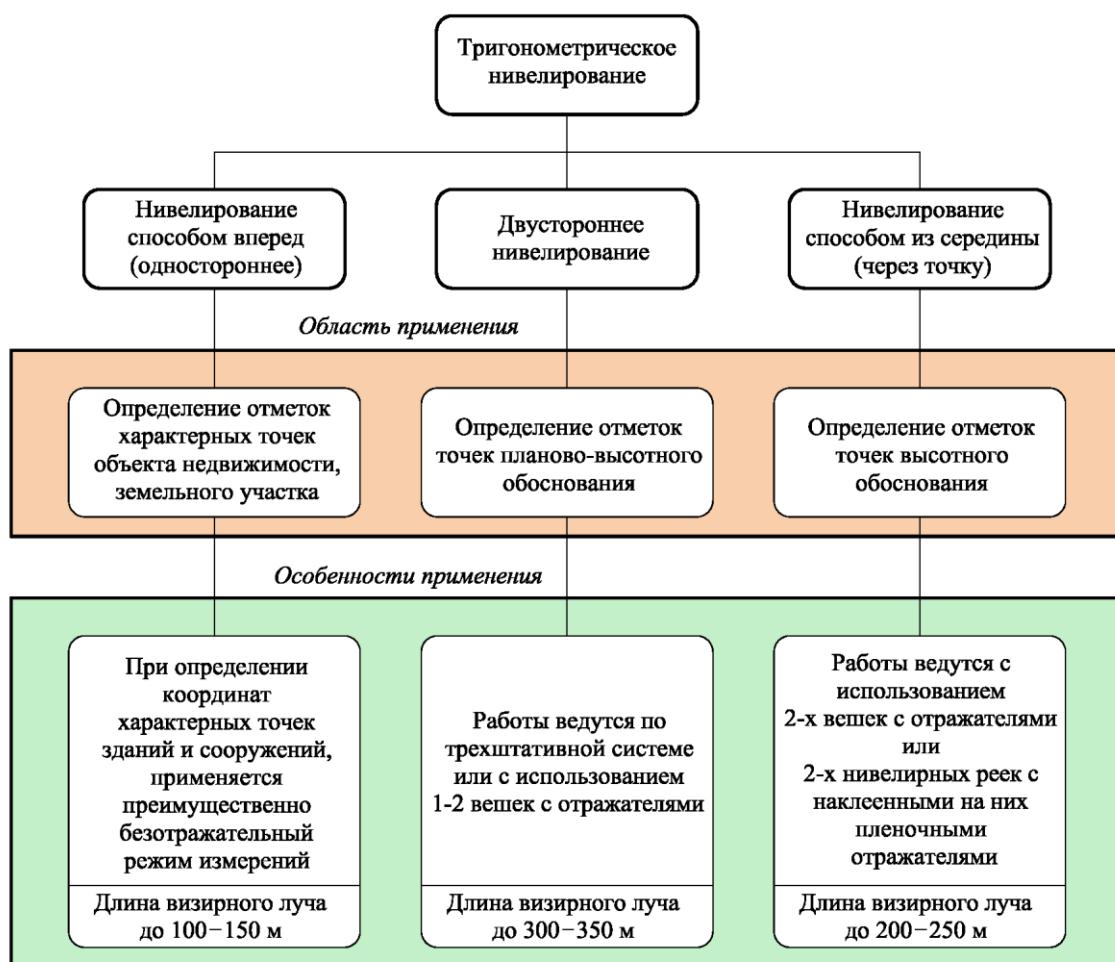


Рис. 2. Способы тригонометрического нивелирования

Fig. 2. Methods of trigonometric leveling

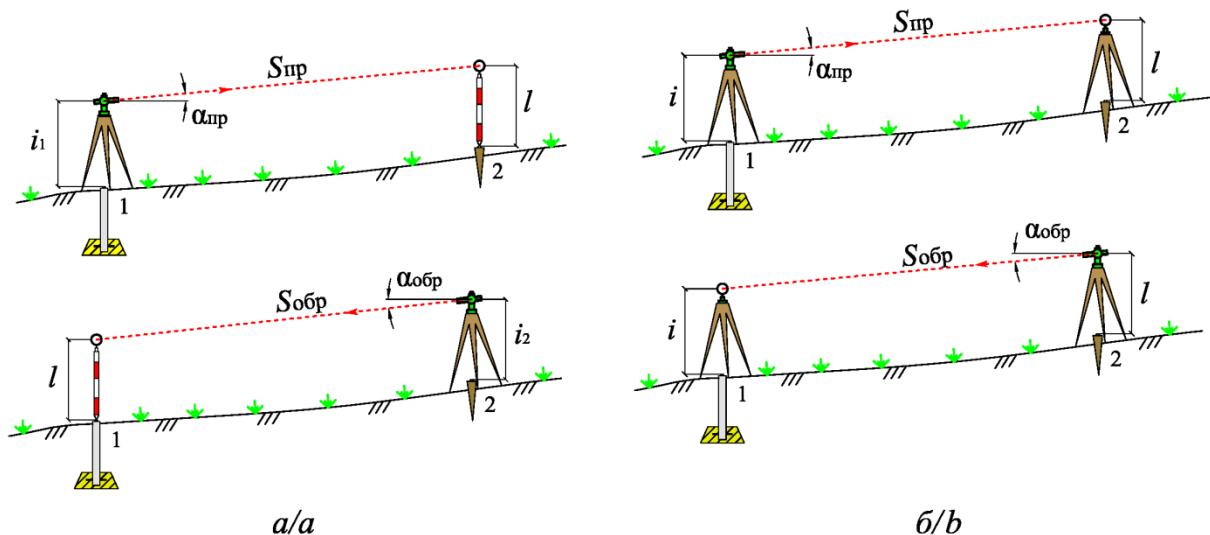


Рис. 3. Схема выполнения двустороннего нивелирования при использовании вехи с отражателем (а) и при работе по трехштативной системе (б)

Fig. 3. Scheme of reciprocal leveling when using rod with reflector (a) and when working on three-pillar system (b)

Координаты характерных точек объектов повышенной ответственности требуется определять с СКО не более 0,1 м. Съемочное обоснование в этом случае создается методами спутниковых измерений или полигонометрии 4 класса, 1 и 2 разрядов. Выбор метода геодезических построений зависит от удаленности объекта недвижимости или земельного участка от исходных пунктов. При проложении полигонометрических ходов с точностью 1 или 2 разряда (СКО измерения горизонтальных углов $m_\beta=5''$ и $m_\beta=10''$ соответственно) в качестве визирной цели применяют призменный отражатель на вехе, которую помощник удерживает на точке руками или с помощью подпорок (рис. 3, а).

Превышение $h_{\text{дв}}$ из двустороннего нивелирования между точкой 1 (репер) и точкой хода 2, закрепленной на местности колышком (рис. 3, а), находится по формуле

$$h_{\text{дв}} = \frac{S_{\text{пр}} \sin \alpha_{\text{пр}} - S_{\text{обр}} \sin \alpha_{\text{обр}}}{2} + \frac{i_1 - i_2}{2}, \quad (1)$$

где $S_{\text{пр}}$ и $S_{\text{обр}}$ – наклонные расстояния, измеренные соответственно в прямом и обратном направлениях; $\alpha_{\text{пр}}$ и $\alpha_{\text{обр}}$ – углы наклона; i_1 и i_2 – высота инструмента на точках 1 и 2 соответственно.

Как следует из формулы (1), можно не измерять высоту отражателя l , если сохранять ее постоянство при измерении превышения в прямом и обратном направлении, чего и следует придерживаться для уменьшения источников ошибок.

Ходы полигонометрии 4 класса (СКО измерения горизонтальных углов $m_\beta=2''$) прокладывают по трехштативной системе. В этом случае отражатели устанавливаются над точками посредством штативов. При перестановке тахеометра с реперной точки 1 на первую точку хода 2, а отражателя соответственно на точку 1 положение штативов не изменяется: тахеометр и отражатель извлекаются из трегеров и меняются местами. Это позволяет обеспечить неизмен-

ность высот i и l , а также равенство наклонных расстояний $S_{\text{пр}}$ и $S_{\text{обр}}$ (рис. 3, б). Тем не менее после перестановки тахеометра и отражателя местами для выполнения контроля рекомендуется повторно измерять их высоту над точками 1 и 2. Особенность работы по трехштативной системе заключается в том, что ошибки измерения высот тахеометра и отражателя над точками хода оказывают влияние только на определение отметок собственно переходных точек, но не сказываются на передаче отметки в самом ходе [19].

СКО превышения $m_{\text{дв}}$ из двустороннего нивелирования, а затем СКО измерения превышения на один километр хода могут быть вычислены по следующим формулам:

$$m_{h_{\text{дв}}} = \sqrt{\sin^2 \alpha m_s^2 + \frac{S^2 m_\alpha^2}{2\rho^2}}, \quad m_{h_{\text{км}}} = m_{h_{\text{дв}}} \sqrt{n}, \quad (2)$$

где m_s – СКО измерения наклонного расстояния; m_α – СКО измерения угла наклона одним полным приемом; $\rho=206265''$ – число секунд в радиане; n – количество превышений в ходе длиной 1 км.

Результаты предрасчета точности по формуле (2) при $m_s=2,0$ мм, $\alpha=6^\circ$ (пересеченный рельеф), приводятся в табл. 2 [19].

В инструкции по нивелированию указано, что случайная СКО для нивелирования III класса не должна превышать 5 мм/км, для IV класса – 10 мм/км. Из анализа полученных результатов следует, что нормативная точность III класса достигается при ДТН при условии измерения углов наклона с ошибкой не более 3'' и длине линии визирования до 200 м. Точность IV класса соответственно достигается при использовании электронных тахеометров с инструментальной СКО измерения вертикального угла 5'' и длине линии визирования до 300 м.

Данные рассуждения справедливы, если ход прокладывается по трехштативной системе, так как лишь в этом случае ошибки измерения высоты тахеометра

(отражателя) не будут накапливаться. Ошибками измерения высоты инструмента или отражателя над реперами при этом можно пренебречь.

Таблица 2. Средние квадратические ошибки ДТН при различной длине линий визирования

Table 2. Standard deviations of reciprocal trigonometric leveling at different lengths of observing line

| $m_a, \text{с}$ | СКО превышения $m_{h\text{дв}}$, мм, при длине линии (м) SD elevation for lengths of observing line (m) | СКО превышения на 1 км хода, мм, при длине линий (м) SD elevation for 1 km run for lengths of observing line (m) | Нормативная СКО на 1 км для класса Normal SD for 1 km for class | | | | | |
|-----------------|---|---|--|-----|------|------|-----|----|
| | | | | 100 | 200 | 300 | III | IV |
| 1" | 0,4 | 0,7 | 1,1 | 1,3 | 1,6 | 1,9 | | |
| 2" | 0,7 | 1,4 | 2,1 | 2,3 | 3,1 | 3,8 | | |
| 3" | 1,1 | 2,1 | 3,1 | 3,3 | 4,6 | 5,6 | | |
| 5" | 1,7 | 3,4 | 5,2 | 5,5 | 7,7 | 9,4 | | |
| 7" | 2,4 | 4,8 | 7,2 | 7,6 | 10,7 | 13,1 | | |

Произведем оценку влияния ошибки измерения высоты инструмента m_i на точность двустороннего нивелирования при прокладывании хода с отражателем на вехе. Если измерять высоту инструмента рулеткой с ошибкой $m_i=2$ мм, то СКО второго слагаемого в формуле (1) также составит 2 мм. Тогда ошибка превышения между точками хода $m'_{h\text{дв}}$ с учетом m_i может быть вычислена формулой

$$m'_{h\text{дв}} = \sqrt{m_{h\text{дв}}^2 + m_i^2}. \quad (3)$$

Результаты предрасчета точности двустороннего нивелирования с учетом ошибки измерения высоты тахеометра, полученные по формуле (3), приведены в табл. 3.

Из анализа данных табл. 3 следует, что при измерении высоты тахеометра с ошибкой 2 мм и использовании отражателя на вехе точность нивелирования III класса может быть достигнута лишь при значениях ошибок измерения углов, не превышающих 1", чего добиться при воздействии факторов внешней среды весьма затруднительно. В то же время точность IV

класса уверенно обеспечивается при измерении углов с ошибкой 2"-3".

Рассмотрим третий способ тригонометрического нивелирования – из середины. Тахеометр при этом устанавливается между двумя точками (рис. 4).

При нивелировании способом из середины, как и в двустороннем нивелировании, происходит компенсация влияния кривизны Земли и рефракции [20–22]. Важным достоинством нивелирования из середины является отсутствие необходимости измерять высоту инструмента. Также данный способ является более производительным: при расстоянии от тахеометра до отражателя 200 м обеспечивается передача отметки сразу на 400 м, в то время как в двустороннем нивелировании пришлось бы разбивать это расстояние на две части (точное визирование сразу на 400 м затруднительно).

Формула вычисления превышения при нивелировании из середины при равенстве высот задней и передней визирных целей над точками хода имеет вид

$$h_{\text{сеп}} = S_2 \sin \alpha_2 - S_1 \sin \alpha_1 - \frac{S^2}{2R} (k_2 - k_1), \quad (4)$$

где k_1 и k_2 – коэффициент рефракции, соответственно, при визировании на точку 1 и 2; R – средний радиус Земли (6371 км).

Таблица 3. Средние квадратические ошибки ДТН с учетом ошибки за измерение высоты инструмента

Table 3. Standard deviations of reciprocal trigonometric leveling taking into account errors of horizon of instrument

| $m_a, \text{с}$ | СКО превышения $m_{h\text{дв}}$, мм, при длине линии (м) SD elevation for sight line length (m) | СКО превышения $m_{h\text{км}}$ на 1 км хода, мм, при длине линий SD elevation for 1 km run for sight line (m) | | | | |
|-----------------|---|---|-----|-----|------|------|
| | | | 100 | 200 | 300 | |
| 1" | 2,0 | 2,1 | 2,3 | 6,4 | 4,8 | 4,1 |
| 2" | 2,1 | 2,4 | 2,9 | 6,7 | 5,4 | 5,2 |
| 3" | 2,3 | 2,9 | 3,7 | 7,1 | 6,4 | 6,7 |
| 5" | 2,6 | 4,0 | 5,5 | 8,4 | 8,9 | 10,1 |
| 7" | 3,1 | 5,2 | 7,5 | 9,9 | 11,6 | 13,6 |

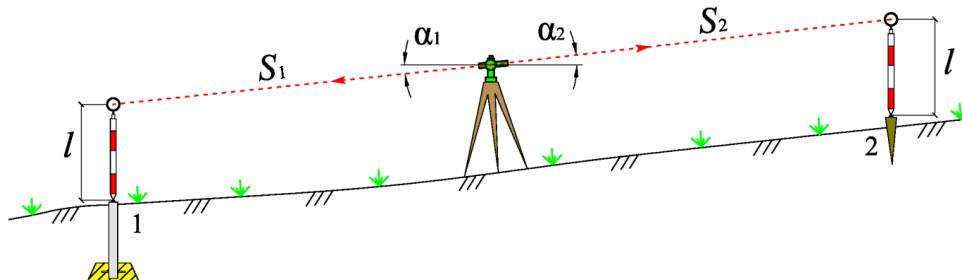


Рис. 4. Схема тригонометрического нивелирования способом из середины

Fig. 4. Scheme of leap-frog trigonometric leveling

Третье слагаемое в формуле (4) обусловлено неравенством коэффициентов рефракции при визировании на точки 1 и 2. В общем случае разность коэффициентов рефракции Δk есть величина неизвестная. При однородности подстилающей поверхности выполнение визирования на заднюю и переднюю точки

позволяет пренебречь различием коэффициентов рефракции, тогда точность нивелирования можно оценить по формуле

$$m_{h\text{сеп}} = \sqrt{(2 \sin^2 \alpha) m_s^2 + \frac{2S^2 m_a^2}{\rho^2}}. \quad (5)$$

Средние квадратические ошибки измерения превышения при ТН из середины для $\alpha=6^\circ$ представлены в табл. 4.

Анализ данных табл. 4 показал, что для выполнения нивелирования с точностью III класса измерения углов наклона следует выполнять с ошибкой не более $2''$, а длину плеч сократить до $S < 200$ м. Тригонометрическое нивелирование с точностью, которую можно отнести к IV классу, следует выполнять тахеометрами со СКО измерения угла наклона менее $3''$ и длине плеч не более 200–300 м [20].

Таблица 4. Средние квадратические ошибки ТН способом из середины

Table 4. Standard deviations of leap-frog trigonometric leveling

| $m_a, \text{с}$ | СКО превышения $m_{h\text{ср}}$, мм, при длине линии (м) | | | СКО превышения $m_{h\text{км}}$ на 1 км хода, мм, при длине линий (м) | | |
|-----------------|---|---|------|---|------|------|
| | SD elevation for sight line length (m) | SD elevation for 1 km run for sight line length (m) | 100 | 200 | 300 | |
| $1''$ | 0,8 | 1,4 | 2,1 | 1,7 | 2,2 | 2,7 |
| $2''$ | 1,4 | 2,8 | 4,1 | 3,1 | 4,4 | 5,3 |
| $3''$ | 2,1 | 4,1 | 6,2 | 4,7 | 6,5 | 8,0 |
| $5''$ | 3,4 | 6,9 | 10,3 | 7,7 | 10,9 | 13,3 |
| $7''$ | 4,8 | 9,6 | 14,4 | 10,8 | 15,2 | 18,6 |

Предварительными вычислениями установлено, что ходы ТН, прокладываемые при использовании высокоточных тахеометров ($m_a \leq 2''$), могут соответствовать по точности геометрическому нивелированию III или IV классов. В целях снижения влияния на результаты нивелирования ошибок, обусловленных вертикальной рефракцией и неустойчивостью штатива или переходных точек, следует рассмотреть некоторые методические особенности при измерениях, выполняемых на станции [18].

Рассмотрим основные требования технологического характера, которые необходимо обеспечивать при выполнении ТН с точностью, предъявляемой к нивелированию III и IV классов:

- порядок взятия отсчетов на станциях (программа измерений);
- допустимая минимальная высота визирования;
- допустимая величина неравенства плеч на станции и допустимое значение его накопления в ходе;
- благоприятное время для выполнения измерений;
- система контролей и допусков на станции.

Предлагаемая методика ТН предусматривает использование высокоточных электронных тахеометров с СКО измерения углов наклона не более $2''$, расстояний с СКО не более 2–3 мм (в том числе в безотражательном режиме) [19].

В качестве визирных целей можно применять нескладные деревянные или металлические нивелирные рейки и вехи с отражателем. При использовании реек измерения расстояний выполняются в безотражательном режиме. Для удобства визирования на рейки рекомендуется наклеивать пленочные отражатели размером 50×50 мм на расстоянии не менее 1,5 м от пятки рейки. Для удобства обработки результатов

измерений при выполнении нивелирования способом из середины высота закрепления пленочных отражателей в паре реек относительно пяток должна быть одинаковой (в пределах 0,2 мм). Для обеспечения равенства высот пленочных отражателей необходимо использовать женевскую линейку.

Если при выполнении нивелирования будут применяться вехи с отражателем, то для установки на переходных точках (костылях) их необходимо снабдить плоской пяткой. Вертикальность вех в процессе измерений обеспечивается с помощью круглых уровней с ценой деления не более $20'$ (при углах наклона $\alpha \leq 2^\circ$), а на всхолмленной местности (при углах наклона $\alpha \leq 6^\circ$) с ценой деления не более $10'$. Для установки и фиксации реек или вех в вертикальном положении используют подпорки (биподы).

Для обеспечения контроля измерений, выполненных на станции при расстояниях до рейки свыше 100 м следует определять превышения двумя полными приемами. Для независимости измерений рекомендуется между приемами менять высоту тахеометра подъемными винтами в пределах одного сантиметра. Измерение превышения двумя приемами может выполняться и при одном горизонте тахеометра. В этом случае визирная цель должна представлять собой вертикальный базис, что обеспечит получение второго независимого превышения на станции без изменения высоты тахеометра. За точки вертикального базиса можно принять два сантиметровых деления шашечной рейки или два пленочных отражателя, расстояние между которыми измеряется женевской линейкой с погрешностью не более 0,2 мм (рис. 5, а). Расстояние между точками базиса принимается около 200–500 мм с таким расчетом, чтобы нижний конец базиса имел высоту над пяткой рейки не менее 1,5 м.

Программы измерений на станции. При выполнении геометрического нивелирования для уменьшения ошибок за выпирание или оседание штатива программу измерений на станции строят таким образом, чтобы все отсчеты по рейкам располагались симметрично относительно некоторого среднего момента времени. По аналогии для ослабления ошибок за перемещение штатива с тахеометром при выполнении тригонометрического нивелирования необходимо также обеспечивать симметричность при наведениях на визирные цели. Кроме того, оптимальной следует считать программу с минимальным количеством переходов наблюдателя вокруг тахеометра.

При выполнении нивелирования III и IV классов следует выполнять измерения по программам, представленным в табл. 5. В данном случае превышение измеряется полными приемами, т. е. при положении вертикального круга слева (КЛ) и справа (КП). При нивелировании с использованием вертикального базиса высота инструмента не изменяется, что позволяет проконтролировать место нуля (МО).

Представленные программы измерений являются симметричными, а наблюдателю требуется всего два раза переходить вокруг прибора. Таким образом, ошибки за перемещение системы «штатив–тахеометр» в полученных превышениях будут несущественны (рис. 6).

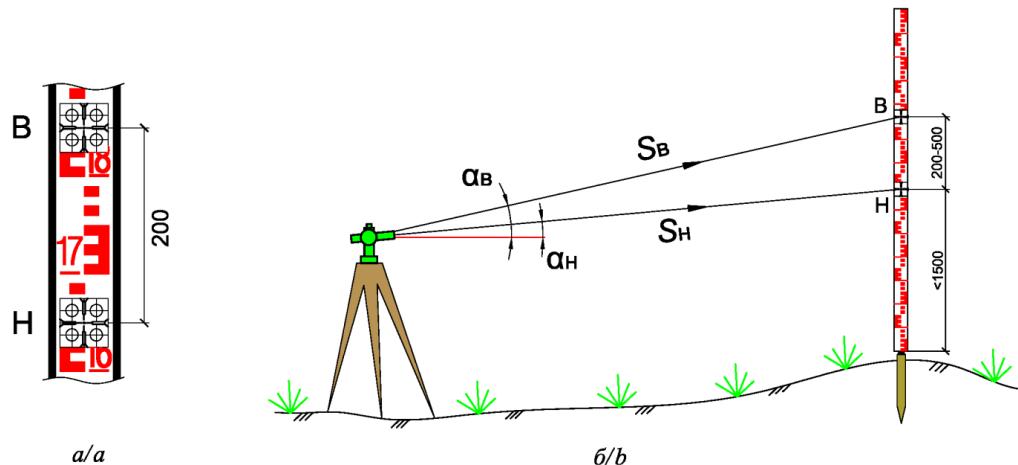


Рис. 5. Фрагмент нивелирной рейки с двумя пленочными отражателями (а) и схема измерений на вертикальный базис (б)

Fig. 5. Fragment of the leveling rod with two film reflectors (a) and measurement scheme on a vertical basis (b)

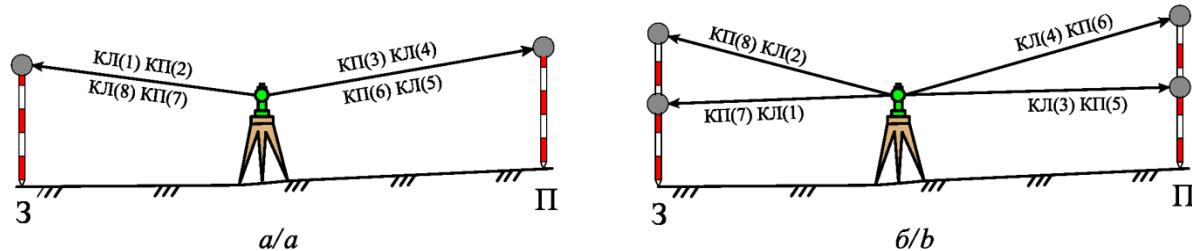


Рис. 6. Программа измерений на станции при визировании на одинарную цель (а) и вертикальный базис (б)

Fig. 6. Measurement program at the station when sighting on a single target (a) and vertical basis (b)

Для обеспечения стабильного положения системы «штатив–тахеометр» рекомендуется снять дерн под ножками штатива, а измерения начинать спустя 1–2 минуты после установки тахеометра на штатив. Существенно ослабить влияние перемещения переходных точек на результаты нивелирования можно путем использования металлических костылей или кольев длиной 35–40 см.

Таблица 5. Программы измерений на станции тригонометрического нивелирования

Table 5. Measurement programs on the station of trigonometric leveling

| Номер приема Number of sight | Программа (1) при визировании на одинарную цель (отражатель) | | Программа (2) при визировании на вертикальный базис | |
|---------------------------------|---|----------------------------------|---|-------------------------------|
| | задняя цель back target | передняя цель front target | задняя цель back target | передняя цель front target |
| 1 | КЛ (1) | КП (3) | КЛ (1) | КЛ (2) |
| | КП (2) | КЛ (4) | КЛ (3) | КЛ (4) |
| 2 | КП (7) | КЛ (5) | КП (7) | КП (8) |
| | КЛ (8) | КП (6) | КП (5) | КП (6) |

Допустимая минимальная высота визирования. Для уменьшения рефракционного влияния на измеренные превышения визирный луч должен проходить на расстоянии не менее 1 м над подстилающей по-

верхностью, а высоту визирной цели следует принимать не менее 1,5 м. Для сравнения укажем, что при геометрическом нивелировании III и IV классов, согласно инструкции, высота визирования должна быть не менее 0,3 и 0,2 м соответственно.

Время выполнения измерений. Как и при работе с нивелиром, измерения следует проводить при хорошей видимости, отчетливых и спокойных изображениях визирных целей. В ясную солнечную погоду следует исключить измерения в течение часа после восхода и за час до захода Солнца. При нивелировании в жаркие, солнечные дни необходимо уменьшать расстояния до реек и соблюдать однородность подстилающей поверхности при наведении на заднюю и переднюю визирные цели.

Допустимая величина неравенства плеч на станции и его накопления в ходе. При выполнении нивелирования расстояния до целей измеряют светодальномерным блоком тахеометра. При нивелировании III и IV классов неравенство плеч на станции не должно превышать 10 и 20 м соответственно, а его накопление по секции – 20 м. В исключительных случаях, когда в силу местных условий не получается установить тахеометр на равных расстояниях от визирных целей, допускается неравенство плеч до 30 м, при условии последующей единовременной его компенсации на одной из последующих станций хода.

Длины визирных лучей при выполнении тригонометрического нивелирования III и IV классов целесообразно ограничить величиной 200 и 250 м соответ-

ственno (табл. 6), так как при больших расстояниях ошибки рефракционного характера начинают превалировать. Заметим, что для геометрического нивелирования инструкцией допускается предельная длина визирного луча 100 м (III класс) и 150 м (IV класс). Таким образом, применение тахеометров для нивелирования III и IV классов позволяет увеличить расстояние до визирных целей до 2 раз, снизить количество переходных точек и тем самым повысить производительность работ.

Таблица 6. Требования к тригонометрическому нивелированию III и IV классов способом из середины

Table 6. Requirements for leap-frog trigonometric leveling classes III and IV

| Параметр Parameter | Значение параметра Parameter value | |
|---|---------------------------------------|--------------------------|
| | III | IV |
| Максимальная длина плеч при визировании, м: Maximal length of lever in sighting, m: | | |
| • на деление шашечной рейки on the rod graduation | 100 | 100 |
| • на пленочный отражатель 50×50 мм on the film reflector 50×50 mm | 150 | 150 |
| • на отражатель /on the reflector | 200 | 250 |
| Допуск на неравенство плеч на станции, м Tolerance for unequal levers on the station, m | 10 | 20 |
| Допуск на накопление неравенства плеч по секции, м Tolerance for collected unequal levers on the section, m | 20 | 20 |
| Число приемов на станции, не менее: Number of received signals on the station, not less than: | | |
| • при длине луча до 100 м for the beam length up to 100 m | 1 | 1 |
| • при длине луча до 200 м (250 м для IV класса) for the beam length up to 200 m (250 m for IV class) | 2 | 2 |
| Допуск на разность превышений из двух приемов, мм: Tolerance for difference of elevations from 2 received signals, mm: | | |
| • при длине луча до 100 м (при выполнении 2-го приема) for the beam length up to 100 m (for the 2 nd signal) | 3 | 4 |
| • при длине луча 100–150 м for the beam length 100–150 m | 4 | 5 |
| • при длине луча 150–200 м (150–250 м для IV класса) for the beam length 150–200 m (150–250 m for IV class) | 5 | 7 |
| Допуск на несовпадение измеренной длины базиса с теоретическим значением, мм Tolerance for incongruity of the measured basis length with the theoretical value, mm | 3 | 4 |
| Минимальная высота визирования, м Minimal leveling height, m | 1,5 | 1,5 |
| Допустимая невязка или расхождение между превышениями из прямого и обратного хода, мм Discrepancy or difference between elevations of direct and counter run, mm | $10\sqrt{L_{\text{km}}}$ | $20\sqrt{L_{\text{km}}}$ |

Система контролей и допусков на станции. При тригонометрическом нивелировании на станции превышение измеряется между осью вращения зрительной трубы тахеометра и центром каждой визирной цели при двух положениях круга (КЛ и КП). Из-за перепадов температуры воздуха МО может изменяться и разность превышений, полученная при КЛ и КП, не будет величиной постоянной для данного расстояния. Поэтому контроль измерений должен заключаться в сравнении между собой превышений между задней и передней точками из двух приемов. Использование вертикального базиса известной длины дает дополнительный контроль качества измерений. В этом случае разность превышений при визировании на нижний и верхний концы базиса должна равняться длине базиса.

При выполнении двустороннего тригонометрического нивелирования следует соблюдать требования, представленные в табл. 7.

Таблица 7. Требования к двустороннему тригонометрическому нивелированию III и IV классов

Table 7. Requirements for reciprocal trigonometric leveling classes III and IV

| Параметр Parameter | Значение параметра для класса Parameter value for class | |
|---|--|--------------------------|
| | III | IV |
| Паспортная точность измерения угла наклона, не более, с Potential accuracy of inclination angle measurement, not more than, s | 2" | 2" |
| Максимальная длина стороны хода, м: Maximal length of run side, m: | 300 | 350 |
| Число приемов на станции, не менее: Number of received signals on the station, not less than: | | |
| • при длине луча до 150 м for the beam length up to 150 m | 1 | 1 |
| • при длине луча свыше 150 м for the beam length over 150 m | 2 | 2 |
| Допуск на разность превышений из двух приемов, мм: Tolerance for elevation difference from two signals, mm: | | |
| • при длине луча до 150 м (при выполнении 2-го приема) for the beam length up to 150 m (for the 2 nd signal) | 4 | 5 |
| • при длине луча от 150 до 300 м for the beam length from 150 to 300 m | 7 | 8 |
| Минимальная высота визирования, м Minimal leveling height, m | 1,5 | 1,5 |
| Допустимая невязка или расхождение между превышениями из прямого и обратного хода, мм Discrepancy or difference between elevations of direct and counter run, mm | $10\sqrt{L_{\text{km}}}$ | $20\sqrt{L_{\text{km}}}$ |

В качестве визирных целей следует использовать круглые отражатели. Двустороннее тригонометрическое нивелирование III класса допускается выполнять только по трехштативной системе. Допуски на разность превышений, полученных из измерений между

двумя точками в прямом и обратном направлениях, нами не устанавливались. Это обусловлено тем, что указанные разности определяются не только точностью собственно измерений, но и в значительной степени влиянием вертикальной рефракции. Например, в статье [20] указывается, что для расстояния 400 м разность превышений из измерений в прямом и обратном направлениях из-за систематического влияния рефракции может достигать 80 мм.

Оценка точности превышений при тригонометрическом нивелировании

Для проверки теоретических положений и правильности выполненного предрасчета точности тригонометрического нивелирования летом 2018 г. были проведены полевые исследования. Работы выполнялись при температуре воздуха $+23^{\circ}\text{C}$ и переменной облачности. На местности были выбраны два грунтовых репера $Rp1$ и $Rp2$, удаленных друг от друга на расстояние 1,1 км. Между реперами примерно через

100 м было забито в грунт 10 деревянных кольев длиной 0,3 м.

Предварительно, по закрепленным точкам Т.1–Т.10, по программе II класса был проложен ход геометрического нивелирования (рис. 7, а). Подстилающая поверхность представляла собой невысокую травянистую растительность, что в значительной степени ослабило влияние вертикальной рефракции. Работы выполнялись цифровым нивелиром DiNi 0,3 в комплекте с двумя штрих-кодовыми рейками с инварной полосой длиной 2 м. Паспортная точность нивелира составляет 0,3 мм/км двойного хода. Ход прокладывался в двух направлениях, расстояние от нивелира до рейки составляло примерно 50 м. Разность превышений из прямого и обратного хода составила 1,9 мм, что не превышает допустимого значения $f_{\text{доп}} = 5 \text{ мм} \sqrt{1,1 \text{ км}} = 5,2 \text{ мм}$. За окончательные (эталонные) превышения между реперами и кольями были приняты средние значения превышений из ходов в двух направлениях.

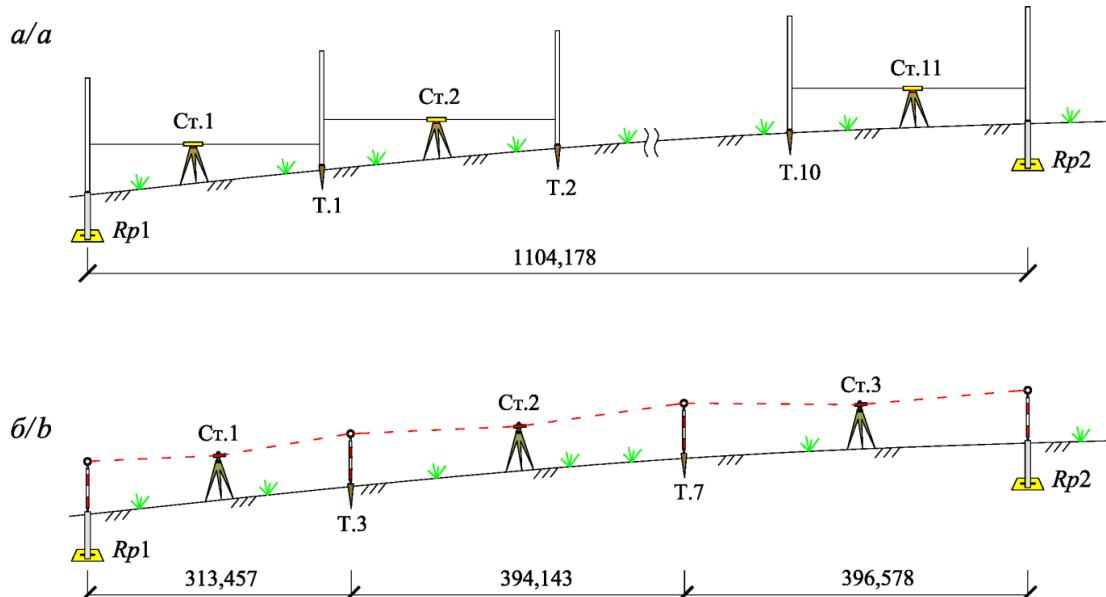


Рис. 7. Схема геометрического (а) и тригонометрического нивелирования из середины (б)

Fig. 7. Scheme of the geometric (a) and trigonometric leap-frog leveling (b)

Затем между исходными реперами был проложен ход тригонометрического нивелирования способом из середины (рис. 7, б), сначала по методике III класса (применялся тахеометр Leica TS-06 с паспортной точностью $m_a=2''$), а на следующий день – по методике IV класса, тахеометром Leica TS-02 ($m_a=5''$). В обоих случаях измерения выполнялись в условиях переменной облачности, при температуре воздуха $+20\ldots25^{\circ}\text{C}$.

В качестве визирных целей использовались стандартные круглые отражатели, закрепленные на вехах. Высота обоих отражателей была одинаковой ($l \approx 1,6 \text{ м}$). Превышение на станции измерялось двумя приемами при двух положениях вертикального круга. В обработку брались средние значения из двух приемов, если их разности не превышали 5 и 7 мм, соответственно для III и IV классов (табл. 8).

Из табл. 8 следует, что уклонения превышений из тригонометрического нивелирования от эталонных значений находятся в пределах допусков, которые вычислялись соответственно для нивелирования III и IV классов по формулам

$$\Delta_{\text{доп}}^{\text{III}} = 10 \text{ мм} \sqrt{L_{\text{км}}}, \quad \Delta_{\text{доп}}^{\text{IV}} = 20 \text{ мм} \sqrt{L_{\text{км}}}. \quad (6)$$

Невязка хода тригонометрического нивелирования III класса, проложенного в двух направлениях, составила $f_{\text{III}} = -2,86 \text{ мм}$, а хода IV класса – $f_{\text{IV}} = +5,74 \text{ мм}$, что также не превосходит допустимых значений.

На основании проведенного эксперимента можно сделать вывод о реальной возможности выполнения нивелирования III и IV классов электронными тахеометрами.

Таблица 8. Результаты сравнения геометрического и тригонометрического нивелирования

Table 8. Results of comparison of geometric and trigonometric leveling

| Точки высотного обоснования Points of vertical control | Превышение, мм, определенное из нивелирования Elevation, mm, determined from leveling | | Уклонения Δ от эталонного значения, мм Deviations Δ from standard value, mm | | | |
|---|--|-------------------------------------|--|----------------------|--------------------------|----------------------|
| | геометрическое (эталонное) geometric (standard) | тригонометрическое trigonometric | фактические actual | | допустимые admissible | |
| | | | III класс* III class | IV класс IV class | III класс III class | IV класс IV class |
| Rp1 – T.3 | +387,32 | +387,9 | +391,8 | +0,58 | +4,48 | ±5,6 ±11,2 |
| T.3 – T.7 | +715,11 | +713,8 | +711,7 | -1,31 | -3,41 | ±6,3 ±12,6 |
| T.7 – Rp2 | +349,43 | +347,3 | +354,1 | -2,13 | +4,67 | ±6,3 ±12,6 |
| Σ | +1451,86 | +1449,0 | 1457,6 | -2,86 | +5,74 | ±10,5 ±21,0 |

*Значения превышений получены как среднее из прямого и обратного ходов.

*Values are determined as average from forward and backward level run.

В настоящее время высокоточное нивелирование целесообразно применять для наполнения корпоративных ГИС данными о высотном положении объектов МТ и использовать в комплексе с данными космических съемочных систем с высоким и средним пространственным разрешением, а также материалами съемки с БПЛА и ВЛС [16, 23].

Выводы

- Базы пространственных данных об объектах МТ должны поддерживаться в актуальном состоянии. Для решения задачи инвентаризации и контроля фактического положения объектов МТ целесообразно использовать данные космической съемки сверхвысокого разрешения (<1 м), а также материалы АФС и съемки с БПЛА, обеспечивающие необходимую точность и детализацию для корректного распознавания объектов и уточнения их пространственного положения, состояния объектов и окружающей обстановки.
- Состав данных ДЗЗ для обеспечения геопространственных данных для трехмерного моделирования земной поверхности и инфраструктуры трубопроводных систем предполагает три основных массива данных, которые условно можно разбить на три уровня:
 - I-й уровень. Обзорное покрытие космической съемкой среднего разрешения (5–30 м) терри-

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Возможности визуального дешифрирования магистральных трубопроводов и объектов инфраструктуры по спутниковым изображениям высокого и сверхвысокого пространственного разрешения / Д.В. Долгополов, Д.В. Никонов, А.В. Полуянова, В.А. Мелкий // Вестник СГУГИТ. – 2019. – Т. 24. – № 3. – С. 65–81.
- Аэрофотосъемка // Сайт ZALA AERO GRUP. URL: <https://zala-aero.com/services/aerial-photography/> (дата обращения 15.03.2020).
- Zhongkun Zhang. Study on urban underground streets in modern cities // American Journal of Civil Engineering. – 2018. – V. 6. – № 2. – P. 60–67. DOI: 10.11648/j.ajce.20180602.12
- Thompson R., Oosterom P., Soon K.H. Mixed 2D and 3D Survey plans with topological encoding // The 5th International FIG 3D Cadastre Workshop. – Athens, Greece, 2016. URL: http://www.gdmc.nl/3DCadastres/literature/3Dcad_2016_17.pdf (дата обращения 15.03.2020).
- Karatash K. Land recording of objects subject to 3D cadastre in Turkey // The World Cadastre Summit – Congress & Exhibition. – Istanbul, Turkey, 2015. URL: http://www.gdmc.nl/3DCadastres/literature/3Dcad_2015_10.pdf (дата обращения 15.03.2020).
- Construction geometric model and topology for 3d cadastre – case study in Taizhou, Jiangsu / Y. Ding, C. Wu, N. Jiang, B. Ma, X. Zhou / FIG Working Week 2016. URL: http://www.gdmc.nl/3DCadastres/literature/3Dcad_2016_06.pdf (дата обращения 15.03.2020).
- Ribeiro A., Almeida J., Ellul C. Exploring city engine as a visualization tool for 3D cadaster // 4th International Workshop on FIG 3D Cadastres. – Dubai, United Arab Emirates, 2014. URL: http://www.gdmc.nl/3DCadastres/literature/3Dcad_2014_25.pdf (дата обращения 15.03.2020).
- Разработка технологической схемы геодезических работ при постановке на кадастровый учет подземных парковочных мест / Г.А. Уставич, П.П. Сальникова, В.Г. Сальников, Е.Л. Соболева // Вестник СГУГИТ. – 2018. – Т. 23 (1). – С. 54–64.
- 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.

тории РФ из открытых источников (например, Landsat и Sentinel);

- II-й уровень. Базовое покрытие космической съемкой высокого разрешения (1–5 м) линейной части МТ и прилегающих территорий с объектами в соответствии с потребностями пользователей;
- III-й уровень. Детальные материалы дистанционного зондирования сверхвысокого разрешения (<1 м), полученные с носителями различного типа (космическая съемка, аэросъемка, съемка с БПЛА), выполняемые по запросам подразделений компаний, осуществляющих эксплуатацию и мониторинг трубопроводных систем.
- При создании высотного геодезического обоснования с точностью III и IV классов вместо трудоемкого геометрического нивелирования предлагается применять метод тригонометрического нивелирования с использованием высокоточных электронных тахеометров. Наибольший эффект от применения предлагаемой методики тригонометрического нивелирования ожидается на заболоченной, пересеченной или холмистой местности, что особенно актуально для районов Крайнего Севера. Благодаря увеличению длины визирного луча до 200–300 м обеспечивается повышение производительности работ до двух раз.

Istanbul, Turkey, 2015. URL: http://www.gdmc.nl/3DCadastres/literature/3Dcad_2015_10.pdf (дата обращения 15.03.2020).

10. Mobile precise trigonometric levelling system based on land vehicle: an alternative method for precise leveling / J. Zou, Y. Zhu, Y. Xu, Q. Li, L. Meng, H. Li // Survey Review. – 2017. – V. 49. – Iss. 355. – P. 249–258.
11. Ceylan A., Baykal O. Precise height determination using simultaneous-reciprocal trigonometric leveling // Survey Review. – 2008. – V. 40 (308). – P. 195–205. DOI: 10.1179/003962608X290997.
12. Kovačić B., Kamnić R. Accuracy of trigonometric heighting and monitoring the vertical displacements // Engineering modelling. – 2007. – № 20. – P. 77–84.
13. Nestorovic Z., Delcev S. Comparison of height differences obtained by trigonometric and spirit leveling method // Geonauka. – 2014. – V. 2. – № 4. – P. 30–37.
14. Никонов А. В. Исследование точности измерения расстояний электронными тахеометрами в безотражательном режиме // Вестник СГУГиТ. – 2015. – Вып. 1 (29). – С. 43–53.
15. Křemen T., Štroner M., Trásák P. Determination of pavement elevations by the 3D scanning system and its verification // INGEO 2014 – 6th International Conference on Engineering Surveying. – Prague, Czech republic, April 3–4, 2014. – P. 69–74.
16. Опритова О.А. Исследование возможностей применения беспилотных авиационных систем для моделирования объектов недвижимости // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 23 (3). – С. 248–258.
17. Rueger J.M. EDM-height traversing refraction correction and experiences // Trans Tasman Surveyor. – June, 1995. – V. 1. – № 1. – P. 48–56.
18. Rueger J.M., Brunner F.K. Practical results of EDM-height traversing // The Australian Surveyor. – June, 1981. – V. 30. – № 6. – P. 363–372.
19. Никонов А.В. Совершенствование методики тригонометрического нивелирования короткими лучами: дис. ... канд. техн. наук. – Новосибирск, 2015. – 261 с.
20. Никонов А.В. Исследование влияния вертикальной рефракции на результаты тригонометрического нивелирования короткими лучами способом из середины // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2014. – № 1. – С. 28–34.
21. Monitoring of the refraction coefficient of the lower atmosphere using a controlled set-up of simultaneous reciprocal vertical angle measurements / C. Hirt, S. Guillaume, A. Wisbar, B. Bürki, H. Sternberg // Journal of Geophysical Research (JGR). – 2010. – V. 115. – D21102. DOI: 10.1029/2010JD014067.
22. Zienkiewicz M.H., Baryła R. Determination of vertical indicators of ground deformation in the Old and Main City of Gdańsk area by applying unconventional method of robust estimation // Acta Geodyn. Geomater. – 2015. – № 3 (179). – P. 249–257.
23. Применение воздушного лазерного сканирования для геотехнического мониторинга объектов магистрального трубопровода / Е.М. Макарычева, Э.Р. Ибрагимова, Т.И. Кузнецова, К.Ю. Шуршина // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2019. – Т. 9. – № 1. – С. 21–31. DOI: 10.28999/2541-9595-2019-9-1-21-31

Поступила: 26.03.2020 г.

Информация об авторах

Аврунев Е.И., кандидат технических наук, доцент кафедры кадастра и территориального планирования Сибирского государственного университета геосистем и технологий.

Уставич Г.А., доктор технических наук, профессор кафедры инженерной геодезии и маркшейдерского дела, Сибирского государственного университета геосистем и технологий.

Грекова А.О., магистр института кадастра и природопользования Сибирского государственного университета геосистем и технологий.

Никонов А.В., кандидат технических наук, ведущий инженер АО «Сибтехэнерго»; доцент кафедры инженерной геодезии и маркшейдерского дела Сибирского государственного университета геосистем и технологий.

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

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

UDC528.8/37/38

TECHNOLOGICAL SOLUTIONS IN SPHERE OF GEOSPATIAL INFORMATION ON LONG DISTANCE PIPELINES AND OBJECTS OF THEIR INFRASTRUCTURE

Evgeny I. Avrunev¹,
avrynev_ei@ngs.ru

Georgy A. Ustavich¹,
ystavich@mail.ru

Antonina O. Grekova¹,
antoninaop@mail.ru

Anton V. Nikonorov^{1,2},
sibte@bk.ru

Vyacheslav A. Melkiy³,
vamelkiy@mail.ru

Daniil V. Dolgopolov⁴,
daniil.dolgopolov@gmail.com

¹ Siberian State University of Geosystems and Technologies,
10, Plakhotny street, Novosibirsk, 630108, Russia.

² AO «Sibtekhenergo»,
18/1, Planirovochnaya street, Novosibirsk, 630032, Russia.

³ Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far East Branch of Russian Academy of Science,
1B, Nauki street Yuzhno-Sakhalinsk, 693022, Russia.

⁴ SpacInfo Geomatics JSC,
51, Dekabristov street, Moscow, 127490, Russia.

Relevance of the research is caused by the fact that currently in the Russian Federation, for servicing mining and development of minerals, it is necessary to perform survey and geodetic works, by the results of which arrays of geospatial data are formed. They are the basis for the design and arrangement of oil and gas fields and are the source information for three-dimensional modeling of the earth's surface, geological structures of deposits and infrastructure of pipeline systems. Besides, geospatial data is necessary for preparation of documents for state cadastral registration and registration of land use rights. Based on this, the article sets scientific and technical task: analyze the possibilities of using various methods of providing geospatial information GIS pipeline systems with data for 3D modeling of the studied fields and pipelines. Corporate GIS is filled with data on the state of pipeline transport, using information from space survey systems with high and medium spatial resolution, as well as shooting materials from unmanned aerial vehicles and aerial laser scanning. Monitoring of pipeline systems is carried out as well using ground-based geodetic survey data. One of the most common types of modern geodetic equipment is high-precision and accurate electronic total stations that allow obtaining geospatial information on terrain and anthropogenic objects both in terms of plan and height. The height component is determined as result of performing trigonometric leveling. The use of the trigonometric leveling method is especially relevant when working in rough terrain and adverse conditions, in particular in regions of the Extreme North.

The aim of the research is to analyze the possibilities of using various methods of providing geospatial information for GIS pipeline systems: satellite surveys with different spatial resolutions, unmanned aerial vehicles and aerial laser scanning data, trigonometric leveling of classes III and IV with the use of high-precision electronic total stations in the formation of geospatial data arrays of main pipeline monitoring systems.

Methods: decoding of aerospace images, experimental research in field with space survey materials, unmanned aerial vehicles and aerial laser scanning data, use of high-precision levels and electronic total stations for trigonometric leveling, geoinformation technologies

Results. Quality of geospatial information for GIS monitoring of pipeline systems was evaluated. The work shown that the data from remote sensing of the Earth with different spatial resolutions, unmanned aerial vehicles and aerial laser scanning allow forming arrays of geospatial data necessary for services operating pipeline systems, providing planned linking with sufficient accuracy; when creating high-altitude geodetic justification, when accuracy needs be increased to class III and IV, instead of time-consuming geometric leveling, it is advisable to supplement arrays with information, obtained by trigonometric leveling using high-precision electronic tacheometers.

Key words:

Geospatial data, decoding of aerospace images, geoinformation technologies, unmanned aerial vehicles, aerial laser scanning, three-dimensional model of the earth's surface, trigonometric leveling, high-precision electronic tacheometer.

REFERENCES

1. Dolgopolov D.V., Nikonorov D.V., Poluyanova A.V., Melkiy V.A. Possibilities of visual interpretation of trunk pipelines and infrastructure facilities using satellite images of high and ultra-high spatial resolution. *Vestnik of the Siberian State University of Geosystems and Technologies (SSUGT)*, 2019, vol. 24, no. 3, pp. 65–81. In Rus. DOI: 10.33764/2411-1759-2019-24-3-65-81
2. Aerial photography. Website ZALA AERO GRUP. Available at: <https://zala-aero.com/services/aerial-photography/> (accessed 15 March 2020).
3. Zhongkun Zhang. Study on Urban Underground Streets in Modern Cities. *American Journal of Civil Engineering*, 2018, vol. 6, no. 2, pp. 60–67. DOI: 10.11648/j.ajce.20180602.12
4. Thompson R., Oosterom P., Soon K.H. Mixed 2D and 3D survey plans with topological encoding. *The 5th International FIG 3D Cadastre Workshop*. Athens, Greece, 18–20 October 2016. Available at: http://www.gdmc.nl/3DCadastres/literature/3Dcad_2016_17.pdf (accessed 15 March 2020).
5. Karatas K. Land recording of objects subject to 3D cadastre in Turkey. *The World Cadastre Summit – Congress & Exhibition*. Istanbul, Turkey, 20–25 April 2015. Available at: http://www.gdmc.nl/3DCadastres/literature/3Dcad_2015_10.pdf (accessed 15 March 2020).
6. Ding Y., Wu C., Jiang N., Ma B., Zhou X. Construction geometric model and topology for 3d cadastre – case study in Taizhou,

- Jiangsu. *FIG Working Week 2016. Recovery from Disaster*. Christchurch, New Zealand, May 2–6, 2016. Available at: http://www.gdmc.nl/3DCadastres/literature/3Dcad_2016_06.pdf (accessed 15 March 2020).
7. Ribeiro A., Almeida J., Ellul C. Exploring city engine as a visualisation tool for 3D cadastre. *4th International Workshop on FIG 3D Cadastres*. Dubai, United Arab Emirates, 9–11 November 2014. Available at: http://www.gdmc.nl/3DCadastres/literature/3Dcad_2014_25.pdf (accessed 15 March 2020).
 8. Ustavich G.A., Sal'nikova P.P., Sal'nikov V.G., Soboleva E.L. Development of the technological scheme of surveying works for cadastral registration of underground parkings. *Vestnik of the Siberian State University of Geosystems and Technologies (SSUGT)*, 2018, vol. 23 (1), pp. 54–64. In Rus.
 9. 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.
 10. Zou J., Zhu Y., Xu Y., Li Q., Meng L., Li H. Mobile precise trigonometric levelling system based on land vehicle: an alternative method for precise leveling. *Survey Review*, 2017, vol. 49, Iss. 355, pp. 249–258. DOI: doi.org/10.1080/00396265.2016.1163877
 11. Ceylan A., Baykal O. Precise height determination using simultaneous-reciprocal trigonometric leveling. *Survey Review*, 2008, vol. 40 (308), pp. 195–205. DOI: [10.1179/003962608X290997](https://doi.org/10.1179/003962608X290997).
 12. Kovačić B., Kamnik R. Accuracy of trigonometric heighting and monitoring the vertical displacements. *Engineering modeling*, 2007, no. 20, 1–4, pp. 77–84.
 13. Nestorovič Z., Delčev S. Comparison of height differences obtained by trigonometric and spirit leveling method. *Geonauka*, 2014, vol. 2, no. 4, pp. 30–37. DOI: [10.14438/gn.2015.01](https://doi.org/10.14438/gn.2015.01)
 14. Nikonorov A.V. Study of reflectionless total stations distance measurement accuracy. *Vestnik of the Siberian State University of Geosystems and Technologies (SSUGT)*, 2015, vol. 1 (29), pp. 43–53. In Rus.
 15. Křemen T., Štroner M., Třásák P. Determination of pavement elevations by the 3D scanning system and its verification. *INGEO 2014 – 6th International Conference on Engineering Surveying*. Prague, Czech Republic, April 3–4, 2014. pp. 69–74. DOI: [10.14311/gi.12.9](https://doi.org/10.14311/gi.12.9).
 16. Opritova O.A. Studies of possibilities on using unmanned aircraft systems for real estate modeling. *Vestnik of the Siberian State University of Geosystems and Technologies (SSUGT)*, 2018, vol. 23 (3), pp. 248–258. In Rus.
 17. Rueger J.M. EDM-height traversing refraction correction and experiences. *Trans Tasman Surveyor*, June 1995, vol. 1, no. 1, pp. 48–56.
 18. Rueger J.M., Brunner F.K. Practical results of EDM-height traversing. *The Australian Surveyor*, June 1981, vol. 30, no. 6, pp. 363–372.
 19. Nikonorov A. V. *Sovershenstvovanie metodiki trigonometricheskogo nivelirovaniya korotkimi luchami*. Dis. Kand. nauk [Improving the technique of trigonometric leveling with short beams. Cand. Diss.]. Novosibirsk, 2015. 261 p.
 20. Nikonorov A.V. Research of vertical refraction influence upon trigonometric leveling by short beams from the middle. *Scientific journal Izvestia vuzov «Geodesy and aerophotosurveying»*, 2014, no. 1, pp. 28–34. In Rus.
 21. Hirt C., Guillaume S., Wisbar A., Bürgi B., Sternberg H. Monitoring of the refraction coefficient of the lower atmosphere using a controlled set-up of simultaneous reciprocal vertical angle measurements. *Journal of Geophysical Research (JGR)*, 2010, vol. 115, D21102. DOI: [10.1029/2010JD014067](https://doi.org/10.1029/2010JD014067).
 22. Zienkiewicz M.H., Baryla R. Determination of vertical indicators of ground deformation in the Old and Main City of Gdansk area by applying unconventional method of robust estimation. *Acta Geodyn. Geomater.*, 2015, no. 3 (179), pp. 249–257.
 23. Makarycheva E.M., Ibragimov E.R., Kuznetsov T.I., Shurshin K.Y. Using the airborne laser scanning method for geotechnical monitoring of pipeline system facilities. *Science & Technologies [Oil and Oil Products Pipeline Transportation]*, 2019, no. 9 (1), pp. 21–31. In Rus. DOI: [10.28999/2541-9595-2019-9-1-21-31](https://doi.org/10.28999/2541-9595-2019-9-1-21-31)

Received: 26 March 2020.

Information about the authors

- Evgeny I. Avrunev**, Cand. Sc., associate professor, Siberian State University of Geosystems and Technologies.
- Georgy A. Ustavich**, Dr. Sc., professor, Siberian State University of Geosystems and Technologies.
- Antonina O. Grekova**, master of science, Siberian State University of Geosystems and Technologies.
- Anton V. Nikonorov**, Cand. Sc., chief engineer, AO «Sibtekhenergo»; Siberian State University of Geosystems and Technologies.
- Vyacheslav A. Melkiy**, Dr. Sc., leading researcher, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far East Branch of Russian Academy of Science
- Daniil V. Dolgopolov**, Cand. Sc., leading researcher, SpacInfo Geomatics JSC.

УДК 622.276

ФОРМИРОВАНИЕ МЕТОДОЛОГИЧЕСКОГО ПОДХОДА ИССЛЕДОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТЬНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ НЕФТЕОТДАЧИ ПЛАСТОВ (НА ПРИМЕРЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ УДМУРТСКОЙ РЕСПУБЛИКИ)

Наговицына Наталья Петровна¹,
19nagov97@mail.ru

Дерендяев Роман Алексеевич²,
omgvoood19@gmail.com

¹ ЗАО «Ижевский нефтяной научный центр»,
Россия, 426057, г. Ижевск, ул. Свободы, 175.

² ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ»,
Россия, 614990, г. Пермь, ул. Ленина, 62.

Актуальность работы. В насторожнее время большинство нефтяных месторождений России вступили в позднюю стадию разработки. В связи с истощением запасов легкоизвлекаемой нефти все большие усилия направляются на создание технологий и способов разработки, которые позволяют добывать углеводороды в осложненных условиях. Для дальнейшей разработки месторождений с трудноизвлекаемыми запасами требуется внедрение новых методов увеличения нефтеотдачи и применение новых реагентов. Значительная роль в данном вопросе отводится химическим методам, в частности применению растворов поверхности-активных веществ. Воздействие водных растворов поверхности-активных веществ улучшает реологические и фильтрационные характеристики нефти посредством снижения межфазного напряжения и повышения смачивающей способности. В связи с вышеизложенным актуальным представляется задача выбора поверхности-активных веществ для применения в системе заводнения пластов, а также разработка методологических подходов по их подбору.

Цель: формирование методологического подхода исследования поверхности-активных веществ, применяемых в системе заводнения, для увеличения нефтеотдачи пластов.

Объект: карбонатные коллекторы месторождений Удмуртской Республики.

Методы: лабораторные исследования составов в свободном объеме, прибор для определения поверхности-активных веществ – стагнометр «Рубин-02 А» (ГОСТ Р 50097-92), фильтрационные исследования на единичных образцах керна с моделированием пластовых условий на установках УИК-5ВГ и АFS-300 (ГОСТ 39-204-86 и 39-195-86), центрифугирование (ГОСТ 16887-71).

Результаты. Обозначена актуальная проблема – процесс подбора технологии поверхности-активных веществ для эффективного применения в системе заводнения с целью достижения наибольшей нефтеотдачи пластов. Проанализированы поверхности-активные вещества, нашедшие активное промышленное применение на месторождениях России и за ее пределами. Проведена оценка физико-химических и технологических свойств поверхности-активных веществ российского производства в соответствии с паспортными характеристиками, требованиями Положений предприятия-недропользователя и определена пригодность химических реагентов к дальнейшему применению. Рассмотрены методика и результаты определения коэффициента вытеснения нефти водным раствором поверхности-активных веществ на образцах керна, отобранных с месторождений Удмуртской Республики. Предложен экспресс-метод оценки нефте вытесняющей способности поверхности-активных веществ, являющийся более экономичным и энергоресурсным по сравнению со стандартными фильтрационными исследованиями. По результатам проведения фильтрационных испытаний на керне установлено, что предлагаемый метод сопоставим с проведенными исследованиями. В целом предложенная методология выбора состава поверхности-активных веществ возможна для внедрения в локальные нормативные документы предприятия-недропользователя и использования с целью подбора необходимого реагента для увеличения нефтеизвлечения.

Ключевые слова:

Увеличение нефтеотдачи, поверхности-активные вещества, коэффициент извлечения нефти, нефтеотмывающая способность, физико-химические свойства поверхности-активных веществ, межфазное напряжение, вытесняющие свойства, вытеснение нефти, карбонатный коллектор, критическая концентрация мицеллообразования.

Введение

В насторожнее время более половины месторождений Удмуртской Республики характеризуются ниспадающим трендом добываемой нефти, максимальные уровни добычи которых уже пройдены, основная доля остаточных запасов относится к трудноизвлекаемым (рис. 1). С целью снижения темпа падения добычи нефти данных месторождений и сохранения ее на максимально возможном уровне необходимо применение различных реагентов, внедрение методов для увеличения нефтеотдачи [1–12].

Выделяют следующие методы повышения нефтеотдачи пластов (ПНП) для увеличения коэффициента извлечения нефти (КИН) [13–18]:

- газовые (вытеснение нефти газом высокого давления и обогащенным газом, водогазовое воздействие);
- тепловые (вытеснение нефти теплоносителем, внутрипластовый очаг горения);
- физические (волновое, электромагнитное воздействие);
- химические (закачка ПАВ, полимерное, щелочное заводнение).

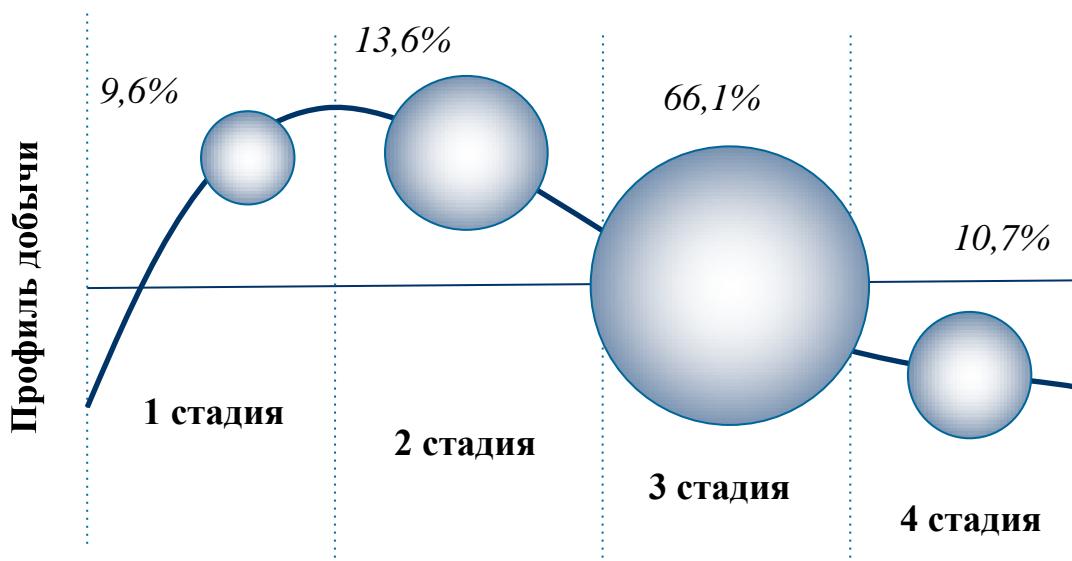


Рис. 1. Состояние разработки нефтяных месторождений в Удмуртской Республике

Fig. 1. Development status of the oil fields in the Udmurt Republic

Одним из методов повышения нефтеотдачи пластов, способствующих снижению межфазного натяжения, увеличению эффективной проницаемости по нефти, отмыку пленочной нефти, гидрофилизации поверхности горной породы являются технологии с применением поверхностно-активных веществ (ПАВ).

Применение ПАВ как перспективного реагента для ПНП стало возможным после опубликования результатов экспериментальных и промысловых испытаний в США в 40-х гг. XX в. по использованию данных добавок при заводнении нефтяных пластов. Неопровергимым достоинством их внедрения является сохранение фильтрационных свойств продуктивных коллекторов и отсутствие негативного влияния на процессы транспортировки и подготовки нефти [13, 18–21]. В Российской Федерации большой объем внедрения технологий с применением ПАВ различной концентрации осуществлен на месторождениях Башкортостана, Татарстана и Западной Сибири. Так, например, на Ромашкинском месторождении за счет внедрения водо- и маслорасторимых ПАВ добыто 2,9 млн т нефти. Эффективной оказалась также закачка водорастворимых ПАВ для первичного вытеснения нефти на терригенном коллекторе Ромашкинского месторождения – в среднем около 60 т дополнительно добытой нефти на одну тонну реагента [22]. Известен опыт применения анионных ПАВ в составе ASP-технологии (химическое заводнение пласта трехкомпонентной смесью) на истощенном участке Западно-Салымского месторождения в Ханты-Мансийском автономном округе–Югре. В результате на опытном участке месторождения удалось достичь коэффициента извлекаемой нефти в 69 %, из них эффект от применения ASP- заводнения – 17 % [23]. Таким образом, задача исследования ПАВ как технологии для повышения нефтеотдачи пластов представляется актуальной, потому как рост КИН хотя бы на несколько десятых долей процента позволит суще-

ственno нарастить объемы дополнительно добываемой нефти.

К основным факторам, влияющим на успешность применения какого-либо раствора ПАВ, можно отнести геологическое строение продуктивных пластов, геолого-физические характеристики пород-коллекторов, текущее и энергетическое состояние объекта разработки, а также опыт использования конкретной технологии. Также необходимо принять во внимание, что правильный выбор технологии с учетом индивидуальных особенностей пласта, а также воздействие в необходимый момент времени приводят к существенному росту успешности реализации методов увеличения нефтеотдачи (МУН) и повышению эффективности разработки месторождения [8–11, 19–24].

Эффективность использования ПАВ в качестве повышения нефтеотдачи может быть существенно увеличена путем понимания соответствующего подхода по их подбору. Таким образом, данная работа посвящена формированию методологического подхода исследования ПАВ с целью повышения нефтеизвлечения для пластов месторождений Удмуртской Республики.

Для проведения исследований были выбраны составы: Неонол АФ 9-6, Atren SA-1, Биксол, Сульфен-35, ОП-10. Подбор данных видов ПАВ производился исходя из опыта проведения мероприятий на месторождениях Удмуртской Республики, а также был учтен отечественный и зарубежный опыт использования ПАВ как метода увеличения нефтеотдачи [2, 13–15, 18, 19, 22–29].

Свойства составов были исследованы и проанализированы в зависимости от их областей применения по отношению к карбонатным коллекторам месторождения А (верейско-башкирский объект). Выбор данного месторождения обусловлен тем, что данный объект вступил в позднюю стадию разработки, а также характеризуется образованием многочисленных

застойных зон, тупиков, слабо вырабатываемых участков и слоев с отличающимися по объемам значениями остаточных запасов нефти и промытых зон. Основные геолого-физические характеристики исследуемого объекта представлены в табл. 1.

Таблица 1. Геолого-физическая характеристика исследуемого объекта

Table 1. Geological and physical characteristics of the studied object

| Параметр/Parameter | Месторождение А (верейско-башкирский объект) Field A (object C ₂ vr-C ₂ b) |
|--|---|
| Средняя глубина залегания, м Average depth, m | -1043 |
| Пористость, % Porosity, % | 16,0 |
| Проницаемость, мД Permeability, mD | 121 |
| Средняя эффективная нефтенасыщенная толщина, м Average effective net weight, m | 7,9 |
| Коэффициент песчанистости, д.ед. Sandiness coefficient, the share of units | 0,39 |
| Коэффициент расчлененности, д. ед. Dismemberment coefficient, the share of units | 10,33 |
| Вязкость нефти в пластовых условиях, мПа·с Oil viscosity at reservoir conditions, MPa·s | 33,5 |
| Минерализация воды, г/л Water mineralisation, g/l | 249,7 |
| Газосодержание, м ³ /т Gas content, m ³ /t | 11,3 |
| Начальное пластовое давление, МПа Initial reservoir pressure, MPa | 11,9 |
| Начальная пластовая температура, °C Initial reservoir temperature, °C | 25,7 |

Лабораторные исследования водных растворов ПАВ

Методология подбора ПАВ состояла из следующих этапов:

- изучение российского и зарубежного опыта применения ПАВ для увеличения нефтеотдачи;
- оценка физико-химических и технологических свойств ПАВ в соответствии с требованиями Положений предприятия-недропользователя;
- оценка нефтеустойчивой способности ПАВ стандартизируемым методом согласно ОСТ 39-195-86 на фильтрационной установке и экспресс-методом;
- расчет технологических и экономических показателей проекта.

Проведен комплекс исследований в свободном объеме, включающий в себя оценку внешнего вида состава ПАВ; определение физико-химических свойств реагентов (плотности, температуры застывания, массовую долю активного вещества); определение стабильности ПАВ при воздействии с пластовыми флюидами (вода и нефть обозначенных объектов); определение технологических свойств составов в условиях проведения работ (коррозионная агрессивность раствора ПАВ). Результаты исследований представлены в табл. 2.

Таблица 2. Физико-химические и технологические свойства исследуемых ПАВ

Table 2. Physico-chemical and technological properties of the studied surface-active substances

| Параметр Parameter | Неонол АФ 9-6 Neonol AF 9-6 | Атрен SA-1 Atrén SA-1 | Биксол Biksol | Сульфен-35 Sulfen-35 | ОП-10 OP-10 |
|--|---|--------------------------|-----------------------|-------------------------|----------------|
| Внешний вид Physical form | однородная не расслаивающаяся на фазы бесцветная жидкость, без взвешенных и оседающих частиц homogeneous, colorless liquid, not delaminating into phases, without suspended and settling particles | | | | |
| Температура застывания, °C Freezing point, °C | -15 | менее -50 less -50 | менее -50 less -50 | -25 | -15 |
| Плотность, г/см ³ Density, g/cm ³ | 1,045 | 0,957 | 1,008 | 1,048 | 1,089 |
| Массовая доля активного вещества, % Mass fraction of active substance, % | 93,06 | 32,89 | 32,34 | 10,71 | 10,20 |
| Коррозионная агрессивность раствора ПАВ, г/м ² ·час Corrosiveness, g/m ² ·h | 0,032 | 0,025 | 0,015 | 0,028 | 0,018 |
| Совместимость раствора ПАВ с нефтью Compatibility of surfactant solution with oil | совместимо/compatible | | | | |
| Совместимость раствора ПАВ с пластовой водой Surfactant solution compatibility with formation water | наличие геля gel | совместимо/compatible | | | |

Процесс исследования совместимости ПАВ с пластовой водой заключался в следующем. Для испытания готовили 0,1; 0,5; 1,0; 2,0 % растворы ПАВ в минерализованной пластовой воде месторождения А. Выдержка растворов ПАВ после приготовления производилась в течение 24 часов. Изготовленный состав удовлетворяет условиям, если после взаимодействия с пластовой водой не происходит выпадения осадка и расслоения. На основании проведенных исследований отмечается образование прозрачного раствора со всеми исследуемыми ПАВ кроме Неонол АФ 9-6, где наблюдается наличие геля. Процесс исследования совместимости нефти и ПАВ заключался в приготовлении растворов ПАВ аналогичной концентрации и выдерживании их в течение суток после перемешивания с нефтью. По результатам исследований все исследуемые составы признаны совместимыми, расслоений и осадков не выявлено.

Далее производилось вычисление межфазного натяжения растворов ПАВ на границе с нефтью. Определение поверхностного натяжения производилось с помощью специального прибора – стагнометр «Рубин-02 А». Значения межфазного натяжения определялись согласно методу отрыва капели по ГОСТ Р 50097-92. Результаты исследований межфазного натяжения представлены на рис. 2.

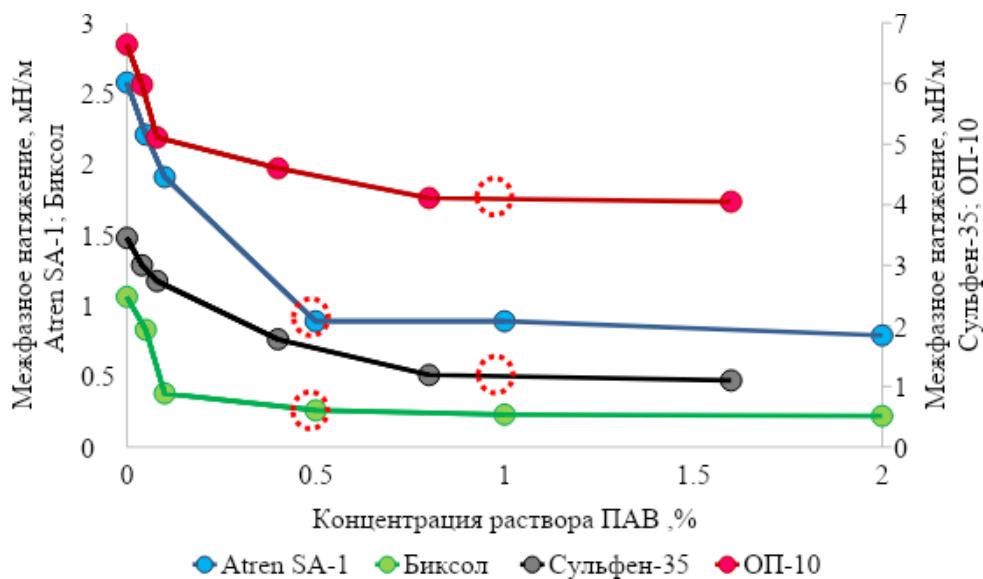


Рис. 2. Зависимость межфазного натяжения от концентрации ПАВ в растворе. \square – критическая концентрация мицеллообразования

Fig. 2. Dependence of interfacial tension on concentration of surface-active substances. \square – critical concentration for micelle formation

На основании анализа графиков зависимости межфазного натяжения от концентрации ПАВ установлено, что в растворах всех исследуемых ПАВ существует некоторая насыщенность, после достижения которой при добавлении в состав ПАВ плотность вещества на границе раздела фаз остается постоянной – это критическая концентрация мицеллообразования (ККМ). Эта концентрация поверхностно-активных веществ является достаточной для достижения эффекта снижения межфазного натяжения на границе нефть/раствор ПАВ. По результатам исследований границы раздела фаз установлено, что растворы ПАВ в рабочих концентрациях обеспечивают снижение поверхностной энергии на границе с нефтью более чем на 30 % по сравнению с силой натяжения без применения реагента.

Таблица 3. Результаты фильтрационных исследований ПАВ на карбонатном коллекторе

Table 3. Results of filtration studies of surfactants on carbonate reservoirs

| ПАВ SAS | Концентрация раствора ПАВ, % Solution concentration SAS, % | Коэффициент вытеснения нефти, д. ед. Oil displacement coefficient, decimal quantity | | |
|--------------------------|--|---|--|---|
| | | До обработки раствором ПАВ Before treatment with surfactant solution | После обработки раствором ПАВ After treatment with a surfactant solution | Относительное увеличение, % Relative increase, % |
| Atren SA-1 Atren SA-1 | 0,5 | 0,603 | 0,668 | 10,8 |
| Биксол Biksol | 0,1 | 0,588 | 0,619 | 5,3 |
| Сульфен-35 Sulfen-35 | 1,0 | 0,618 | 0,638 | 3,2 |
| ОП-10 OP-10 | 1,0 | 0,598 | 0,626 | 4,7 |

С целью определения основных коллекторских свойств горных пород фильтрационные исследования образцов керна производились с учетом термобарических условий залегания данных пород на установках УИК-5ВГ и АФС-300. Полученные результаты проведенных испытаний представлены в табл. 3.

При проведении фильтрационных испытаний использовались карбонатные образцы керна с эффективной проницаемостью по нефти в диапазоне от $63,4 \cdot 10^{-3}$ до $541,7 \cdot 10^{-3}$ мкм². Последовательность выполнения работ на фильтрационной установке testируемых растворов следующий:

- 1) образец помещается в установку АФС-300, где производится моделирование пластовых условий;
- 2) насыщение образца моделью пластовой нефти путем её фильтрации через керн со скоростью 0,1 см³/мин в количестве не менее трех объемов пустотного пространства образца;
- 3) выдержка насыщенного образца керна при термобарических условиях пласта в течение не менее суток для стабилизации свойств системы флюид–порода;
- 4) определение фазовой проницаемости по нефти керновых образцов с остаточной водонасыщенностью в прямом направлении «пласт–скважина» при создании пластового давления;
- 5) закачка вытесняющего агента (пластовой воды с раствором ПАВ) с расходом 0,1 см³/мин в прямом направлении через нефтенасыщенный керновый образец с остаточной водонасыщенностью;
- 6) непрерывное нагнетание вытесняющего агента до полного обводнения выходящей жидкости (порядка 3–5 объемов порового пространства образца);
- 7) создание фильтрации вытесняющего раствора жидкости в количестве двух объемов пор при скорости не менее 1 см³/мин;

- 8) измерение объема дегазированной нефти с помощью специальной мерной бюретки;
- 9) вычисление коэффициента вытеснения нефти (β) агентом:

$$\beta = \frac{V_h}{V_{h \text{ нач}}},$$

где β – коэффициент вытеснения нефти агентом; $V_{h \text{ нач}}$ – первоначальный содержащийся в керне объем нефти: определяется как разность объемов пустот и остаточной воды, приведенных к пластовым условиям; V_h – объем нефти, вытесненной из составных керновых образцов в ходе проведения фильтрационных испытаний.

Также, ввиду длительности и дорогостоящей процедуры проведения фильтрационных испытаний, были проведены исследования экспресс-метода оценки эффективности нефтеотмывающей способности ПАВ. Сущность испытаний заключается в следующем.

Нефтеотмывающая способность ПАВ определяется методом центрифугирования. Для этого предварительно в течение 24 ч при пластовой температуре и

давлении произведено насыщение нефтью мраморной крошки, моделирующей состав карбонатного коллектора. По истечении суток контрольный объем (5 г) насыщенной нефтью мраморной крошки был помещен в проградуированную пробирку диаметром 10 мм (рис. 3). Далее производилось заполнение емкости раствором исследуемого ПАВ в объеме 6 мл. Центрифугирование проводится в три этапа по 15 мин с частотой вращения 1500 об/мин. После проведения опыта по градуированной шкале пробирки определяют объем нефти, вытесненной из образца.

В качестве объектов исследования выступили водные растворы с концентрацией ПАВ 0,1; 0,5; 1,0; 2,0 для определения эффективности действия экспресс-метода, а также определения качественных и количественных различий в полученных результатах (рис. 4). На основе анализа полученных результатов исследований наибольшее вытеснение нефти водным раствором ПАВ при его минимальных затратах получено при концентрации, равной критической концентрации мицеллообразования (табл. 4).



a/a



b/b



c/c



d/d

Рис. 3. Последовательность проведения исследований на определение нефтеотмывающей способности ПАВ экспресс-методом: а) мраморная крошка – модель карбонатного типа коллектора; б) мраморная крошка, насыщенная нефтью; в) пробирка с нефтенасыщенной мраморной крошкой и раствором ПАВ; г) сравнение вытеснения нефти пластовой водой (слева) и водным раствором ПАВ (справа)

Fig. 3. Sequence of studies to determine the oil-washing ability of surfactants by the express method: a) marble chips – a model of the carbonate type of the reservoir; b) marble chips, saturated with oil; c) test tube with oil-saturated marble chips and a surfactant solution; d) comparison of oil displacement with formation water (left) and an aqueous surfactant solution (right)

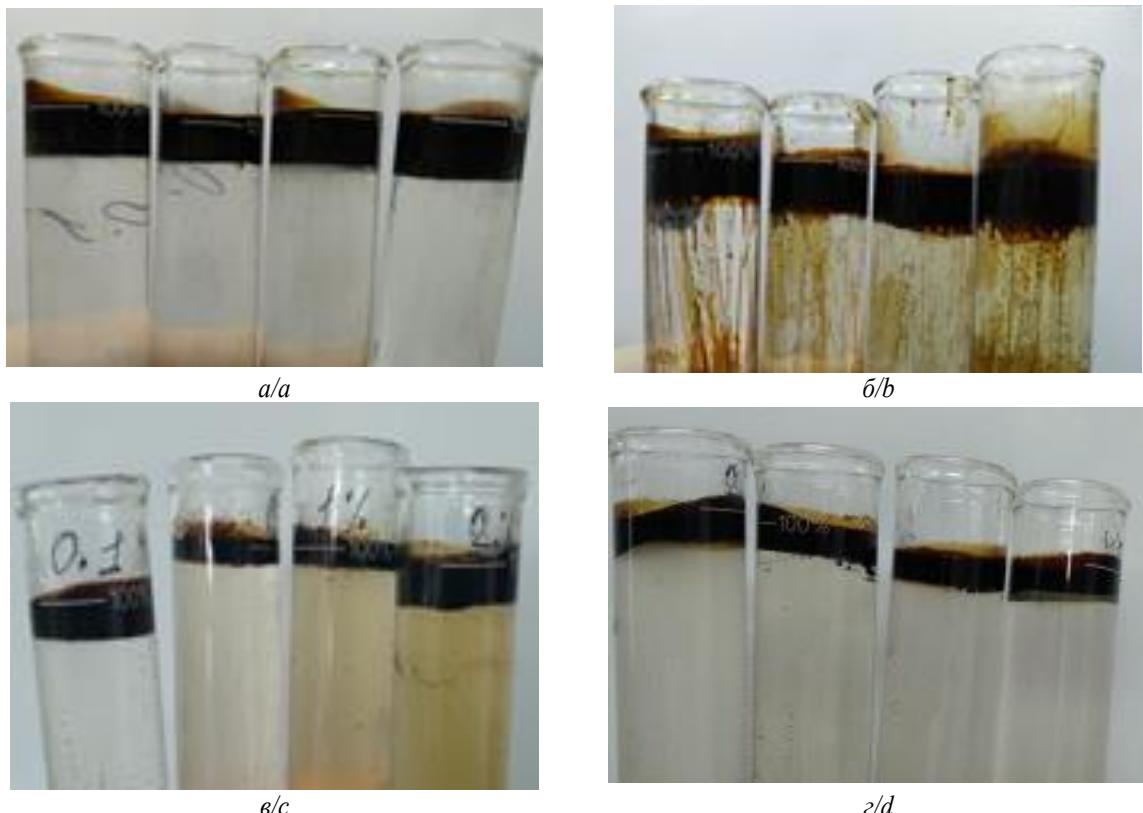


Рис. 4. Результаты исследований оценки нефтеотмывающей способности ПАВ экспресс-методом: а) Atren SA-1; б) Биксол; в) Сульфен-35; г) ОП-10

Fig. 4. Results of studies evaluating the oil washing ability of surfactants by express method: a) Atren SA-1; b) Biksol; c) Sulfen-35; d) OP-10

Таблица 4. Результаты исследований оценки нефтеотмывающей способности ПАВ экспресс-методом

Table 4. Results of studies evaluating the oil washing ability of surfactants by express method

| Объект исследования Object of research | Концентрация раствора ПАВ, % Concentration of SAS, % | Вытеснение нефти водным раствором ПАВ относительно пластовой воды, ед. Oil displacement with an aqueous surfactant solution relative to produced water, unity |
|---|---|--|
| Пластовая вода Reservoir water | – | 1 |
| Биксол Biksol | 0,1 | 2,5 |
| | 0,5 | 3 |
| | 1 | 4 |
| | 2 | 4,3 |
| Atren SA-1 Atren SA-1 | 0,1 | 2,5 |
| | 0,5 | 3 |
| | 1 | 3,3 |
| | 2 | 4 |
| Сульфен-35 Sulfen-35 | 0,1 | 1,5 |
| | 0,5 | 1,5 |
| | 1 | 1,5 |
| | 2 | 2,5 |
| ОП-10 OP-10 | 0,1 | 1,5 |
| | 0,5 | 1,5 |
| | 1 | 2 |
| | 2 | 2 |

Таким образом, по результатам экспресс-метода оценки эффективности нефтеотмывающей способности ПАВ установлено, что растворы ПАВ в рабочих концентрациях увеличивают нефтеотмывание по сравнению с пластовой водой. На основании анализа результатов коэффициента вытеснения нефти, определенного экспресс-методом оценки и по фильтрационным испытаниям согласно ОСТ 39-195-86, выявлена соизмеримость данных значений, что подтверждает корреляционную зависимость определения коэффициента вытеснения нефти данными методами (рис. 5).

Также выполнено сравнение данных двух методов по определению коэффициента вытеснения путем суммирования затрат времени (ресурсов) производства работ. Оценка времени производилась по каждой отдельно взятой операции в необходимой последовательности выполнения работ (табл. 5).

Предлагаемый экспресс-метод оценки моющей способности ПАВ является менее трудозатратным процессом: в среднем экономия времени составляет 48 ч на одного человека. Таким образом, экспресс-метод определения моющей способности ПАВ является более экономно-ресурсным, однако имеет более низкую точность, чем стандартные фильтрационные испытания по ОСТ 39-195-86, что подтверждается сопоставлением результатов исследований данных двух методов (рис. 5).

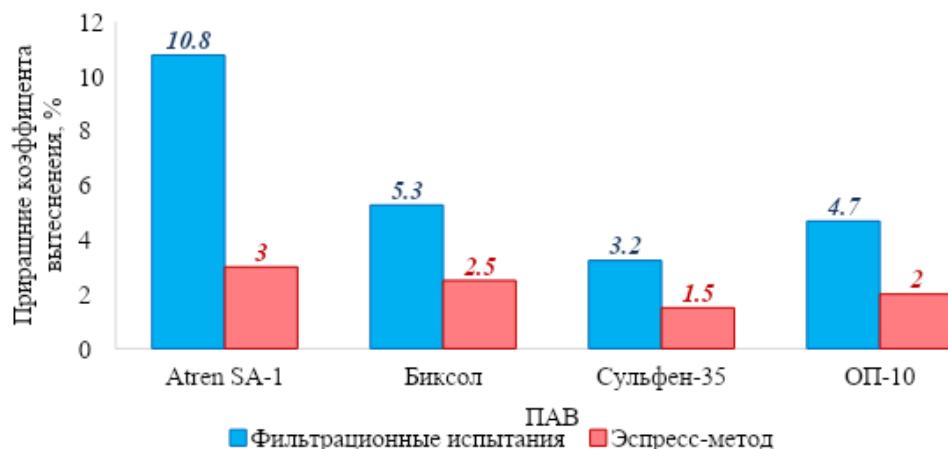


Рис. 5. Сопоставление результатов определения коэффициента вытеснения на фильтрационной установке и экспресс-метода

Fig. 5. Comparison of the results of determining the displacement coefficient in a filtration unit and the express method

Таблица 5. Сравнение трудозатрат методов определения коэффициента вытеснения

Table 5. Comparison of labor contribution of methods for determining the coefficient of displacement

| Фильтрационные испытания по ОСТ 39-195-86 Filtration tests | | Экспресс-метод Express method | |
|--|--|---|--|
| Виды работ Type of work | Трудозатраты, чел·час Labor contribution, man-hours | Виды работ Type of work | Трудозатраты, чел·час Labor contribution, man-hours |
| Отбор и подготовка образцов Sampling and preparation of rock samples | 10,83 | Приготовление раствора ПАВ Preparation of surface-active substance solution | 1,03 |
| Подготовка модели пласта Reservoir model preparation | 8,20 | Насыщение мраморной крошки нефтью Saturation of marble chips with oil | 2,55 |
| Подготовка жидкостей для проведения эксперимента Preparation of fluids for the experiment | 6,00 | Заполнение пробирки мраморной крошкой и пластовой водой с ПАВ Filling the test tube with marble chips and produced water with a surfactant | 0,15 |
| Фильтрационный эксперимент Filtration experiment | 24,57 | Процесс центрифугирования Centrifugation | 1,15 |
| Анализ результатов, расчеты Analysis of results, calculations | 6,00 | Анализ результатов, расчеты Analysis of results, calculations | 2,33 |
| Итоговые трудозатраты Total labor | 55,60 | Итоговые трудозатраты Total labor | 7,21 |

Конечным результатом проведенных исследований стало определение наиболее эффективного состава ПАВ для вытеснения нефти, а также определение экономической эффективности от применения определенного ПАВ в системе заводнения с последующим

проведением опытно-промышленных испытаний на верейско-башкирском горизонте месторождения А. Таким образом, предложенная методология выбора состава ПАВ возможна для внедрения в локальные нормативные документы предприятия-недропользователя и использования с целью подбора необходимого реагента для увеличения нефтеизвлечения.

Заключение

В работе обозначена актуальная проблема – процесс подбора технологии ПАВ для эффективного применения в системе заводнения с целью достижения наибольшей нефтеотдачи пластов. Проанализированы составы, нашедшие активное промышленное применение на месторождениях России и за ее пределами. Проведена оценка физико-химических и технологических свойств ПАВ российского производства в соответствии с требованиями Положений предприятия-недропользователя и определена пригодность химических реагентов к дальнейшему применению. По результатам проведенных исследований сформирован методологический подход подбора ПАВ, а также получены результаты определения коэффициента вытеснения нефти его водным раствором на образцах керна, отобранных с месторождения Удмуртской Республики. Определение коэффициента вытеснения является важной задачей, потому как он напрямую связан с нефтенасыщенностью пласта и играет важную роль для оценки продуктивности горизонта и определения коэффициента извлечения нефти. Предложен экспресс-метод оценки нефте вытесняющей способности ПАВ, являющийся более экономичным и менее энергозатратным по сравнению со стандартными фильтрационными исследованиями. По результатам проведения фильтрационных испытаний на керне установлено, что предлагаемый метод сопоставим с проведенными исследованиями. В целом предложенная методология выбора ПАВ возможна для внедрения в локальные нормативные документы предприятия-недропользователя и использования с целью подбора необходимого реагента для увеличения нефтеизвлечения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Байков Н.М. Зарубежный опыт внедрения методов увеличения нефтеотдачи // Нефтяное хозяйство. – 2008. – № 12. – С. 101–103.
2. Прочухан К.Ю. Современные методы увеличения нефтеотдачи. Практический опыт применения отечественной технологии Щелочь-ПАВ-Полимер (ASP) на нефтяных месторождениях Западной Сибири // Нефть. Газ. Новации. – 2014. – № 10. – С. 50–54.
3. Hoffman B.T., Kovscek A.R. Efficiency and oil recovery mechanisms of steam injection into low permeability, hydraulically fractured reservoirs // Petroleum Science and Technology. – 2004. – V. 22. – № 5–6. – P. 537–564.
4. Муслимов Р.Х. Методы повышения эффективности разработки нефтяных месторождений на поздней стадии // Нефтяное хозяйство. – 2008. – № 3. – С. 30–34.
5. Жданов С.А. Повышение нефтеотдачи пластов на поздней стадии разработки месторождений // Вестник Российской академии естественных наук. – 2017. – Т. 17. – № 5. – С. 8–10.
6. Ibragimov Kh.M., Abdullayeva F., Guseynova N.I. Experience of microbial enhanced oil recovery methods at Azerbaijan fields // Petroleum Science and Technology. – 2017. – V. 35. – № 18. – P. 1822–1830.
7. Фомкин А.В., Жданов С.А. Тенденции применения технологий повышения эффективности нефтеизвлечения // Технологии нефти и газа. – 2015. – № 5. – С. 31–35.
8. Крянёв Д.Ю., Жданов С.А. Применение методов увеличения нефтеотдачи пластов в России и за рубежом. Опыт и перспективы // Бурение и нефть. – 2011. – № 2. – С. 22–26.
9. Муслимов Р.Х. Повышение роли методов увеличения нефтеотдачи в обеспечении воспроизводства запасов нефти // Георесурсы. – 2007. – № 3 (22). – С. 2–7.
10. Фомкин А.В., Жданов С.А. Анализ условий для внедрения методов увеличения нефтеотдачи в России и за рубежом // Недропользование XXI века. – 2015. – № 7. – С. 96–105.
11. Перспективы повышения нефтеотдачи карбонатных коллекторов с использованием третичных методов на месторождениях АО «Зарубежнефть» / А.В. Соловьев, М.М. Хайруллин, А.В. Жиров, И.С. Афанасьев, Г.Д. Федорченко // Нефтяное хозяйство. – 2018. – № 9. – С. 48–51.
12. Yin D.D., Li Y.Q., Zhao D.F. Utilization of produced gas of CO₂ flooding to improve oil recovery // Journal of the Energy Institute. – 2014. – V. 84. – № 4. – P. 289–296.
13. Вязкоупругие водные растворы цвиттер-ионных поверхностно-активных веществ для увеличения нефтеотдачи пластов / Р.А. Расулов, А.А.М. Аль-мунтасер, Р.Р. Мингазов, Н.Ю. Башкирцева, Л.Ш. Сибагатуллина // Вестник Казанского технологического университета. – 2015. – Т. 18. – № 9. – С. 85–88.
14. Surfactant and surfactant-polymer flooding for enhanced oil recovery / Abhijit Samanta, Keka Ojha, Ashis Sarkar, Ajay Mandal // Advances in Petroleum Exploration and Development. – 2011. – V. 2. – № 1. – P. 13–18.
15. An overview of chemical enhanced oil recovery: recent advances and prospects / A.O. Gbadamosi, R. Junin, M.A. Manan, A. Agi, A.S. Yusuff // International Nano Letters. – 2019. – V. 9. – P. 171–202.
16. Методические особенности проведения экспериментальных исследований по вытеснению нефти газовым и водогазовым воздействием / А.М. Петраков, Ю.А. Егоров, И.А. Лебедев, Т.Л. Ненартович, В.А. Старковский // Нефтяное хозяйство. – 2016. – № 2. – С. 60–64.
17. Experimental study of use of ionic liquids in enhanced oil recovery / M.S. Bin-Dahbag, A.A. Al-Qurishi, M.S. Benzagouta, M.M. Kinawy, I.M. Al-Nashif, I. Al-Mushigeh // Journal of Petroleum and Environment Biotechnology. – 2014. – V. 4. – № 6. – P. 1–7.
18. Wormlike micellar solutions, beyond the chemical enhanced oil recovery restrictions / Emad Jafari Nodoushan, Taeil Yi, Young Ju Lee, Namwon Kim // Fluids. – 2019. – V. 4. – № 173. – P. 1–24.
19. A new chemical-enhanced oil recovery method? / S.M. Hosseini-Nasab, P.L.J. Zitha, S.A. Mirhaj, M. Simjoo // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. – 2016. – V. 507. – P. 89–95.
20. Исследование свойств низкоконцентрированных растворов ПАВ и композиций на их основе для вытеснения остаточной нефти / Л.С. Брилиант, Н.Р. Старкова, А.О. Гордеев, В.Г. Новожилов // Нефтяное хозяйство. – 2000. – № 9. – С. 35–38.
21. Muhammad Shahzad Kamal, Syed M. Shakil Hussain, Lionel Talley Fogang. A zwitterionic surfactant bearing unsaturated tail for enhanced oil recovery in high-temperature high-salinity reservoirs // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. – 2018. – V. 21. – № 1. – P. 165–174.
22. Муслимов Р.Х. Освоение супергигантского Ромашкинского месторождения – выдающийся вклад ученых и специалистов России в мировую нефтяную науку и практику разработки нефтяных месторождений // Георесурсы. – 2008. – № 4 (27). – С. 2–5.
23. Шарипова Н.Д., Севастьянов А.А. Анализ зарубежного и российского опыта по применению ASP-технологии // Электронный периодический научный журнал Sci-article.ru. – 2016. – № 33. – С. 119–124.
24. Применение коллоидных систем для увеличения нефтеотдачи пласта / О.Ю. Сладковская, Н.Ю. Башкирцева, Д.А. Куряшов, А.И. Лахова, Р.Р. Мингазов, И.Ф. Исмагилов, Б.Р. Вагапов // Вестник Казанского технологического университета. – 2010. – № 10. – С. 585–91.
25. Quality assurance and quality control of surfactants for field-scale enhanced-oil-recovery pilot projects / J.R. Barnes, D.W. Batenburg, M.J. Faber, C.H. Rijn, S. Geib, S.V. Kuijk, D.P. Regalado, T. King, M.J. Doll, L.E. Crom // SPE Reservoir Evaluation & Engineering. – 2019. – V. 22. – № 2. – P. 565–576.
26. Сравнительная характеристика нефтеотмывающей способности анионных поверхностно-активных веществ отечественного и зарубежного производства / А.В. Ващенко, И.Р. Мукминова, К.Ю. Прочухан, Ю.А. Прочухан // Нефтепромысловое дело. – 2015. – № 8. – С. 44–46.
27. Экспресс-метод исследования пластовых нефей / К.Д. Ашмян, С.Г. Вольгин, А.К. Пономарев, О.В. Ковалева // Нефтяное хозяйство. – 2016. – № 10. – С. 95–97.
28. Мартюшев Д.А. Лабораторные исследования кислотных составов для обработки коллекторов, характеризующихся различной карбонатностью и структурой пустотного пространства горных пород // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 4. – С. 6–12.
29. Сюзев А.В., Лекомцев А.В., Мартюшев Д.А. Комплексная методика подбора реагентов для удаления асфальтеносмоло-парафиновых отложений в механизированных нефтедобывающих скважинах // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 1. – С. 15–24.

Поступила 16.06.2020 г.

Информация об авторах

Наговицына Н.П., инженер ЗАО «Ижевский нефтяной научный центр».
Дерендяев Р.А., инженер ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ».

UDC 622.276

FORMATION OF A METHODOLOGICAL APPROACH FOR RESEARCH OF SURFACE-ACTIVE SUBSTANCES TO ENHANCED OIL RECOVERY (ON THE EXAMPLE OF DEPOSIT OF THE UDMURT REPUBLIC)

Natalya P. Nagovitsyna¹,

19nagov97@mail.ru

Roman A. Derendyaev²,

omgvood19@gmail.com

¹ CJSC «Izhevsk Oil Research Center»,
175, Svobody avenue, Izhevsk, 426057, Russia.

² LLC «LUKOIL-Perm»,
62, Lenin street, Perm, 614990, Russia.

The relevance of the research. Currently, most of oil fields of Russia have entered the late stage of development. As there is the depletion of easily recoverable oil reserves, more and more efforts are directed at creating technologies and development methods that allow producing hydrocarbons in difficult conditions. For further development of fields with hard-to-recover reserves, the introduction of new methods for increasing oil recovery and the use of new reagents are required. A significant role in this matter is given to chemical methods, in particular the use of solutions of surfactants. Exposure of aqueous surfactant solutions improves the rheological and filtration characteristics of oil by reducing interfacial tension and increasing wetting ability. In this relation, the task of choosing a surfactant for use in the waterflooding system of reservoirs, as well as the development of methodological approaches for their selection, is of current interest. **The main aim** of the research is to form a methodological approach to study the surfactants used in the waterflooding system to increase oil recovery.

Object: carbonate collectors of Udmurt Republic.

Methods: laboratory studies of compositions, device for determining the surface tension of surfactant solutions – stalagmometer «Rubin-02 A», filtration units with simulation of formation conditions of UIP-5VG and AFS-300, centrifuge process.

Results. The paper identifies the urgent problem – the process of selecting surfactant technology for effective application in the waterflooding system for achieving the highest oil recovery. The surface-active substances that have found active industrial use in the fields of Russia and beyond are analyzed. The physicochemical and technological properties of Russian-made surfactants were evaluated in accordance with the passport characteristics, the requirements of the Provisions of a subsurface user enterprise, and the suitability of chemicals for further use was determined. The paper considers the methodology and results of determining the coefficient of oil displacement with aqueous surfactant solution on core samples taken from deposits in the Udmurt Republic. An express method for assessing the oil-displacing ability of a surfactant is proposed. It is more economical and energy-efficient in comparison with standard filtration studies. According to the results of filtration tests on the core, it was found that the proposed method is comparable with the studies. In general, the proposed methodology for the choice of surfactant composition is possible for implementation in local regulatory documents of a subsoil user enterprise and for use in order to select the necessary reagent to increase oil recovery.

Key words:

Enhanced oil recovery, surface-active substance, coefficient of oil recovery, oil-sweeping ability, physical-chemical properties of SAS, surface tension, displacing properties, oil displacement, carbonate reservoir, critical concentration for micelle formation.

REFERENCES

1. Baykov N.M. Foreign experience in introducing enhanced oil recovery methods. *Oil Industry*, 2008, no. 12, pp. 101–103. In Rus.
2. Prochuhin K.Yu. Modern methods of increasing oil recovery. Practical experience of using domestic technology alkaline-surfactant-polymer (ASP) in oil fields of Western Siberia. *Oil. Gas. Novation*, 2014, no. 10, pp. 50–54. In Rus.
3. Hoffman B.T., Kovsek A.R. Efficiency and oil recovery mechanisms of steam injection into low permeability, hydraulically fractured reservoirs. *Petroleum Science and Technology*, 2004, vol. 22, no. 5–6, pp. 537–564.
4. Muslimov R.Kh. Methods for increasing the efficiency of oil field development at a late stage. *Oil Industry*, 2008, no. 3, pp. 30–34. In Rus.
5. Zhdanov S.A. Enhanced oil recovery at a late stage of field development. *Bulletin of the Russian Academy of Natural Sciences*, 2017, vol. 17, no. 5, pp. 8–10. In Rus.
6. Ibragimov Kh.M., Abdullayeva F., Guseynova N.I. Experience of microbial enhanced oil recovery methods at Azerbaijan fields. *Petroleum Science and Technology*, 2017, vol. 35, no. 18, pp. 1822–1830.
7. Fomkin A.V., Zhdanov S.A. Trends in the application of technologies for increasing oil recovery efficiency. *Oil and Gas Technologies*, 2015, no. 5, pp. 31–35. In Rus.
8. Kryanev D.Yu., Zhdanov S.A. Application of enhanced oil recovery methods in Russia and abroad. Experience and prospects. *Drilling and oil*, 2011, no. 2, pp. 22–26. In Rus.
9. Muslimov R.Kh. Enhancing the role of enhanced oil recovery methods in ensuring the reproduction of oil reserves. *Georesources*, 2007, no. 3 (22), pp. 2–7. In Rus.
10. Fomkin A.V., Zhdanov S.A. Analysis of conditions for the introduction of enhanced oil recovery methods in Russia and abroad. *Subsoil use XXI century*, 2015, no. 7, pp. 96–105. In Rus.
11. Solovyev A.V., Khayrullin M.M., Zhirov A.V., Afanasyev I.S., Fedorchenko G.D. Prospects for enhanced oil recovery of carbonate reservoirs using tertiary methods in the fields of JSC Zarubezhneft. *Oil Industry*, 2018, no. 9, pp. 48–51. In Rus.
12. Yin D.D., Li Y.Q., Zhao D.F. Utilization of produced gas of CO₂ flooding to improve oil recovery. *Journal of the Energy Institute*, 2014, vol. 84, no. 4, pp. 289–296.
13. Rasulov R.A., Al-muntaser A.A.M., Mingazov R.R., Bashkirceva N.Yu., Sibgatullina L.Sh. Viscoelastic aqueous solutions of zwitterionic

- surfactants to increase oil recovery. *Bulletin of Kazan Technological University*, 2015, vol. 18, no. 9, pp. 85–88. In Rus.
- 14. Abhijit Samanta, Keka Ojha, Ashis Sarkar, Ajay Mandal. Surfactant and Surfactant-Polymer Flooding for Enhanced Oil Recovery. *Advances in Petroleum Exploration and Development*, 2011, vol. 2, no. 1, pp. 13–18.
 - 15. Gbadamosi A.O., Junin R., Manan M.A., Agi A., Yusuff A.S. An overview of chemical enhanced oil recovery: recent advances and prospects. *International Nano Letters*, 2019, vol. 9, pp. 171–202.
 - 16. Petrakov A.M., Egorov Yu.A., Lebedev I.A., Nenartovich T.L., Starkovskiy V.A. Methodological features of experimental studies on the displacement of oil by gas and water-gas exposure. *Oil Industry*, 2016, no. 2, pp. 60–64. In Rus.
 - 17. Bin-Dahbag M.S., Al-Qurishi A.A., Benzagouta M.S., Kinawy M.M., Al-Nashif I.M., Al-Mushigeh I. Experimental study of use of ionic liquids in enhanced oil recovery. *Journal of Petroleum and Environment Biotechnology*, 2014, vol. 4, no. 6, pp. 1–7.
 - 18. Emad Jafari Nodoushan, Taeil Yi, Young Ju Lee, Namwon Kim. Wormlike micellar solutions, beyond the chemical enhanced oil recovery restrictions. *Fluids*, 2019, vol. 4, no. 173, pp. 1–24.
 - 19. Hosseini-Nasab S.M., Zitha P.L.J., Mirhaj S.A., Simjoo M. A new chemical-enhanced oil recovery method? *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2016, vol. 507, pp. 89–95.
 - 20. Brilliant L.S., Starkova N.R., Gordeev A.O., Novozhilov V.G. Investigation of the properties of low-concentration surfactant solutions and compositions based on them for the displacement of residual oil. *Oil Industry*, 2000, no. 9, pp. 35–38. In Rus.
 - 21. Kamal M.S., Shakil Hussain S.M., Fogang L.T. A zwitterionic surfactant bearing unsaturated tail for enhanced oil recovery in high-temperature high-salinity reservoirs. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2018, vol. 21, no. 1, pp. 165–174.
 - 22. Muslimov R.Kh. Development of the Romashkino supergiant field is a great contribution of Russian scientists and experts to world petroleum science and oil development practice. *Georesources*, 2008, no. 4 (27), pp. 2–5. In Rus.
 - 23. Sharipova N.D., Sevastyanov A.A. Analysis of foreign and Russian experience in the application of ASP-technology. *Electronic Periodic Scientific Journal Sci-article.ru*, 2016, no. 33, pp. 119–124. In Rus.
 - 24. Sladovskaya O.Yu., Bashkirtseva N.Yu., Kuryashov D.A., Lakhova A.I., Mingazov R.R., Ismagilov I.F., Vagapov B.R. The use of colloidal systems to increase oil recovery. *Bulletin of Kazan Technological University*, 2010, no. 10, pp. 585–591. In Rus.
 - 25. Barnes J.R., Batenburg D.W., Faber M.J., Rijn C.H., Geib S., Kuijk S.V., Regalado D.P., King T., Doll M.J., Crom L.E. Quality assurance and quality control of surfactants for field-scale enhanced-oil-recovery pilot projects. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 2019, vol. 22, no. 2, pp. 565–576.
 - 26. Vashchenko A.V., Mukminova I.R., Prochukhan K.Yu., Prochukhan Yu.A. Comparative characteristics of the oil washing ability of anionic surfactants of domestic and foreign production. *Oilfield engineering*, 2015, no. 8, pp. 44–46. In Rus.
 - 27. Ashmyan K.D., Volpin S.G., Ponomarev A.K., Kovaleva O.V. Express method for the study of reservoir oils. *Oil Industry*, 2016, no. 10, pp. 95–97. In Rus.
 - 28. Martyushev D.A. Laboratory research of acid compositions for treating reservoirs characterized by different carbonate content and structure of the void space of rocks. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 4, pp. 6–12. In Rus.
 - 29. Syuzev A.V., Lekomtsev A.V., Martyushev D.A. Complex method for the selection of reagents for the removal of asphaltene-resin-paraffin deposits in mechanized oil production wells. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 1, pp. 15–24. In Rus.

Received: 16 June 2020.

Information about the authors

Natalya P. Nagovitsyna, engineer, CJSC «Izhevsk Oil Research Center».

Roman A. Derendyaev, engineer, LLC «LUKOIL-Perm».

УДК 504.3.054:620.2-403.8

УРАН И ТОРИЙ В АЭРОЗОЛЬНЫХ ВЫПАДЕНИЯХ Г. НОВОСИБИРСКА И ЕГО ОКРЕСТНОСТЕЙ (ЗАПАДНАЯ СИБИРЬ)

Артамонова Светлана Юрьевна,
artam@igm.nsc.ru

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

Актуальность исследования обусловлена необходимостью развития геоэкологических подходов к оценке качества воздуха урбанизированных территорий и выявления вклада выбросов отдельных промышленных источников в общее техногенное загрязнение городского воздуха.

Цель: определить техногенную аэрозольную нагрузку и аэрозольное выпадение *Th* и *U* в окрестностях пяти крупных промышленных предприятий г. Новосибирска.

Объекты: пылеаэрозольные частицы, накопленные в снеговом покрове окрестностей ТЭЦ-2, ТЭЦ-3, ТЭЦ-5, Новосибирского оловокомбината и Новосибирского завода химических концентратов в течение зимнего периода. Техногенная радиоактивная составляющая в аэрозолях г. Новосибирска и его окрестностей ранее в открытом печати подробно не рассматривалась.

Методы: отбор крупнообъемных проб снегового покрова (до 400 дм³) для выделения путем фильтрования достаточной для анализа навески твердых взвесей из талого снега; определение плотности среднесуточного выпадения аэрозолей (среднесуточной аэрозольной нагрузки) путем расчетов через отношение массы твердых взвесей, полученных из проб талого снега, к площади отбора и количеству суток существования снегового покрова (со дня формирования снегового покрова до отбора пробы); определение содержания сажи в аэрозолях путем озоляции при 550 °C, определение содержания *Th* и *U* рентгенофлуоресцентным методом на синхротронном излучении и масс-спектрометрическим методом на индуктивно-связанной плазме.

Результаты. На основе данных плотности среднесуточного выпадения аэрозолей в пределах основных ореолов выбросов промышленных предприятий г. Новосибирска проведена оценка загрязнения воздуха городской среды. Определено содержание в аэрозолях *Th* и *U* и плотность их выпадения на поверхность земли вместе с аэрозолями. Наиболее высокое содержание урана установлено в аэрозолях, отобранных в пределах ореолов выбросов Новосибирского завода химконцентратов. Выявлены особенности поступления *Th* и *U* с выбросами ТЭЦ при сжигании бурого и каменного углей.

Ключевые слова:

Промышленные выбросы, аэрозольные выпадения, техногенные аэрозоли, снеговой покров, радионуклиды, торий, уран, Новосибирск.

Введение

Загрязнение воздуха мегаполисов, промышленных центров является актуальной геоэкологической проблемой, которой занимается все больше исследователей и число публикаций по этой теме с каждым годом растет [1]. При поиске по ключевым словам «power station, emission, pollution» в корневой базе данных Web of Science на 19.12.2019 г. найдено 186 опубликованных работ. То, что большая половина из них представлена авторами из четырех стран: 33 – из Китая, 23 – из России, 23 – из США, 21 – из Индии, косвенно подтверждает, что проблема аэрозольного загрязнения приземного воздуха особо остро стоит в тех странах, где наблюдаются большие темпы промышленного роста, как Китай [2], и в странах, где доминирует угольная энергетика, как Россия [3], где 67,7 % электроэнергии вырабатывается на ТЭЦ (на 01.01.2019 г.) [4]. Большое внимание придается изучению аэрозольных частиц меньше 10 и 2,5 мкм в силу их высокой биологической доступности и, следовательно, повышенных рисков для здоровья человека [5].

Радиоактивная составляющая аэрозольных выпадений в основном изучается с точки зрения оценки последствий ядерных испытаний XX в., аварий на Фукусиме и Чернобыльской АЭС: 14 из 21 найденных публикаций по ключевым словам «aerosol, fallout,

uranium» посвящены именно этим проблемам радиоэкогеохимии искусственных радиоизотопов. Особый интерес вызывают объекты ядерно-топливного цикла (ЯТЦ), с выбросами которых в окружающую среду поступает обогащенный уран с пониженным $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ отношением [6]. Глобальность масштабов техногенных выбросов в приземном слое атмосферы проявляется в установлении в аэрозольных выпадениях Японии обедненного урана во время войны в Ираке 2003 г., по-видимому, вызванного использованием бронебойных снарядов с обедненным ураном [7], как и обогащенного урана в аэрозолях Арканзаса, как последствие аварийного падения летательного аппарата в Канаде в 1980 г. [8].

Между тем уран и торий – естественные радионуклиды – могут начать интенсивно переноситься в приземном слое атмосферы в результате сжигания больших объемов угля [5]. На примере крупных мегаполисов Китая выявлено, что в Китае уран и торий являются одними из основных компонентов мелкодисперсных техногенных аэрозолей урбанизированных территорий [2].

Аэрозоли, как правило, собирают путем прямого отбора проб на фильтрах или выделяют из дождевой воды [2, 9]. Формирование и сохранение снегового покрова в условиях Сибири, севера США и Канады дает возможность отбирать интегральные пробы

аэрозолей, накопленных в снегу за зимний период [10–12]. Эти пробы дают возможность оценить аэрозольные выпадения в целом за сезон, выявить более общие закономерности на небольшом количестве проб, чем при прямом отборе проб. В составе аэрозолей, накопленных в снеге склона Скалистых гор, четко прослеживается региональное влияние частиц из соленых озер и почв штата Юта, переносимых ветром [11]. В Сибири первыми пробы снега изучали исследователи г. Новосибирска в рамках проекта «Аэрозоли Сибири»: было выявлено влияние эрозии солончаков и засоленных почв Казахстана в формировании состава аэрозолей Новосибирской области [13].

Большой задел в изучении снега окрестностей топливно-энергетических предприятий, где сжигается уголь, сделан исследователями Томского политехнического университета [3, 12, 14, 15]. В снеге U, Lu, Zn, F, Cs, в почвах Sr, Eu, Lu были определены в качестве геохимических индикаторов выбросов Сибирского химического комбината [15], этот список индикаторных элементов далее был расширен за счет всего ряда РЗЭ, а также Th, Ba, Y, Nb, Zr, Tl, также в аэрозолях СХК впервые установлено снижение изотопного отношения $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ до 74,28 [16].

Проблема техногенной радиоактивной составляющей в аэрозолях г. Новосибирска и его окрестностей в связи с выбросами предприятия атомной энергии – Новосибирского завода химических концентратов (НЗХК) – впервые обсуждалась в открытой печати [17]. С тех пор продолжается накопление фактических данных путем ежегодного отбора крупнообъемных проб снега и изотопно-геохимического изучения жидкой и твердой фазы снега.

Целью работы было определить в окрестностях крупных промышленных предприятий г. Новосибирска радиоактивную составляющую аэрозольной техногенной нагрузки путем установления плотности среднесуточного выпадения аэрозолей и содержания Th и U в аэрозолях.

Краткая характеристика промышленных источников выбросов г. Новосибирска

В настоящее время к наиболее крупным промышленным источникам выбросов г. Новосибирска можно отнести четыре теплоэнергетических предприятия (ТЭЦ-2, ТЭЦ-3, ТЭЦ-4 и ТЭЦ-5) и два комбината: Новосибирский Оловокомбинат (ОК) и Новосибирский завод химконцентратов (НЗХК) (рис. 1). ТЭЦ-2 и ТЭЦ-3 с трубами высотой 100 и 120 м расположены на левом берегу р. Обь. ТЭЦ-4 с трубой всего в 60 м, являющаяся спутником НЗХК, и наиболее крупная ТЭЦ-5 с высокой трубой в 260 м расположены на правобережной части города. Мощность ТЭЦ-5 превосходит остальные ТЭЦ от 2,2 до 2,6 раз [18] (рис. 2). На всех ТЭЦ г. Новосибирска в качестве основного топлива используется уголь: бурые угли Назаровского, Бородинского разрезов Канско-Ачинского угольного бассейна – на ТЭЦ-3 и с 2018 г. – на ТЭЦ-5, а каменные угли Кузнецкого угольного бассейна – на остальных ТЭЦ (в т. ч. на ТЭЦ-5 до 2018 г.). Известно, что бурые угли при гипергенном окислении и под

действием грунтовых вод нередко накапливали уран [19]. Каменные угли Кузнецкого угольного бассейна часто отличаются высокой зольностью и значимым содержанием U и Th, обусловленных содержанием в углях кластического вулканогенного материала [19]. Следовательно, есть основания ожидать наличие U и Th в выбросах ТЭЦ г. Новосибирска.

Ранее проведенными исследованиями было выявлено, что ОК – предприятие цветной металлургии, расположенное на левобережье г. Новосибирска, является источником значительного загрязнения городского воздуха мышьяком, оловом и комплексом халькофильных металлов [10], но до настоящего времени содержание урана, тория в его выбросах еще не оценивалось.

Предприятие ядерно-топливного цикла НЗХК со спутником – ТЭЦ-4, расположено на северо-восточной окраине города. На НЗХК выпускаются топливные элементы для атомных станций и исследовательских реакторов на протяжении более 30 лет. Производство связано с ураном [20], потому возможное поступление урана с выбросами НЗХК в городской воздух нуждается в изучении.

Таким образом, актуальность оценки аэрозольных выпадений урана и тория в окрестностях перечисленных промышленных предприятий не подлежит сомнению, поскольку это касается экологического благополучия городской среды.

Экспериментальная часть

В Новосибирске в зимнее время преобладают ветры южного и юго-западного направлений [21], поэтому пробоотбор снегового покрова проводился по маршруту с подветренной стороны от труб предприятий в середине марта, за исключением 2015 г., когда он был проведен на месяц раньше – в середине февраля.

Вокруг труб ОК, ТЭЦ-2 и ТЭЦ-3 отбор проб проводился на расстояние до 3 км до берега р. Обь (рис. 1). На правобережье из-за отсутствия участков с ненарушенным снеговым покровом отбор снега проведен только на берегу р. Обь.

Обширная промзона НЗХК не позволяет отбор проб с подветренной стороны ближе чем в 4 км. Труба ТЭЦ-5 превышает в 2,2–4,5 раза трубы других ТЭЦ и эффективно рассеивает ее выбросы на большей территории. В результате маршруты пробоотбора в пределах основных ореолов этих предприятий были более протяженными – до 10 км (рис. 1). Кроме того, аэрозольные выпадения изучались на юго-восточной части г. Новосибирск: около Новосибирского Академгородка (АГ), около пос. Ключи (Кл). Участки АГ и Кл отличаются удаленностью от шлейфов выбросов рассматриваемых крупных промышленных источников. Для исключения влияния автодорог пробоотбор проводился на удалении в 200 м и более от дорог. Фоновый участок выбран с наветренной стороны в 12 км к юго-западу от города (рис. 1).

Снеговой покров отбирался на всю его мощность, в каждой точке проходили от нескольких до десятка шурфов (рис. 3), объем пробы составлял от 70 до

200 дм³, а в фоновой точке – 400 дм³. Крупнообъемные пробы снега позволили получить навески твердых аэрозолей, достаточные для проведения всего комплекса лабораторных анализов. Пробы снега расставляли в закрытых пластиковых емкостях. Твердую взвесь отделяли путем фильтрования с использованием бумажного фильтра «синяя лента».

Плотность среднесуточного выпадения аэрозолей (мг/м²·сут), так называемая аэрозольная нагрузка, определялась как отношение массы взвесей к площади отбора и периоду существования устойчивого снежного покрова до отбора пробы. Содержание сажистых частиц в аэрозолях определялось путем озоления при 550 °С.

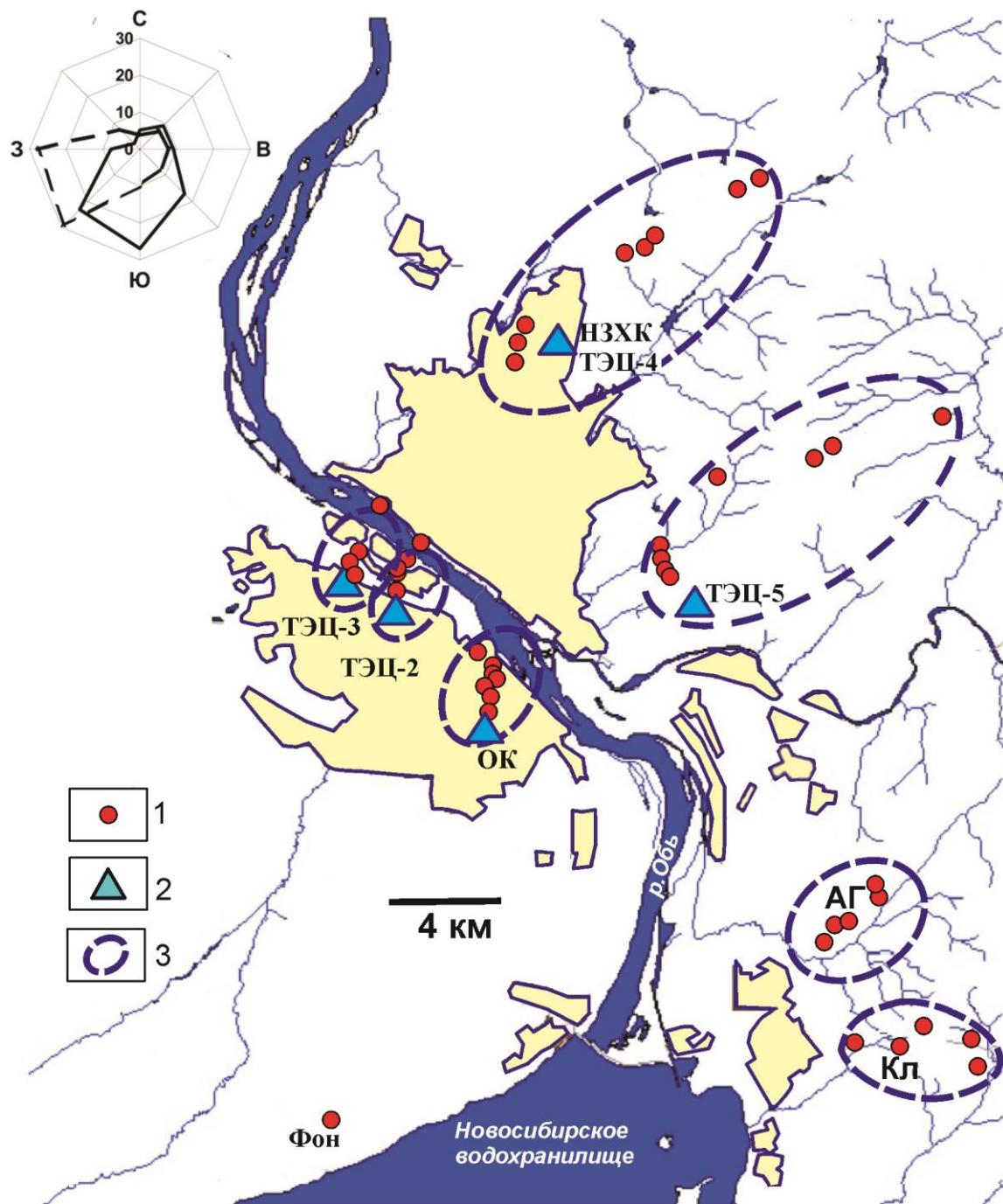


Рис. 1. Расположение промышленных предприятий г. Новосибирска и точек отбора проб снежного покрова. Условные обозначения: 1 – точки отбора проб снега; 2 – предприятия – крупные источники выбросов; 3 – ореолы техногенного аэрозольного загрязнения. Сокращения названий предприятий см. по тексту. Наверху слева – роза ветров в зимнее время [21] (сплошная линия – в приземном воздухе, прерывистая линия – на высоте 500 м)

Fig. 1. Position of the plants in Novosibirsk city and sampling points. Legend: 1 – snow sampling points; 2 – the plants – significant sources of industrial emission; 3 – aureoles of aerosol pollution. Acronyms of the plants see in the text. The wind rose diagram [21] is shown on the left up (line – on the earth surface, dash line – on the 500 m of high)

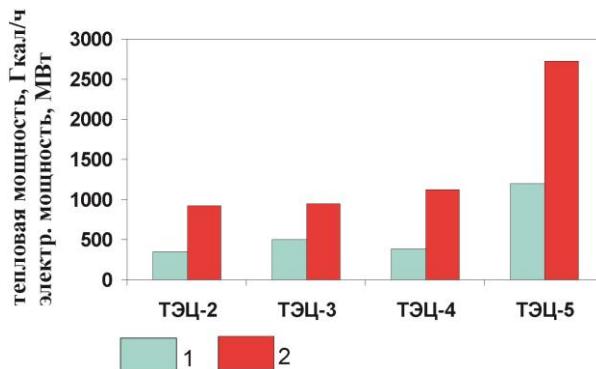


Рис. 2. Электрическая (МВт) (1) и тепловая (Гкал/ч) (2) мощность ТЭЦ г. Новосибирска [18]

Fig. 2. Electrical (MW) (1) and heat-generating (GCal/h) (2) power of Heat-Electricity generating plants of Novosibirsk city [18]

Содержание U, Th и других элементов определено на ЦКП «Сибирский центр синхротронного и террагерцового излучения» ИЯФ СО РАН рентгенофлуоресцентным методом на синхротронном излучении (РФА-СИ) с нижним пределом обнаружения до 0,3 г/т с относительной погрешностью $\leq 15\%$, использовался внешний стандарт почвы SOIL-7 МАГАТЭ. Большим преимуществом метода является простая подготовка – гомогенизация и таблетирование 30 мг

сухой навески с сохранением в пробе летучих и легких компонентов. Метод позволяет получить количественные данные о содержании 35 элементов, включая U и Th [22]. Дополнительно привлекался масс-спектрометрический метод на индуктивно-связанной плазме (МС-ИСП) на масс-спектрометр ELEMENT (Finnigan Mat, Germany), для анализов навеска в 100 мг предварительно озолялась и переводилась в раствор.

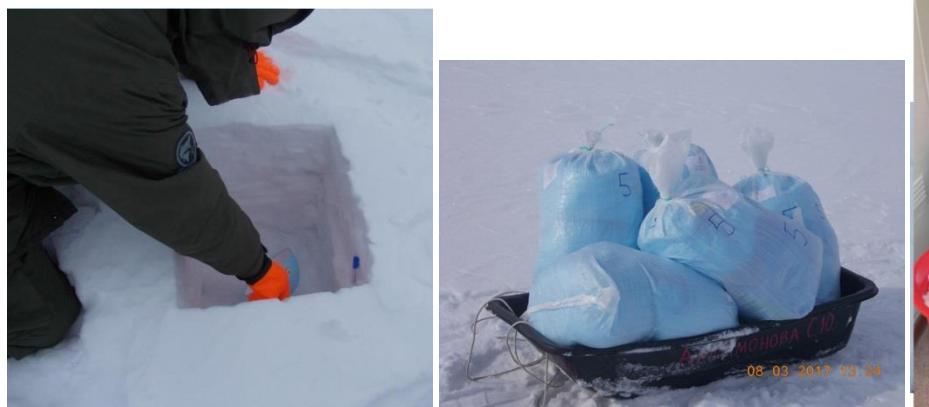


Рис. 3. Отбор крупнообъемной пробы № 5 в 2017 г. (до 400 дм³) проходкой шурфов на всю глубину снежного покрова и один из этапов ее подготовки

Fig. 3. Hand pit in snow cover sampling of large volume (until 400 dm³ in volume) of the snow sample No. 5 in 2017 and one of the steps of sampling preparation

Результаты и обсуждение

Чем загрязненнее воздух, тем больше аэрозолей связывается при снегопаде со снегом и выпадает, акумулируясь в сугробах. Следовательно, плотность выпадения аэрозолей адекватно отражает степень загрязненности местного городского воздуха. Наиболее высокая средняя плотность среднесуточного выпадения аэрозолей за 2011, 2014–2017 гг. оказалась присуща ореолу ТЭЦ-3 – 137 мг/м²·сут (рис. 4).

На ТЭЦ-3 сжигается бурый уголь. По-видимому, из-за большого содержания летучих компонентов и влаги в буром угле по сравнению с каменным углем и более низкой температурой его горения образуется больше выбросов и, соответственно, наблюдается высокая аэрозольная нагрузка в ореоле ТЭЦ-3. В ореоле расположенного поблизости ТЭЦ-2, где сжигается каменный уголь, средняя плотность среднесуточного выпадения аэрозолей меньше – 107 мг/м²·сут.

Плотность среднесуточного выпадения аэрозолей в разные годы остается примерно одинаковым, что указывает на постоянство доминирующих источников выбросов на местности в зимний период. Например, в ореоле НЗХК, имеющего единый ореол выбросов со спутником ТЭЦ-4, плотность среднесуточного выпадения аэрозолей в разные годы составляла от 97 до 102 мг/м²·сут, только в 2015 г. – всего 60,4 мг·сут/м². По-видимому, на снижение показателя в 2015 г. повлиял более ранний отбор пробы – в феврале вместо марта, т. е. сокращение примерно на 1 месяц периода позиционирования сугробового покрова в качестве депонирующего слоя (рис. 5).

В ореоле самой мощной, примерно в 2,5 раза превышающей мощности других, ТЭЦ-5 (рис. 2), где на время отбора проб (до 2018 г.) основным топливом был каменный уголь, плотность среднесуточного выпадения аэрозолей оказалась невысокой и составила

67 $\text{мг}/\text{м}^2\cdot\text{сут}$ (рис. 4). Предполагается, что малой аэрозольной нагрузке в ореоле ТЭЦ-5, по-видимому, способствует более эффективное рассеивание выбросов с высоты 260-метровой трубы. Возможно, также это результат более эффективного золоулавливания, ведь ТЭЦ-5 наиболее современная по сравнению с остальными городскими ТЭЦ (год ввода ТЭЦ-5 – 1985 г. [18]). В пределах ореола ОК средняя плотность среднесуточного выпадения аэрозолей составила 67 $\text{мг}/\text{м}^2\cdot\text{сут}$, как и в ореоле ТЭЦ-5.

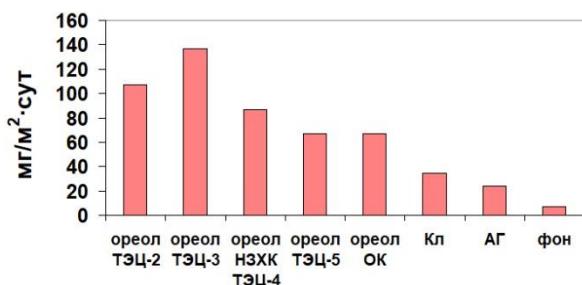


Рис. 4. Средняя за 2011, 2014–2017 гг. плотность среднесуточного выпадения аэрозолей в ореолах промышленных предприятий г. Новосибирска ($\text{мг}/\text{м}^2\cdot\text{сут}$). Сокращения: юго-восточные окрестности г. Новосибирска: Кл – участок Ключи, АГ – около Новосибирского Академгородка. Фон – фоновый участок в 12 км к юго-западу от города (район пос. Плановый)

Fig. 4. Mean diurnal aerosol fallout in oreols of the plants ($\text{mg}/\text{m}^2\cdot\text{day}$) in 2011, 2014–2017. Legend: Кл – site Klyuchi, АГ – site Akademgorodok on the eastern-south vicinity of the Novosibirsk, Фон – background site in 12 km toward southern-west from Novosibirsk (vicinity of settlement Planovuy)

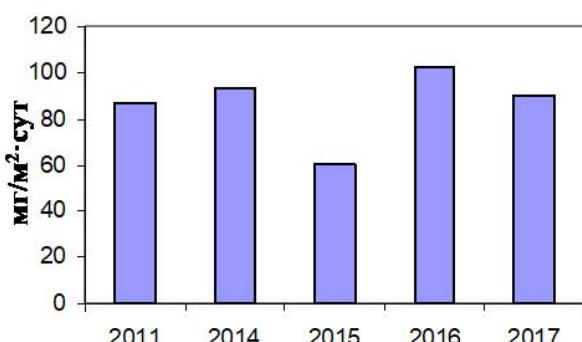


Рис. 5. Средняя плотность среднесуточного выпадения аэрозолей в ореоле НЗХК (со спутником ТЭЦ-4) зимой ($\text{мг}/\text{м}^2\cdot\text{сут}$) по данным снеговых проб в 2011–2017 гг.

Fig. 5. Mean diurnal aerosol fallout in oreols of the NCCP (with satellite HEPP-4) ($\text{mg}/\text{m}^2\cdot\text{day}$) by the data of snow samples in 2011–2017

Вдали от крупных промышленных предприятий, в юго-восточной окрестности г. Новосибирска, вблизи Новосибирского Академгородка, обозначенного как участок АГ (рис. 1), среднесуточная аэрозольная нагрузка составила всего в 23,9 $\text{мг}/\text{м}^2\cdot\text{сут}$, что примерно в 3 и более раза меньше, чем в ореолах промышленных предприятий города, и, следовательно, на столько же здесь чище воздух. Аэрозольная

нагрузка на участке Кл – 34,3 $\text{мг}/\text{м}^2\cdot\text{сут}$, что примерно в 2 раза ниже нагрузки промышленных районов, но выше, чем на участке АГ (рис. 1, 4). Предполагается, что участок Кл подвергается загрязнению выбросов г. Бердска, расположенного к юго-востоку от него. Фоновый участок отличается от всех других изученных участков самой низкой среднесуточной аэрозольной нагрузкой – в среднем всего 7,2 $\text{мг}/\text{м}^2\cdot\text{сут}$ (рис. 4).

Выявлено гетерогенное распределение содержания U и Th в аэрозолях, что позволило на Th-U диаграмме оконтурить шесть геохимических полей (рис. 6).

Геохимическое поле № 1 на левом нижнем углу Th-U диаграммы сформировано аэрозолями участка АГ – среднее содержание Th составило 5,4 г/т, U – 1,6 г/т.

Аэрозоли в ореоле схожих по мощности ТЭЦ-2 и ТЭЦ-3 отличаются по содержанию радионуклидов: на U-Th диаграмме они формируют геохимические поля № 2 и 3. В аэрозолях ТЭЦ-3 содержание и взаимное отношение Th и U варьируют в широком диапазоне, в связи с этим оконтурено геохимическое поле № 2 сложной конфигурации. Среднее содержание радионуклидов низкое: Th – 5,3 г/т, U – 2,5 г/т. Геохимическое поле № 3 – компактное. В аэрозолях ТЭЦ-2 среднее содержание Th составляет 10,1 г/т, а U – 3,0 г/т.

Аэрозоли участка Ключи на диаграмме Th-U большей частью попадают в геохимическое поле № 3, среднее содержание Th составляет 9,3 г/т, а U – 3,5 г/т. Аэрозоли Оловокомбината (ОК) формируют компактное геохимическое поле № 4 в центральной части Th-U диаграммы со средним содержанием Th – 7,0 г/т и U – 3,4 г/т.

Аэрозоли ТЭЦ-5 и НЗХК (совместно с ТЭЦ-4) формируют геохимические поля № 5 и 6 в правой части Th-U диаграммы. Главным образом аэрозоли НЗХК и ТЭЦ-5 отличаются от аэрозолей других участков тем, что содержат больше U. Среднее содержание U в аэрозолях ореола НЗХК – 5 г/т, в аэрозолях ТЭЦ-5 – 4,7 г/т, а среднее содержание Th 12,3 и 10,5 г/т соответственно. Наиболее высокое содержание U в 9,9 г/т обнаружено в 4,8 км к северо-востоку от НЗХК.

Итак, геохимическое поле № 1 сформировано аэрозолями участка АГ. Это вполне логично – здесь, вдали от крупных промышленных предприятий, характерны не только слабая аэрозольная нагрузка (рис. 4), но и низкое содержание радионуклидов в аэрозолях – среднее содержание Th – 5,74 и U – 1,6 г/т, что даже немного ниже фонового содержания. Среднее содержание Th на фоновом участке составило 7,0 г/т, U – 2,43 г/т, что близко к кларковым содержаниям в почвах – 7,8 и 2 г/т [23]. По Л.П. Рихванову в природных геосистемах распространены, как правило, Th/U отношения в диапазоне от 2,5 до 5,0 [24]. Среднее Th/U отношение в фоновых аэрозолях составило 2,86, что лежит в диапазоне обычных природных отношений. По-видимому, на фоновом участке преобладают аэрозоли природного происхождения. Поскольку

аэрозольная нагрузка на АГ в 3 раза превышает фоновый уровень (рис. 4), техногенный привнос аэрозолей, по-видимому, с малым содержанием радионуклидов, приводит к разубоживанию содержания Th и U в аэрозолях. Среднее Th/U отношение в аэрозолях АГ равно 3,2 – в пределах природного диапазона

(рис. 7, 8). В связи с этим можно предположить, что на участке АГ доминируют выбросы локального источника с низким содержанием Th и U с сохранением их природного соотношения (возможно, например, пыление при сельскохозяйственном или строительном производстве).

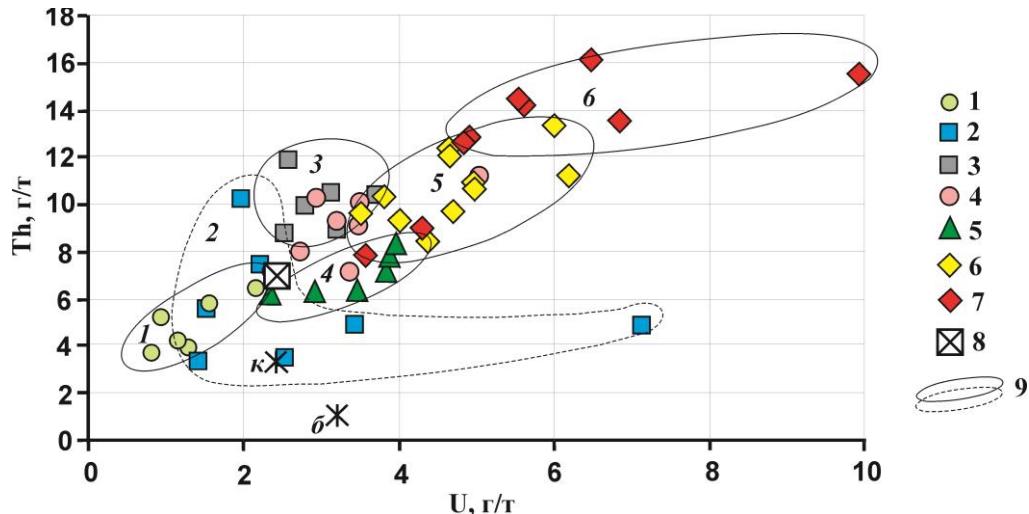


Рис. 6. Содержание Th и U в аэрозолях Новосибирска и его окрестностей, г/т. Условные обозначения: аэрозоли: 1 – участка АГ (юго-восточной окрестности г. Новосибирска около Академгородка вне основных ореолов крупных промышленных предприятий), аэрозоли из ореолов выбросов: 2 – ТЭЦ-3; 3 – ТЭЦ-2; 4 – участка Ключи (Кл); 5 – Оловокомбината (ОК); 6 – ТЭЦ-5, 7 – НЗХК и ТЭЦ-4; 8 – фоновый участок; 9 – среднее содержание Th и U в каменных углях Кузбасса (κ) и бурых углях Канско-Ачинского бассейна (б) по С.И. Арбузову [19]; 10 – геохимические поля: 1 – вне основных ореолов крупных промышленных предприятий; 2 – ореол ТЭЦ-3; 3 – ореол ТЭЦ-2; 4 – Оловокомбинат (ОК); 5 – ореол ТЭЦ-5; 6 – ореол НЗХК и ТЭЦ-4

Fig. 6. Th and U content in aerosol of Novosibirsk city and its vicinity, g/t. Designations: aerosol samples from the aureoles of: 1 – south-east of Novosibirsk vicinity outside the aureoles of major emissions from industrial enterprises (AG); 2 – HEPP-3; 3 – HEPP-2; 4 – Klyuchi site (Kl); 5 – NTP (OK); 6 – HEPP-5; 7 – NCCP and HEPP-4; 8 – background site, 9 – average Th and U content in coal from the Kuznetsky Basin (k) and Kansk-Achinsk Basin (b) according to S.I. Arbuzov [19]; 10 – Geochemical fields: 1 – outside major aureoles of aerosol pollution; 2 – aureoles of pollution from HEPP-3, 3 – aureoles of pollution from HEPP-2; 4 – aureole of pollution from NTP (OK); 5 – aureole of pollution from HEPP-5, 6 – aureole of pollution from NTP and HEPP-4

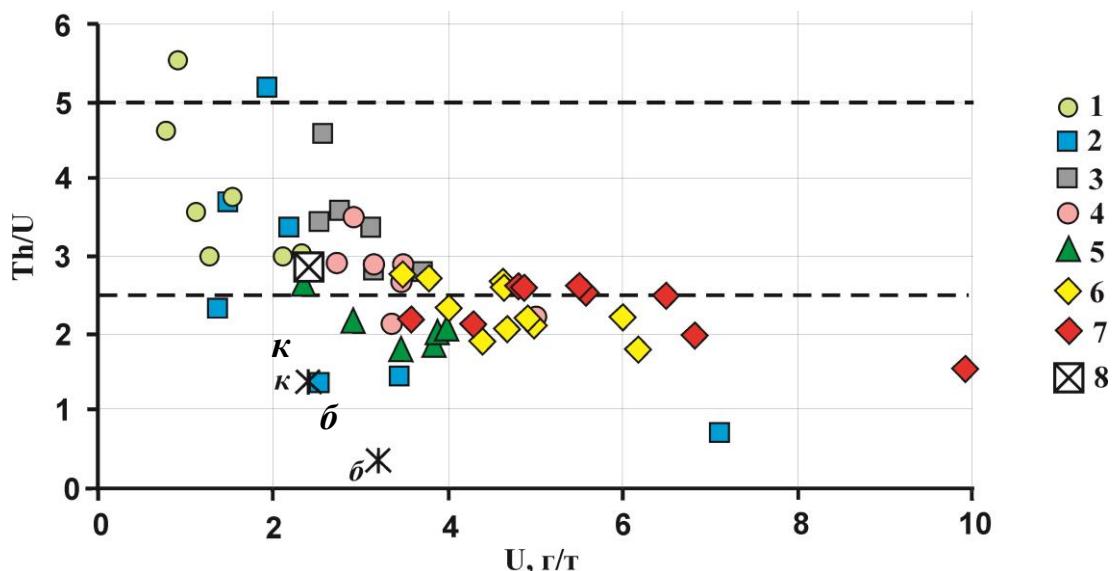


Рис. 7. Отношение Th/U в аэрозолях Новосибирска и его окрестностей. Условные обозначения см. на рис. 6. Прерывистой линией показан диапазон Th/U значений от 2,5 до 5 для природных систем

Fig. 7. Th/U ratio in the aerosols of Novosibirsk city and its vicinity. Legend see in Fig. 6. The range of values Th/U (2,5–5) of natural geosystems is shown by cut-lines

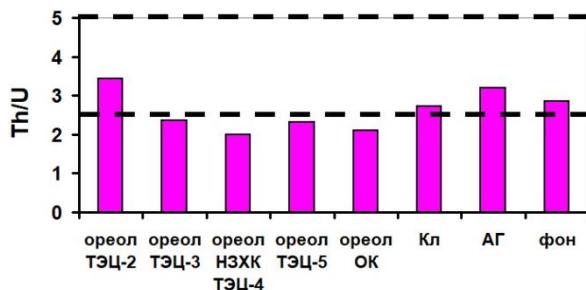


Рис. 8. Среднее значение Th/U отношения в аэрозолях Новосибирска и его окрестностей. Сокращения см. На рис. 4. Прерывистой линией показан диапазон Th/U значений от 2,5 до 5 для природных систем

Fig. 8. Mean Th/U ratio in the aerosol of Novosibirsk city and its vicinity. Acronyms see in Fig. 4. The range of values Th/U (2,5–5) of natural geosystems is shown by cut-lines

В аэрозолях ореола ТЭЦ-2 содержание Th в 2 раза больше, чем в аэрозолях ТЭЦ-3, а содержание U больше всего на 20 %. Известно, что среднее содержание тория в каменных углях Кузнецкого угольного бассейна равно 3,3 г/т, что примерно в 3 раза превышает его среднее содержание в бурых углях Канско-Ачинского бассейна, равное 1 г/т [19]. В каменных углях Кузнецкого угольного бассейна зольность в основном формируется за счет содержащегося в них пеплового вулканического материала с сосредоточенными в них Th, U и редкоземельными элементами [19]. В углях уран еще содержится в рассеянной форме в органической части углей, особенно в бурых углях, подвергшихся гипергенным преобразованиям: при взаимодействии с грунтовыми водами бурые угли могут значительно сорбировать из воды уран и др. элементы [19]. Таким образом, различие в содержании U, Th в аэрозолях ТЭЦ-2 и ТЭЦ-3, весьма схожих по техническим параметрам и с одинаковым геоэкологическим расположением, по-видимому, обусловлено различием в составе их топлива – каменных углей Кузнецкого угольного бассейна на ТЭЦ-2 и бурых углей Канско-Ачинского угольного бассейна на ТЭЦ-3. Можем говорить о том, что исходная радиоактивная составляющая углей предопределяет состав выбросов ТЭЦ-2 и ТЭЦ-3.

В аэрозолях г. Новосибирска выявлена сильная обратная корреляционная зависимость содержания Th от содержания сажи с коэффициентом $-0,74$ (рис. 9) или, наоборот, положительная корреляционная зависимость от зольной части с коэффициентом $0,74$ в отличие от U, коэффициент корреляции которого и сажи составил всего $-0,48$. Сильная связь содержания Th от зольного (минерального) вещества аэрозолей свидетельствует о переносе основной доли Th с минеральными (пепловыми) частицами, а не с частицами сажи. Как правило, минеральные аэрозольные частицы крупнее и плотнее сажистых частиц и они выпадают раньше [10, 17], и вместе с ними выпадает, по-видимому, и основная доля Th – на более близком расстоянии от трубы, чем U. Уран, не проявляющий ясной корреляционной связи, как торий, по-видимому, в аэрозолях присутствует как в составе преимуще-

ственno зольных (пепловых) частиц, так и в дисперсном виде в составе частиц сажи, способных переноситься по воздуху на дальние расстояния.

Возьмем, к примеру, аэрозоли участка Ключи: они по содержанию Th и U похожи на аэрозоли ТЭЦ-2, попадают в его геохимическое поле № 3 на $Th-U$ диаграмме (рис. 6).

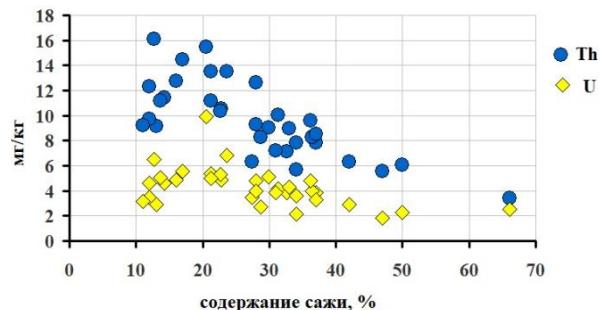


Рис. 9. Обратная корреляционная связь содержания Th (g/m) и сажи (масс. %) в аэрозолях г. Новосибирска

Fig. 9. Negative correlation between the content of Th (ppm) and organic furnace black (mass. %) in aerosol of the vicinity of the Novosibirsk city

Это указывает на схожесть источника аэрозольного загрязнения участка Ключи с ТЭЦ-2. Предполагается, что на участок Ключи влияют также выбросы от сжигания каменного угля в местных котельных, или долетают выбросы из г. Бердска, расположенного в 10 км к юго-западу. Заметим, что среднее содержание Th в аэрозолях участка Ключи чуть меньше, чем в аэрозолях ТЭЦ-2, зато в них чуть больше содержание U. Это как раз можно объяснить большей удаленностью от предположительного источника выбросов в г. Бердске – примерно на 10 км, и, следовательно, более глубоким фракционированием аэрозолей по крупности в процессе переноса аэрозолей, чем это происходит в пределах 3-километрового ореола ТЭЦ-2. При этом выпадает большая доля Th, связанная с крупными пепловыми частицами, по сравнению с U, имеющим двойственную природу. Заметим, что среднесуточная аэрозольная нагрузка на участке Ключи примерно в 3 раза ниже, чем в ореоле ТЭЦ-2, что соответствует разнице расстояний от источников выбросов.

Как видно на рис. 6, 7, среднее Th/U отношение в аэрозолях ТЭЦ-2 равно 3,43 и располагается в диапазоне обычных значений для геосистем. Как и ожидалось, к нему близко среднее отношение Th/U в аэрозолях участка Ключи, оно равно 2,73, что попадает также в диапазон природных значений.

В аэрозолях ТЭЦ-3 среднее отношение Th/U существенно ниже – всего 2,36, что, по-видимому, обусловлено исходно низким содержанием Th и относительно высоким содержанием U в бурых углях Канско-Ачинского бассейна.

А каково Th/U отношение в аэрозолях ТЭЦ-5, где, как и на ТЭЦ-2, до 2018 г. сжигался каменный уголь? Отметим, что среднее содержание Th в аэрозолях ТЭЦ-5 примерно такое же, как в аэрозолях ТЭЦ-2: 10,5 и 10,1 г/т соответственно. При этом Th/U в аэро-

золях ТЭЦ-5 всего 2,31, тогда как в аэрозолях ТЭЦ-2 оно равно 3,43 и располагается в диапазоне природных значений. Именно более высокое содержание U в аэрозолях ТЭЦ-5 привело к уменьшению Th/U отношения. Вопрос «откуда в аэрозолях ТЭЦ-5 так много урана?» пока остается открытым. Выбросы ТЭЦ-2 и ТЭЦ-5, получаемые из одного и того же каменного угля, в аэрозолях формируют близкие содержания тория. Трудно представить, что в процессе золоулавливания на ТЭЦ-5 происходит обогащение выбросов ураном. На сегодня можно только допустить, что высокое содержание U в аэрозолях ореола ТЭЦ-5 появилось за счет выбросов НЗХК. Ввиду близости НЗХК, одинаковых геоэкологических условий размещения на возвышенности Сокур, их выбросы по мере перемещения главным образом на северо-восток, согласно доминирующим направлениям ветра, могут смешиваться и накладываться. Следовательно, картина аэрозольного загрязнения в ореолах НЗХК и ТЭЦ-5 может быть более сложной.

В аэрозолях ТЭЦ-3 среднее отношение Th/U составляет всего 2,36, что, по-видимому, обусловлено исходно низким содержанием Th и относительно высоким содержанием U в бурых углях Канско-Ачинского бассейна. Известно, что As, Sn являются основными индикаторами выбросов ОК [10]. Но среднее отношение Th/U в аэрозолях ОК составляет 2,11, что указывает на то, что U скорее всего также является второстепенным компонентом выбросов ОК.

Наиболее низкие значения Th/U отношения характерны аэрозолям ореола НЗХК (и спутника ТЭЦ-4): в среднем оно равно 2,0 (рис. 8). ТЭЦ-4 похож на ТЭЦ-2 как по техническим параметрам (рис. 2), так и по виду топлива – на обоих предприятиях сжигается каменный уголь, поэтому вклад выбросов ТЭЦ-4 в аэрозолях сформировал бы примерно такое же содержание U, как и в аэрозолях ТЭЦ-2 – около 3 г/т. Следовательно, при среднем содержании урана в 5 г/т, остальные 2 г/т, или 40 %, урана в аэрозолях, по-видимому, являются вкладом выбросов собственно НЗХК. Здесь в аэрозолях содержание Th на 22 % больше, чем в аэрозолях ТЭЦ-2, и на 17 % больше, чем в аэрозолях ТЭЦ-5: 12,7 г/т против 10,07 г/т и 10,52 г/т соответственно. Поскольку производство НЗХК связано с ураном, маловероятно, чтобы источником Th являлись собственно выбросы НЗХК, скорее всего, их основным источником являются выбросы сжигания угля на ТЭЦ-4. По-видимому, низкая труба высотой всего в 60 м способствует более интенсивному и плотному выпадению пепловых частиц с Th в окрестностях предприятия. Для достоверного определения основных источников Th в аэрозолях ореола НЗХК (вместе со спутником ТЭЦ-4) необходимо дальнейшее изучение.

В аэрозолях выявлена умеренная обратная корреляционная зависимость Th/U отношения от содержания U с коэффициентом $-0,65$ (рис. 7). Следовательно, именно вариации содержания U, нежели Th, определяют Th/U отношение в аэрозолях г. Новосибирска. В свою очередь, на основании этого можно говорить о существенно более высокой миграционной способности урана в техногенном аэрозольном переносе по сравнению с торием.

На основе плотности среднесуточного выпадения аэрозолей и среднего содержания радионуклидов в аэрозолях оценена плотность выпадения Th и U на каждом изученном участке г. Новосибирска и его окрестностей (г/га·год) (рис. 10). Оказалось, что наиболее сильное выпадение тория присуще ореолам ТЭЦ с низкими трубами, где основным топливом является каменный уголь: в ореоле ТЭЦ-4 (спутника НЗХК) и ТЭЦ-2 – 3,91 и 3,93 г/га·год соответственно. Данные выпадений в ореоле ТЭЦ-4 (НЗХК), вероятно, получились ниже, чем было бы при схеме отбора, как в ореоле ТЭЦ-2, поскольку вблизи от трубы с подветренной стороны отсутствует возможность отбора пробы. В ореоле ТЭЦ-5, благодаря высокой трубе и эффективному рассеиванию выбросов, и, возможно, лучшему золоулавливанию плотность аэрозольного поступления Th в 1,5 раза ниже, чем на ТЭЦ-2 и ТЭЦ-4, и составляет 2,6 г/га·год. В ореоле ТЭЦ-3 аэрозольное выпадение в целом высокое, потому плотность выпадения Th получилось умеренным – 2,8 г/га·год, несмотря на его малое содержание в аэрозолях, количество выпадающего урана – 1,25 г/га·год – это больше, чем в ореоле ТЭЦ-2 и ТЭЦ-5.

Больше всего выпадает U в ореоле НЗХК (со спутником ТЭЦ-4) – 1,6 г/га·год. В ореолах ТЭЦ-2 и ТЭЦ-5 выпадает примерно одинаковое количество урана: 1,17 и 1,14 г/га·год. Если допустить, что от выбросов ТЭЦ-4 поступает столько же урана, как и на ТЭЦ-2 – 1,15 г/га·год, значит, разницу в 0,45 г/га·год следует принять за «вклад» именно атомного производства.

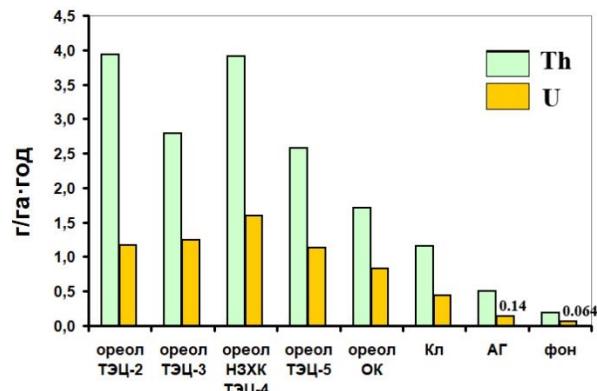


Рис. 10. Аэрозольное поступление Th (1) и U (2) (г/га·год) в г. Новосибирске и его окрестностях. Сокращенные наименования ореолов предприятий и участков см. на рис. 4

Fig. 10. Aerosol pollution by Th (1) and U (2) (gram on the hectare per year) in Novosibirsk city and its vicinity. Acronyms see in Fig. 4

По сравнению с ореолами других промышленных предприятий ореол ОК загрязняется радионуклидами меньше: Th – 1,7 и U – 0,83 г/га·год, что в принципе логично – радионуклиды не являются основными составляющими полиметаллических руд, перерабатываемых на комбинате.

На участке Кп при всей схожести состава аэрозолей с аэрозолями ТЭЦ-2 поступление Th всего –

1,16 г/га·год и U – 0,43 г/га·год вследствие меньшей аэрозольной нагрузки. На участке АГ аэрозольное загрязнение Th и U еще ниже: 0,5 и 0,14 г/га·год соответственно. На фоновом участке наблюдается самое слабое аэрозольное поступление радионуклидов: Th – 0,18, U – 0,06 г/га·год, что в 21 и 25 раз ниже, чем в ореоле НЗХК.

Выводы

1. В пределах основных ореолов выбросов шести крупных промышленных предприятий г. Новосибирска оценена аэрозольная нагрузка: наиболее сильная наблюдается в ореоле выбросов ТЭЦ-3, где средняя плотность среднесуточного выпадения аэрозолей в 2011 г. и 2014–2017 гг. составила 137 мг/м²·сут, в ореолах выбросов остальных источников – от 67 до 107 мг/м²·сут. Вне основных шлейфов промышленных выбросов аэрозольная нагрузка в 2–3 раза меньше: на участке около Академгородка и на участке Ключи средняя плотность среднесуточного выпадения аэрозолей оценивается в 23,9 и 34,3 мг/м²·сут. На фоновом участке аэрозольная нагрузка всего 7,2 мг/м²·сут, что на порядок ниже аэрозольной нагрузки в ореолах крупных промышленных предприятий.

2. Выявлено гетерогенное распределение Th, U в аэрозолях г. Новосибирска. Главными источниками Th, U в аэрозолях являются выбросы ТЭЦ, где сжигается каменный уголь. Выбросы НЗХК являются значительным источником U в аэрозолях.

Больше всего радионуклидов в аэрозолях окрестностей НЗХК (со спутником ТЭЦ-4), где среднее содержание U составило 5,0 г/т, Th – 12,3 г/т. Здесь наблюдается наибольшая плотность выпадения U – 1,6 г/га·год. Примерно 40 % урана в аэрозолях или примерно 0,45 г/га·год, выпадающего на поверхность земли урана, поступает, по самой предварительной оценке, с выбросами собственно производства НЗХК. Остальная часть урана, по-видимому, формируется в основном за счет выбросов сжигания угля на ТЭЦ-4. На остальных изученных участках плотность выпадения U значительно меньше: от 0,14 до 1,25 г/га·год.

Больше всего Th выпадает в ореоле невысоких труб ТЭЦ, где сжигается каменный уголь: в ореолах выбросов ТЭЦ-2 и ТЭЦ-4 (спутника НЗХК) плотность выпадения Th составляет примерно 3,9 г/га·год соответственно. На остальных изученных участках выпадает значительно меньше Th: от 0,5 до 2,8 г/га·год.

В ореоле ОК аэрозольное загрязнение U и Th самое слабое среди ореолов крупных промышленных предприятий города: Th – 1,7 и U – 0,83 г/га·год. Это соответствует его производственной специфике – радионуклиды не являются основными составляющими полиметаллических руд, перерабатываемых на комбинате, и здесь отсутствует сжигание угля в больших объемах, как на ТЭЦ.

Среди рассмотренных участков, подвергающихся техногенному аэрозольному загрязнению, наиболее чистый участок на юго-восточной окрестности города – на участке Аг, где выпадает почти в 10 раз

меньше Th и U по сравнению с аэрозольным загрязнением в ореоле НЗХК, что составляет 0,5 и 0,14 г/га·год соответственно.

В аэрозолях фонового участка содержание Th составило 7,0 г/т, U – 2,43 г/т, что близко к кларку почв и указывает на преимущественно природное происхождение аэрозолей (из частиц почв, грунтов). На фоновом участке воздух наиболее чистый: аэрозольное поступление Th и U в 21 и 25 раз меньше аэрозольного выпадения радионуклидов в ореоле НЗХК и составляет всего 0,18 и 0,064 г/га·год соответственно.

3. На примере ТЭЦ-2 и ТЭЦ-3 с похожими техническими параметрами при одинаковом геоэкологическом расположении выявлено различие в аэрозольном загрязнении при сжигании каменного (на ТЭЦ-2) и бурого (на ТЭЦ-3) углей. При сжигании бурого угля Канско-Ачинского угольного бассейна образуется примерно на 30 % больше выбросов, чем при сжигании каменного угля Кузнецкого угольного бассейна. В силу содержания Th, U в пепловом вулканогенном компоненте каменных углей, в выбросах сжигания каменных углей значительно больше Th, чем в выбросах сжигания бурых углей. В аэрозолях ореола ТЭЦ-2 содержание Th в 2 раза, U на 20 % больше, чем в аэрозолях ореола ТЭЦ-3. С учетом аэрозольной нагрузки в ореоле ТЭЦ-2 выпадает примерно на 40 % больше Th, чем в ореоле ТЭЦ-3, при примерно одинаковой плотности выпадения U. По схожести содержания Th и U в аэрозолях участка Ключи с аэрозолями ореола ТЭЦ-2 сделан вывод об аэрозольном загрязнении участка Ключи выбросами сжигания каменных углей, предположительно, переносящихся по розе ветров со стороны г. Бердска, расположенного в 10 км к юго-востоку от участка.

4. В аэрозолях г. Новосибирска выявлена высокая обратная корреляционная зависимость содержания Th от содержания сажи с коэффициентом корреляции – 0,74, что указывает на связь Th именно с минеральной (зольной) частью аэрозолей. Вместе с тем U в аэрозолях содержится как в минеральной зольной части, так и в сажистых частицах, то есть его формы нахождения в аэрозолях более разнообразны.

5. Аэрозолям г. Новосибирска и его окрестностей характерны низкие значения Th/U отношения, часто близкие к 2,5 – нижней границе природного диапазона значений, что, по-видимому, отражает более высокую миграционную способность урана в техногенных системах промышленных выбросов по сравнению с торием. Умеренная отрицательная корреляционная зависимость Th/U от содержания U с коэффициентом корреляции –0,65 указывает на то, что отношение Th/U в аэрозолях определяется главным образом ураном, нежели более пассивным торием.

Аналитические работы проведены в ЦКП «Сибирский центр синхротронного и терагерцового излучения» ИЯФ СО РАН и ЦКП многоэлементных и изотопных исследований СО РАН. Работа выполнена по государственному заданию ИГМ СО РАН и при поддержке грантов РФФИ № 14-05-00289, № 18-45-140020.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Chak K.Ch., Xiaohong Y. Air pollution in mega cities in China // Atmospheric environment. – 2008. – V. 42. – P. 1–42.
- Monitoring of ultra-trace uranium and thorium in six-grade particles / X. Shao, Y. Xu, Y. Zhang, L. Yin, X. Kong, Y. Ji // Chemosphere. – 2019. – V. 233. – P. 76–80.
- Dmitrienko M.A., Strizhak P.A. Coal–water slurries containing petrochemicals to solve problems of air pollution by coal thermal power stations and boiler plants: an introductory review // Science of the total environment. – 2018. – V. 613. – P. 1117–1129.
- Интернет-сайт Министерства энергетики Российской Федерации. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/532> (дата обращения 02.12.2019).
- Russell M.C., Belle J.H., Liu Y. The impact of three recent coal-fired power plant closings on Pittsburgh air quality: a natural experiment // Journal of the Air & Waste Management Association. – 2017. – V. 67. – № 1. – P. 3–16.
- Bellis D.J., Ma R., McLeod C.W. Characterisation of airborne uranium and thorium contamination in northern England through measurement of U, Th and 235U/238U in tree bark // Journal of Environmental Monitoring. – 2001. – № 3 (2). – P. 198–201.
- Transport of carbon-bearing dusts from Iraq to Japan during Iraq's war / K. Tazaki, R. Wakimoto, Y. Minami et al. // Atmospheric Environment. – 2004. – V. 38. – Iss. 14. – P. 2091–2109.
- Sakuragi Y., Meason J.L., Kuroda P.K. Uranium and plutonium isotopes in the atmosphere // Journal of Geophysical Research: Oceans. – 1983. – V. 88. – Iss. C6. – P. 3718–3724.
- Characterization of total suspended particles around a power station in an urban coastal area in eastern Spain / A. Boix, M.M. Jordan, X. Querol, T. Sanfelix // Environmental geology. – 2001. – V. 40. – P. 891–896.
- Артамонова С.Ю., Попов Н.А. Элементный состав твердых осадков снежного покрова в районе Новосибирского оловокомбината (2005–2016 гг.) // ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ. – 2017. – Т. 4. – № 2. – С. 141–145. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29197824> (дата обращения 12.12.2019).
- Composition of dust deposited to snow cover in the Wasatch Range (Utah, USA): controls on radiative properties of snow cover and comparison to some dust-source sediments / R.L. Reynolds, H.L. Goldstein, B.M. Moskowitz, A.C. Bryant, S.M. Skiles, R.F. Kokaly, C.B. Flagg, K. Yauk, T. Berquo, G. Breit, M. Ketterer, D. Fernandez, M.E. Miller, T.H. Painter // Aeolian research. – 2014. – V. 15. – P. 73–90.
- Characterization of solid airborne particles deposited in snow in the vicinity of urban fossil fuel thermal power plant (Western Siberia) / A.V. Talovskaya, E.G. Yazikov, E.A. Filimonenko, J.-C. Lata, J. Kim, T.S. Shakova // Environmental Technology. – V. 39. – № 18. – P. 2288–2303.
- Особенности формирования ионного состава атмосферных аэрозолей и осадков на юге Западной Сибири / Б.С. Смоляков, Л.А. Павлюк, К.П. Куценогий, П.К. Куценогий, В.И. Макаров, И.Ю. Конченко // Химия в интересах устойчивого развития. – 1997. – Т. 5. – № 2. – С. 193–200.
- Экологические риски от влияния токсичных элементов в атмосферном воздухе на основе изучения снежного покрова в районе расположения Томской ГРЭС-2 / Н.А. Осипова, А.В. Таловская, Е.А. Филимоненко, Е.Г. Язиков, С.А. Новиков // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 4. – С. 54–69. URL: http://archive.tpu.ru/bitstream/11683/47212/1/bulletin_tpu-2018-v329-i4-06.pdf (дата обращения 12.12.2019).
- Язиков Е.Г., Таловская А.В. Радиоэкологическая оценка территории на основе изучения атмосферных пылевых выпадений методом осколочной радиографии // Известия высших научных заведений. Геология и разведка. – 2013. – № 5. – С. 57–61. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20879956> (дата обращения 12.12.2019).
- Артамонова С.Ю. Геохимические особенности аэрозольного загрязнения в районе Сибирского химического комбината // Химия в интересах устойчивого развития. – 2012. – Т. 20. – № 4. – С. 405–418. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17978502> (дата обращения 12.12.2019).
- Артамонова С.Ю. Уран в техногенных аэрозолях промышленных районов Новосибирска // Химия в интересах устойчивого развития. – 2012. – Т. 20. – № 5. – С. 507–513. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18226765> (дата обращения 12.12.2019).
- Интернет сайт Сибирской энергетической компании. URL: <https://sibgenco.ru> (дата обращения 02.12.2019).
- Формы нахождения урана в углях и торфах Северной Азии / С.И. Арбузов, С.С. Ильинок, А.В. Волостнов, С.Г. Маслов, В.С. Архипов // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 319. – № 1. – С. 109–115.
- Интернет сайт Новосибирского завода химконцентратов. URL: <http://www.nccp.ru/> (дата обращения 02.12.2019).
- Интернет сайт ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС». URL: <http://meteo-nsu.ru/pages/46> (дата обращения 02.12.2019).
- Станция РФА-СИ на накопительном кольце ВЭПП-4М / А.А. Легкодымов, К.Э. Купер, Ю.П. Колмогоров, Г.Н. Баранов // Известия Российской академии наук. Серия физическая. – 2019. – Т. 83. – № 2. – С. 158–162.
- Иванов В.В. Экологическая геохимия элементов. Кн. 6. Редкие f-элементы. – М.: Экология, 1997. – 607 с.
- Рихванов Л.П. Радиоактивные элементы в окружающей среде и проблемы радиоэкологии. – Томск: СТТ, 2009. – 430 с.

Поступила 16.06.2020 г.

Информация об авторах

Артамонова С.Ю., доктор геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН.

UDC 504.3.054:620.2-403.8

URANIUM AND THORIUM IN AEROSOL FALLOUT OF NOVOSIBIRSK CITY AND ITS VICINITY (WEST SIBERIA)

Svetlana Yu. Artamonova,
artam@igm.nsc.ru

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

The relevance of the study is caused by the necessity to develop geoecological approaches to evaluation of air quality in the urban territories and to determine the contribution of the emissions of separate industrial sources into the technogenous pollution of urban air.

The aim of the study is to determine the technogenous aerosol load and aerosol-based precipitation of Th and U in the vicinity of five large industrial enterprises of Novosibirsk.

Objects: dust and aerosol particles accumulated in the snow cover in the vicinity of Heat Stations No. 2, 3, 5, Novosibirsk Tin Plant and Novosibirsk Plant of Chemical Concentrates during the winter season. The technogenous component in the aerosol of Novosibirsk and its vicinities was not previously considered in detail in open publications.

Methods: large-volume (up to 400 dm³) sampling of snow cover to isolate the portions of suspensions from melted snow by filtering, so that the amount of solid suspensions would be sufficient for analyses; determination of the density of diurnal aerosol precipitation (diurnal aerosol load) through calculations of the ratio of the mass of solid suspensions from the samples of melted snow to the sampling area and the number of days during which the snow cover exists (since the day when the snow cover was formed till the sampling date); determination of soot content in aerosol by ashing at 550 °C, determination of Th and U content by means of X-ray fluorescence with the synchrotron radiation.

Results. On the basis of the density of diurnal aerosol precipitation within the major aureoles of emissions from industrial enterprises of Novosibirsk, evaluation of the pollution of urban air is carried out. The content of Th and U in aerosol and the density of their precipitation on the Earth's surface with aerosol are determined. The highest uranium content was established in aerosol samples collected within the aureole of emissions from the Novosibirsk Plant of Chemical Concentrates. The features of Th and U arrival with the emissions from heat stations during the combustion of brown and black coal are determined.

Key words:

Industrial emission, aerosol fallout, technogenic aerosol, snow cover, radionuclides, thorium, uranium, Novosibirsk.

The analysis was carried out in the Core Facility Centre «Siberian Center of Synchronous and Terahertz Radiation» INP SB RAS and the Core Facility Centre of multielement and isotopic research of SB RAS. The research was carried out by the state task of IGM SB RAS and supported by the RFBR grants no. 14-05-00289, 18-45-140020.

REFERENCES

1. Chak K.Ch., Xiaohong Y. Air pollution in mega cities in China. *Atmospheric environment*, 2008, vol. 42, pp. 1–42.
2. Shao X., Xu Y., Zhang Y., Yin L., Kong X., Ji Y. Monitoring of ultra-trace uranium and thorium in six-grade particles. *Chemosphere*, 2019, vol. 233, pp. 76–80.
3. Dmitrienko M.A., Strizhak P.A. Coal –water slurries containing petrochemicals to solve problems of air pollution by coal thermal power stations and boiler plants: An introductory review. *Science of the total environment*, 2018, vol. 613, pp. 1117–1129.
4. Internet-sait Ministerstva Energetiki Rossiiyskoy Federatsii [The WEB site of the Ministry of Energy of Russian Federation. Available at: <https://minenergo.gov.ru/node/532> (accessed 2 December 2019).
5. Russell M.C., Belle J.H., Liu Y. The impact of three recent coal-fired power plant closings on Pittsburgh air quality: a natural experiment. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2017, vol. 67, no. 1, pp. 3–16.
6. Bellis D.J., Ma R., McLeod C.W. Characterisation of airborne uranium and thorium contamination in northern England through measurement of U, Th and 235U/238U in tree bark. *Journal of Environmental Monitoring*, 2001, no. 3 (2), pp. 198–201.
7. Tazaki K., Wakimoto R., Minami Y. Transport of carbon –bearing dusts from Iraq to Japan during Iraq's war. *Atmospheric Environment*, 2004, vol. 38, Iss. 14, pp. 2091–2109.
8. Sakuragi Y., Meason J.L., Kuroda P.K. Uranium and plutonium isotopes in the atmosphere. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1983, vol. 88, Iss. C6, pp. 3718–3724.
9. Boix A., Jordan M.M., Querol X., Sanfelix T. Characterization of total suspended particles around a power station in an urban coastal area in eastern Spain. *Environmental geology*, 2001, vol. 40, pp. 891–896.
10. Artamonova S.Yu., Popov N.A. Element composition of fallout, accumulated in snow blanket of Novosibirsk tin plant area] *INTEREXPO GEO-Siberia*, 2017, vol. 4, no. 2, pp. 141–145. In Rus. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29197824> (accessed 12 December 2019).
11. Reynolds R.L., Goldstein H.L., Moskowitz B.M., Bryant A.C., Skiles S.M., Kokaly R.F., Flagg C.B., Yauk K., Berquo T., Breit G., Ketterer M., Fernandez D., Miller M.E., Painter T.H. Composition of dust deposited to snow cover in the Wasatch Range (Utah, USA): Controls on radiative properties of snow cover and comparison to some dust-source sediments. *Aeolian research*, 2014, vol. 15, pp. 73–90.
12. Talovskaya A.V., Yazikov E.G., Filimonenko E.A., Lata J.-C., Kim J., Shakhova T.S. Characterization of solid airborne particles deposited in snow in the vicinity of urban fossil fuel thermal power plant (Western Siberia). *Environmental Technology*, vol. 39, no. 18, pp. 2288–2303.
13. Smolyakov B.S., Pavlyuk L.A., Koutsenogiy K.P., Koutsenogiy P.K., Makarov V.I., Konchenko I.Yu. Special aspects of ion composition of atmospheric aerosols in the South of the West Siberia. *Chemistry for Sustainable Development*, 1997, vol. 5, pp. 193–200. In Rus.
14. Osipova N.A., Talovskaya A.V., Filimonenko E.A., Yazikov E.G., Novikov S.A. Ecological risks caused by toxic elements impact on ambient air determined in the study of the snow cover in Tomsk GRES-2 area. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 4, pp. 54–69. In Rus. Available at: http://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/47212/1/bulletin_tpu-2018-v329-i4-06.pdf (accessed 12 December 2019).
15. Yazikov E.G., Talovskaya A.V. Radioecological estimation of a region on the basis of studying insoluble fraction in the aerosols in

- snow by the method of fission – fragment radiography. *Izvestiya Vysshikh Uchenykh Zavedeniy. Geologiya i Razvedka*, 2013, no. 5, pp. 57–61. In Rus. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20879956> (accessed 12 December 2019).
16. Artamonova S.Yu. Geochemical features of aerosol pollution in the region of the Siberian Chemical Combine. *Chemistry for Sustainable Development*, 2012, vol. 20, pp. 361–374. Available at: <http://sibran.ru/upload/iblock/0e4/0e409405495ef753cf9f84a7944e1a4c.pdf>
 17. Artamonova S.Yu. Uranium in technogenic aerosol of the industrial areas of Novosibirsk. *Chemistry for Sustainable Development*, 2012, vol. 20, pp. 457–463. Available at: <http://sibran.ru/upload/iblock/c1a/c1a7227f31d069042c305f92ff76230a.pdf> (accessed 12 December 2019).
 18. Internet sayt *Sibirskoy energeticheskoy kompanii* [WEB site of the Siberian Generating Company]. Available at: <https://sibgenco.ru> (accessed 2 December 2019).
 19. Arbuzov S.I., Ilenok S.S., Volostnov A.V., Maslov S.G., Arhipov V.S. Modes of occurrence of Uranium and Thorium in coals and peats of Northern Asia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2011, vol. 319, no. 1, pp. 109–115. In Rus.
 20. Internet sayt *Novosibirskogo zavoda khimkonsentratorov* [WEB site of the Novosibirsk Chemical Concentrates Plant]. Available at: <http://www.nccp.ru/> (accessed 2 December 2019).
 21. Internet sayt «*Zapadno-Sibirskoe UGMS*» [WEB site of the Federal State Budgetary Institution «West Siberian Department hydrometeorology and Environmental Monitoring»]. Available at: <http://meteo-nsi.ru/pages/46> (accessed 2 December 2019).
 22. Legkodymov A.A., Kuper K.E., Kolmogorov Yu.P., Baranov G.N. The SRXFA Station on the VEPP-4M Storage Ring. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2019, vol. 83, no. 2, pp. 112–115. In Rus.
 23. Ivanov V.V. *Ekologicheskaya geokhimiya elementov. Kn. 6. Redkiiie f-elementy* [Ecological Geochemistry of elements. B. 6. Rare f-elements]. Moscow, Ekologiya Publ., 1997. 607 p.
 24. Rikhvanov L.P. *Radioaktivnye elementy v okrughayushchey srede i problemy radioekologii* [Radioactive elements in environment and problems of radioecology]. Tomsk, STT Publ., 2009. 430 p.

Received: 16 June 2020.

Information about the authors

Svetlana Yu. Artamonova, Dr. Sc., senior researcher, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS.

УДК 553.2: 549.283 (571.52)

ЗОЛОТО-СУЛЬФИДНО-КВАРЦЕВОЕ РУДОПРОЯВЛЕНИЕ АРЫСКАН (ЗАПАДНАЯ ТУВА): УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ И ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ФЛЮИДОВ

Кужугет Ренат Васильевич¹,
rkuzhuget@mail.ru

Анкушева Наталья Николаевна^{2,3},
ankusheva@mail.ru

Редина Анна Андреевна⁴,
anna-red@outlook.com

Прокопьев Илья Романович^{4,5},
prokorev_ilya@mail.ru

Ондар Эртинге-Даш Васильевич⁶,
ondar21@mail.ru

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, Челябинская обл., г. Миасс, Ильменский заповедник, 1.

³ Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Миассе,
Россия, 456316, г. Миасс, ул. 8 июля, 10.

⁴ Институт геологии и минералогии СО РАН,
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Ак. Коптюга, 3.

⁵ Новосибирский государственный университет,
Россия, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1

⁶ Тувинский государственный университет,
Россия, 667000, г. Кызыл, ул. Ленина, 36.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью определения генезиса и условий образования золоторудных объектов Тузы для повышения эффективности геологического поиска и разведки минерально-сырьевой базы золота региона.

Цель: определение условий образования и геохимических особенностей рудообразующих флюидов рудопроявления золота Арыскан в Западной Туве.

Методы. Флюидные включения проанализированы с помощью термокамеры *Linkam TMS-600* с микроскопом *Olympus BX 51* с целью определения температур, солевого состава, концентрации солей и давления флюида при минералообразовании; газовый состав индивидуальных флюидных включений определен на рamanовском спектрометре *Ramanor U-1000* с детектором *Horiba DU420E-OE-323*, лазер *Millennia Pro* (*Spectra-Physics*); валовый газовый состав флюида определен на газовом хроматографе *Agilent 6890*, содержания анионов в водной вытяжке оценены на ионном хроматографе *ЦВЕТ-3000*, содержания катионов и микроэлементов – методом *ICP MS* (*Elan-6100*); соотношения изотопов серы определены на газовом масс-спектрометре *Finnigan MAT Delta*.

Результаты. В результате проведенных исследований установлено, что березиты рудопроявления сформировались при участии углекислотно-водного-солевого флюида с соленостью 4,9–41,5 мас. % экв. NaCl при температурах не менее 250–340 °C. Золотосодержащие минеральные ассоциации образовались при $P \sim 1,8$ кбар ($\sim 5,4$ км) из флюидов состава $\text{NaCl}-\text{KCl}-\text{H}_2\text{O}$, $\text{NaCl}-\text{Na}_2\text{CO}_3-\text{H}_2\text{O}$ и $\text{NaCl}-\text{H}_2\text{O}$, содержащих CO_2 , с концентрациями 2,9–32,9 мас. % NaCl -экв., на фоне снижения температур в интервале 290–145 °C (золото-сульфидно-кварцевые жилы – 290–145 °C, золото-теплопрудно-сульфидно-кварцевые жилы – 270–160 °C), при вариациях $f\text{O}_2$, $f\text{S}_2$, $f\text{Se}_2$ и $f\text{Te}_2$. Изотопный $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$ (от $-0,5$ до $+1,1\text{‰}$), солевой и микроэлементный состав минералообразующих флюидов свидетельствуют о его магматическом происхождении.

Ключевые слова:

Золото, березиты, месторождения золота, кварц, Тува, флюидные включения, микроэлементы, изотопия серы.

Введение

Республика Тыва является в своем роде уникальной металлогенической провинцией, где выявлены месторождения цветных, редких и благородных металлов. Ресурсный потенциал региона по Au оценивается в 400 т, из

которых 20 т сосредоточено в россыпных месторождениях. Однако золоторудные объекты региона недостаточно изучены (разведаны) в плане геологического-промышленных параметров, минералого-геохимических особенностей и условий образования руд.

Одним из перспективных на коренное Au в регионе является Алдан-Маадырский рудный узел (AMPУ), к которому относятся небольшие рудопроявления Au, открытые в 1950–70-х гг. при геолого-съемочных и поисковых работах. Эти объекты залегают в осадочных породах (Улуг-Саир, Ак-Даг), березитах (Арыскан, Дуушкуннуг, Ак-Даш) и лиственитах (Хаак-Саир).

AMPУ располагается в области развития V–C₁ океанических комплексов и S–O пород коллизионного профиба. Золотое оруденение парагенетически связано с интрузивными породами баянкольского комплекса (D₃) и сопряжено с процессами березитизации и лиственизации рудовмещающих пород [1, 2], а также контро-

лируется оперяющими разломами субширотного профиля Хемчикско-Куртушибинского (Саяно-Тувинского) глубинного разлома, которые осложняют линейные антиклинали и горст антиклинали той же ориентировки.

Геолого-минералогическая характеристика рудопроявления Арыскан

Рассматриваемое рудопроявление приурочено к антиклинальной структуре длиной 6 км, шириной 2–3 км. Структура осложнена субширотными разломами, которые смещаются на 120–150 м разломом СВ профиля (рис. 1). Геолого-минералогическая характеристика рудопроявления Арыскан приведена в работе [2].

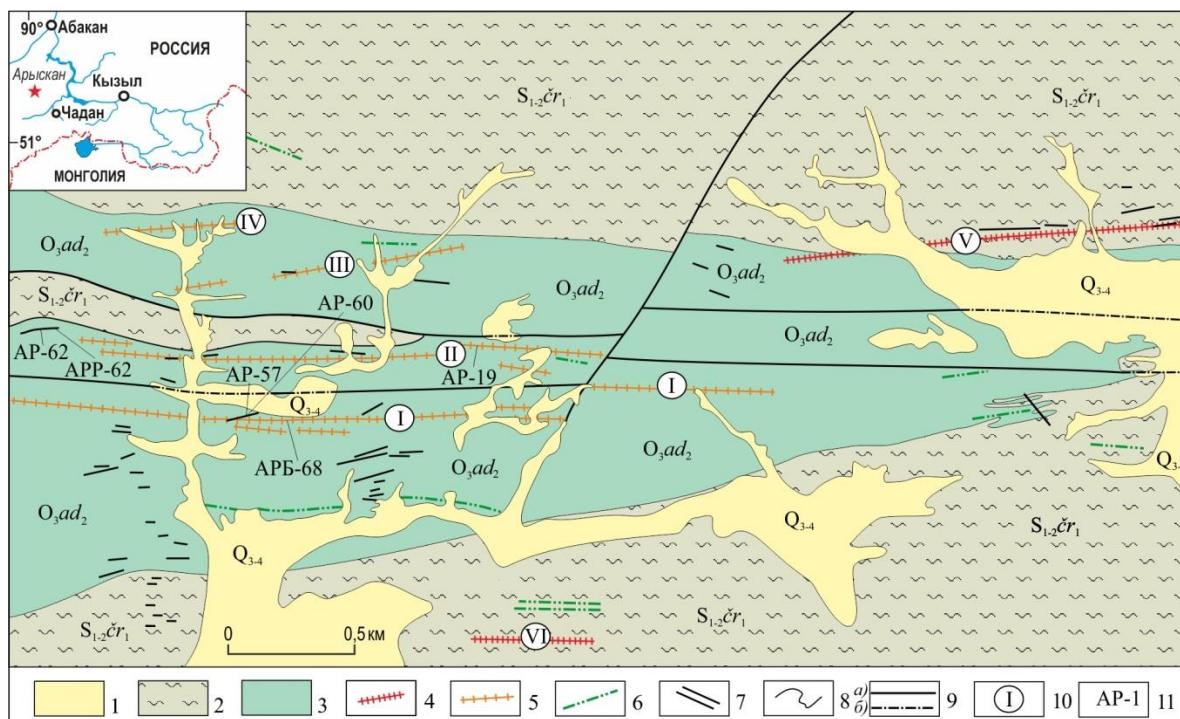


Рис. 1. Схема геологического строения Арысканского рудопроявления (по данным [3, 4] с изменениями авторов): 1 – делювиально-пролювиальные отложения (Q_{3–4}); 2 – серпентито-глинистые сланцы и алевролиты чергакской свиты (S_{1–2}čr₁); 3 – алевролиты и песчаники адьрташской свиты (O₃ad₂); 4 – дайки березитизированных риолитов и гранодиоритов II фазы баянкольского комплекса (D₃bn); 5 – березиты по осадочным породам; 6 – дайки диорит-порфиров III фазы баянкольского комплекса (D₃bn); 7 – жильные зоны и кварцевые жилы; 8 – геологические границы; 9 – достоверные (а) и предполагаемые (б) разрывные нарушения; 10 – номера зон березитов; 11 – места отбора и номера проб

Fig. 1. Scheme of geological structure of Aryskan ore occurrence (according to [3, 4], modified): 1 – deluvial-proluvial sediments (Q_{3–4}); 2 – serpentine-clayey schists and aleurolites of Chergak Suit (S_{1–2}čr₁); 3 – aleurolites and sandstones of Adyrtash Suit (O₃ad₂); 4 – beresitized rhyolite and granodiorite dykes of II phase of Bayancol complex (D₃bn); 5 – beresitized sedimentary rocks; 6 – diorite dykes of III phase of Bayancol complex (D₃bn); 7 – quartz veins and zones; 8 – geological boundaries; 9 – faults reliable (a) and supposed (b); 10 – beresitized zones; 11 – samples

Магматические породы представлены дайками риолит-порфиров, гранодиорит-порфиров II фазы и микродиоритами III фазы баянкольского комплекса (D₃bn) в ордовикских и силурийских отложениях.

Золото локализовано в сульфидно-кварцевых жилах (сульфиды менее 3 %) и прожилках штокверкового типа в осадочных породах и березитах. В процессе геолого-съемочных и поисковых работ выявлено 6 зон березитов субширотного профиля: зоны I–IV развиваются за счет алевролитов и кварцевых

песчаников; зоны V–VI – по дайкам риолитов-порфиров и гранодиоритов-порфиров (рис. 1).

Протяженность березитов по осадочным породам прослеживается на 0,2–4 км (в среднем 1500–1800 м), мощность – 0,2–5 м (в среднем 1–3 м). Форма тел «занозистая», залегание крутые (75–90°). Березиты представляют собой кварц-карбонатные породы с вкрапленностью пирита (до 1 %) и чешуйками серпентита (до 15 %), пронизанные тонкими пирит-кварцевыми прожилками (рис. 2).

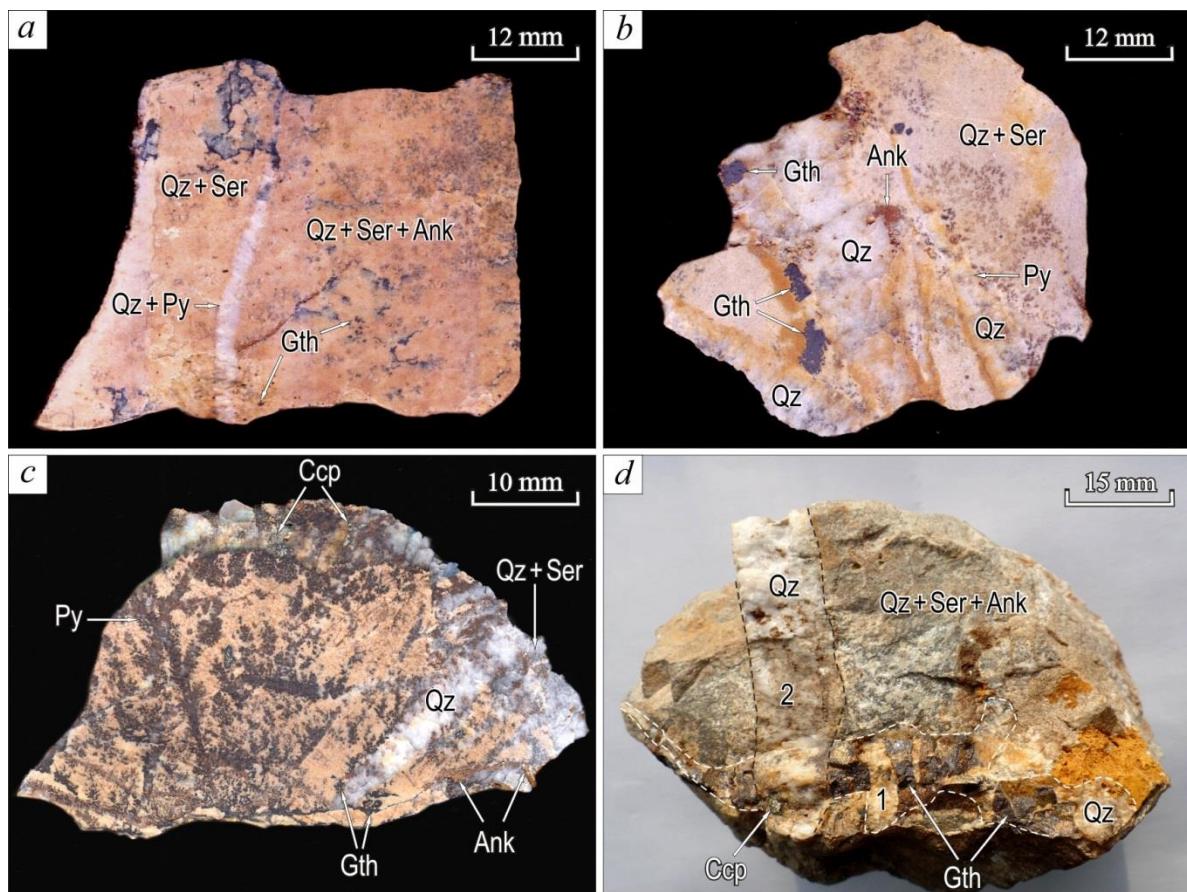


Рис. 2. Типы березитов: а) березит по гранодиорит-порфириу; б, с) березиты по песчанику с пирит-кварцевыми и халькопирит-кварцевыми прожилками; д) золото-сульфидно-кварцевая жила рассечена золото-теллуридно-сульфидно-кварцевым прожилком в березите по песчанику. Qz – кварц, Py – пирит, Ccp – халькопирит, Gth – лимонит по пириту, Ank – анкерит, Ser – серицит

Fig. 2. Types of beresites: a) porphyry granodiorite beresite; b, c) sandstone beresites with pyrite-quartz and chalcopyrite-quartz veins; d) Au-sulfide-quartz vein is fractured by Au-telluride-quartz vein in sandstone beresite. Qz – quartz, Py – pyrite, Ccp – chalcopyrite, Gth – limonite, Ank – ankerite and Ser – sericite

Простирание даек березитизированных риолитов и гранодиоритов субширотное, падение вертикальное, их контакты с вмещающими породами секущие. По данным [3–5], протяженность березитов прослеживается от 0,5 до 2 км, мощность колеблется от 0,2 до 1,5 м. Березиты сложены альбитом (до 60 %), серицитом (до 15 %), кварцем (20–25 %), карбонатом (кальцитом и анкеритом) (до 10 %) и пиритом в виде хорошо ограненных кубических кристаллов (до 5 %).

Минерализация золота в кварцевых жилах и метасоматитах носит прожилковый, прожилково-вкрашенный и рассеянно-вкрашенный характер. По данным [3, 5], содержание Au в зонах I–IV колеблется от следов до 31,6 г/т, составляя, в среднем, от 1,4 г/т, в зонах V–VI – от следов до 0,6 до 1 г/т.

По данным предшественников [4] и собственным наблюдениям [2], на рудопроявлении выделяются следующие стадии: березитовая (1) и пирит-кварцевая (2); золото-сульфидно-кварцевая (3) и золото-теллуридно-сульфидно-кварцевая (4) и карбонатно-кварцевая (5) и хлорит-гематит-кварцевая (6) (рис. 2, 2, 3).

Ранняя минерализация проявлена в образовании березитов и сопряженных с ними безрудных пирит-кварцевых жил (длиной до 4,5 м, мощностью 0,7 м) с

шеелитом, которые рассекают вмещающие осадочные породы и березиты.

Золото-сульфидно-кварцевые жилы наложены на минеральные агрегаты березитов. Они сложены белым и молочно-серым сливным мелкозернистым кварцем, имеют близкое к вертикальному залегание, мощность от десятков сантиметров до 1 м и протяженность от 15 до 50 м. В свою очередь, эти жилы отчетливо рассечены более поздними молочно-белыми золото-теллуридно-сульфидно-кварцевыми жилами.

Золото в золото-сульфидно-кварцевых жилах образует мелкие включения (до 1 мм) в кварце, халькопирите и галените (рис. 4) и по химическому составу имеет следующий состав (мас. %): Au 80,72–93,75, Ag 6,33–18,89, Cu 0,01–0,40, Hg 0,00–0,24, Te 0,00–0,05. По морфологии преобладают трещинно-прожилковые, комковидно-ветвистые и ксеноморфные зерна.

Поздние золото-теллуридно-сульфидно-кварцевые жилы рассекают ранние золото-сульфидно-кварцевые жилы в березитизированных песчаниках и алевролитах. Золото в них ассоциирует с сульфидами, блеклыми рудами (Zn-теннантит-тетраэдрит), теллуридами (петцит, гессит, теллуровисмутит, цумоит, алтait,

самородный теллур) и селенидами (фишессерит, клаусталит) (рис. 5), представлено зернами различной морфологии размером до 100 мкм. Золото имеет следующий состав (мас. %): Au 86,01–91,56, Ag 7,47–13,779, Cu 0,00–0,25 мас. %. В золоте и кварце отмечаются включения (до 5 мкм) Se-содержащего алтата, теллуромисмутита (до 12 мкм) и букхорнита (5–10 мкм) (табл. 1). Выявленные теллуриды и селениды

образуют мелкие (5–20 мкм) включения в кварце, халькопирите и гетите. Химический состав букхорнита показан в табл. 2.

По составу рудных минералов рудопроявление Арыскан отвечает золото-пирит-халькопиритовому типу с теллуридами (петцит, гессит, теллуромисмутит, цумоит, алтант), селенидами (фишессерит, клаусталит) и букхорнитом (сульфотеллурид Au и Pb).

| Минералы Minerals | Этапы / Stages | | | | | |
|-------------------------------------|--|-----|-----|-----|-----|-----|
| | Гидротермальный золото-сульфидно-кварцевый Hydrothermal gold-sulfide-quartz | | | | | |
| | Стадии / Substages | | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Кварц / Quartz | ◆◆◆ | ◆◆◆ | ◆◆◆ | ◆◆◆ | ◆◆◆ | ◆◆◆ |
| Серицит / Sericite | ◆◆◆ | | — | | | |
| Альбит / Albite | — | | | | | |
| Пирит / Pyrite | ◆◆◆ | ◆◆◆ | ◆◆◆ | ◆◆◆ | | |
| Сидерит / Siderite | ◆◆◆ | | | | | |
| Анкерит / Ankerite | ◆◆◆ | | | | — | |
| Шеелит / Scheelite | | — | | | | |
| Гематит / Hematite | | — | | | — | |
| Хлорит / Chlorite | | — | | | — | |
| Халькопирит / Chalcopyrite | | | ◆◆◆ | ◆◆◆ | | |
| Галенит / Galena | | | — | — | | |
| Борнит / Bornite | | | | — | | |
| Золото / Native gold | | | | — | | |
| Петцит / Petzite | | | | — | | |
| Гессит / Hessite | | | | — | | |
| Алтант / Altaite | | | | — | | |
| Se-алтант / Se-altaite | | | | — | | |
| Букхорнит / Buckhornite | | | | — | | |
| Теллуромисмутит / Tellurobismuthite | | | | — | | |
| Цумоит / Tsumoite | | | | — | | |
| Блёклые руды / Fahlores | | | | — | | |
| Сфалерит / Sphalerite | | | | — | | |
| Клаусталит / Clausthalite | | | | — | | |
| Фишессерит / Fischesserite | | | | — | | |
| Самородный теллур / Tellurium | | | | — | | |
| Барит / Baryte | | | | — | | |
| Кальцит / Calcite | | | | | ◆◆◆ | |
| Fe-доломит / Fe-dolomite | | | | | | — |
| Гипергенные / Supergene | | | | | | ◆◆◆ |
| Акантий / Acanthite | | | | | | — |
| Ковеллин / Covellite | | | | | | — |
| Халькоцин / Chalcocite | | | | | | — |
| Малахит / Malachite | | | | | | — |
| Азурит / Azurite | | | | | | — |
| Скородит / Scorodite | | | | | | — |
| Церуссит / Cerussite | | | | | | — |
| Глёт / Litharge | | | | | | — |
| Гётит / Goethite | | | | | | ◆◆◆ |
| Чеховичит / Chekhovichite | | | | | | — |
| Ютенбогаардтий / Uytenbogaardtite | | | | | | — |
| Серебро / Silver | | | | | | — |

Рис. 3. Последовательность минералообразования рудопроявления Арыскан

Fig. 3. Mineral formation sequence of Aryskan ore occurrence

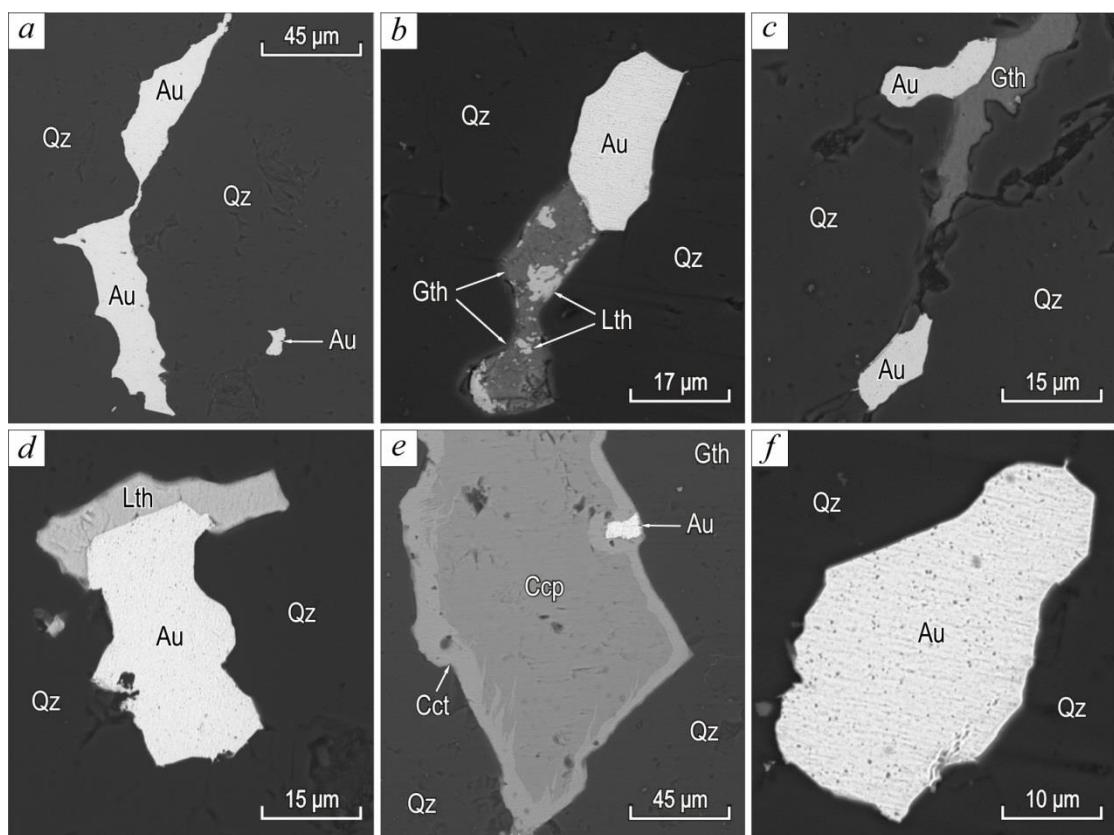


Рис. 4. Золото в золото-сульфидно-кварцевых жилах с халькопиритом (Ccp), халькоzinом (Cct), гётитом (Gth) и гётитом (Lth). Изображение в обратно-рассеянных электронах

Fig. 4. Gold in Au-sulfide-quartz veins with chalcopyrite (Ccp), chalcocite (Cct), goethite (Gth) and litharge (Lth). BSE image

Таблица 1. Химический состав теллуридов и селенидов (мас. %)

Table 1. Chemical composition of tellurides and selenides (wt. %)

| Анализ Analysis | Ag | Au | Pb | Bi | S | Te | Se | Сумма Total | Формула Formula |
|-----------------------------------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|----------------|--|
| Петцит/Petzite | | | | | | | | | |
| 1 | 40,99 | 25,59 | — | — | — | 32,54 | — | 99,12 | $\text{Ag}_{2,98}\text{Au}_{1,02}\text{Te}_{2,00}$ |
| 2 | 41,86 | 25,53 | — | — | — | 32,31 | — | 99,70 | $\text{Ag}_{3,02}\text{Au}_{1,01}\text{Te}_{1,97}$ |
| 3 | 41,38 | 25,72 | — | — | — | 32,76 | — | 99,86 | $\text{Ag}_{2,99}\text{Au}_{1,01}\text{Te}_{2,00}$ |
| 4 | 41,72 | 25,62 | — | — | — | 32,89 | — | 100,23 | $\text{Ag}_{3,00}\text{Au}_{1,01}\text{Te}_{1,99}$ |
| 5 | 41,21 | 25,26 | — | — | — | 32,69 | — | 99,16 | $\text{Ag}_{2,99}\text{Au}_{1,00}\text{Te}_{2,01}$ |
| Гессит/Hessite | | | | | | | | | |
| 6 | 63,21 | — | — | — | — | 36,67 | — | 99,88 | $\text{Ag}_{2,01}\text{Te}_{0,99}$ |
| 7 | 62,22 | — | — | — | — | 36,98 | — | 99,20 | $\text{Ag}_{2,00}\text{Te}_{1,00}$ |
| Алтait/Altaite | | | | | | | | | |
| 8 | 1,93 | — | 58,34 | — | — | 39,14 | — | 99,41 | $(\text{Pb}_{0,93}\text{Ag}_{0,06})_{0,99}\text{Te}_{1,01}$ |
| 9 | — | — | 62,28 | — | — | 36,30 | 1,11 | 99,69 | $\text{Pb}_{1,00}(\text{Te}_{0,95}\text{Se}_{0,05})_{1,00}$ |
| Теллуромисмутит/Tellurobismuthite | | | | | | | | | |
| 10 | — | — | — | 51,14 | — | 48,11 | — | 99,25 | $\text{Bi}_{1,97}\text{Te}_{3,03}$ |
| 11 | — | — | — | 52,03 | — | 47,11 | — | 99,14 | $\text{Bi}_{2,01}\text{Te}_{2,99}$ |
| 12 | — | — | — | 52,07 | — | 47,53 | — | 99,60 | $\text{Bi}_{2,00}\text{Te}_{3,00}$ |
| Цумоит/Tsumoite | | | | | | | | | |
| 13 | — | — | — | 61,53 | — | 38,32 | — | 99,85 | $\text{Bi}_{0,99}\text{Te}_{1,01}$ |
| 14 | — | — | — | 63,17 | — | 36,13 | — | 99,30 | $\text{Bi}_{1,03}\text{Te}_{0,97}$ |
| Клаусталит/Clausthalite | | | | | | | | | |
| 15 | — | — | 73,81 | — | 1,53 | — | 23,78 | 99,12 | $\text{Pb}_{1,01}(\text{Se}_{0,86}\text{S}_{0,13})_{0,99}$ |
| Фишессерит/Fischesserite | | | | | | | | | |
| 16 | 50,14 | 30,28 | — | — | 3,34 | — | 15,83 | 99,59 | $\text{Ag}_{3,02}\text{Au}_{1,00}(\text{Se}_{1,30}\text{S}_{0,68})_{1,98}$ |
| 17 | 47,56 | 28,94 | — | — | — | — | 22,92 | 99,42 | $\text{Ag}_{3,01}\text{Au}_{1,01}\text{Se}_{1,98}$ |

Примечание. Здесь и далее составы минералов определялись на SEM MIRA LM (ИГМ СО РАН, г. Новосибирск). Формула гессита рассчитана на 3 ат., алтaitа и клаусталита – на 2 ат., петцита и фишессерита – на 5 ат. в формуле.

Note. Hereinafter the mineral composition is performed by means of MIRA LM electron microscope (IGM SB RAS, Novosibirsk). A dash – not found. The formula of hessite is calculated for 3 atoms; altaite and clausthalite – for 2 atoms, and petzite and fischesserite – for 5 atoms.

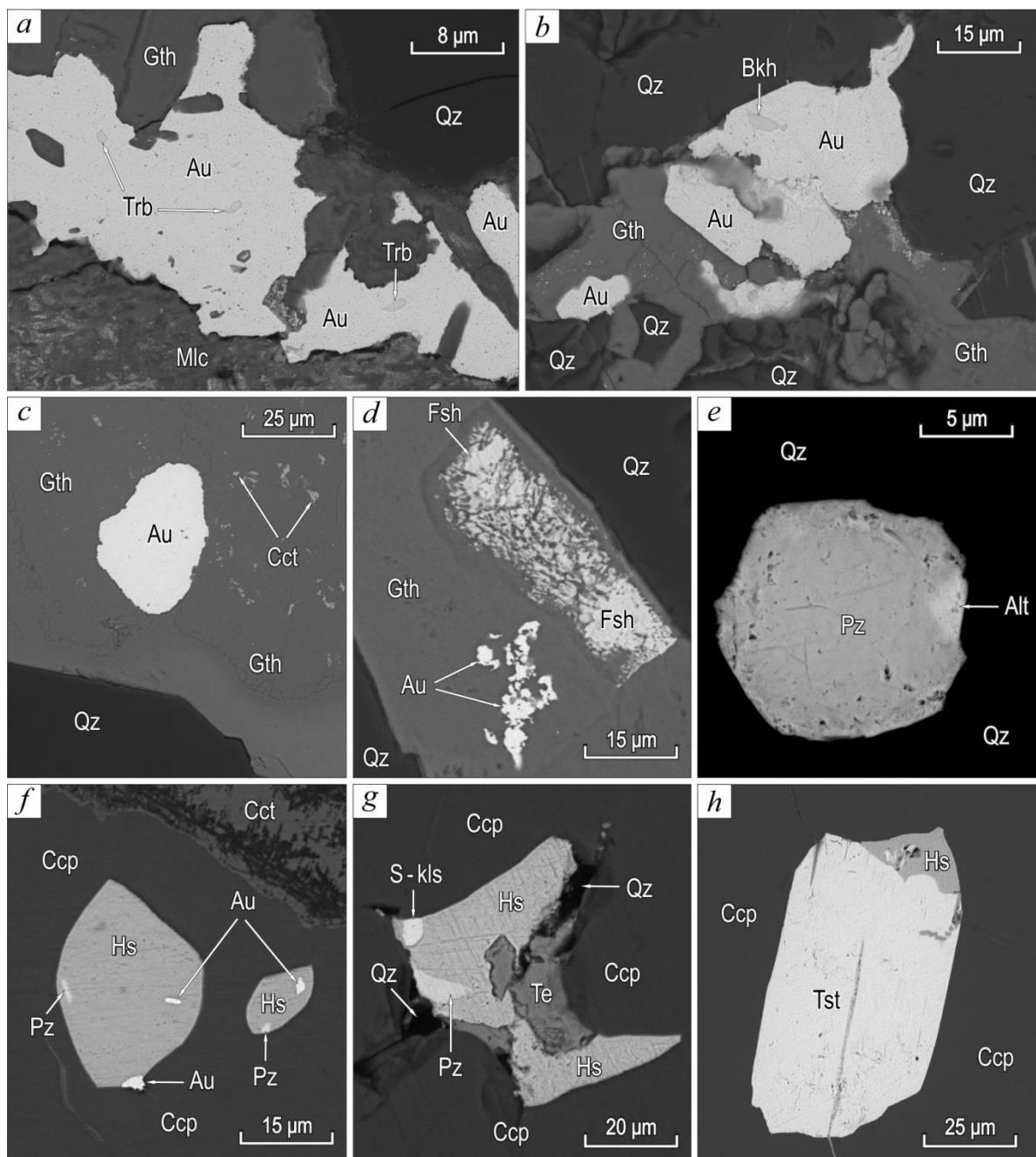


Рис. 5. Золото золото-теллуридно-сульфидно-кварцевых жил в кварце (Qz), халькопирите (Ccp), гётите (Gth) с теллуробисмутитом (Trb), малахитом (Mlc), бухорнитом (Bkh), халькозином (Cct), фишессеритом (Fsh), петцитом (Pz), алтаитом (Alt), гесситом (Hs), серосодержащим клаусталитом ($S-Kls$), самородным теллуром (Te) и цумоитом (Tst). Изображение в обратно-рассеянных электронах

Fig. 5. Gold in Au-telluride-sulfide-quartz veins in quartz (Qz), chalcopyrite (Ccp), goethite (Gth) with tellurobismuthite (Trb), malachite (Mlc), bukhornite (Bkh), chalcocite (Cct), fischesserite (Fsh), petzite (Pz), altaite (Alt), hessite (Hs), S -clausthalite ($S-Kls$), native tellurium (Te) and tsumoite (Tst). BSE image

Таблица 2. Химический состав бухорнита (бакхорнита) (мас. %)

Table 2. Chemical composition of bukhornite (wt. %)

| Анализ Analysis | Pb | Bi | S | Au | Te | Сумма Total | Формула Formula |
|--------------------|-------|-------|------|-------|-------|----------------|--|
| 1 | 33,53 | 17,14 | 8,93 | 17,17 | 22,85 | 99,62 | $(Pb_{1,85}Bi_{0,94}S_{3,18})_{5,97}(Au_{0,99}Te_{2,04})_{3,04}$ |
| 2 | 38,01 | 14,27 | 8,25 | 17,85 | 21,27 | 99,65 | $(Pb_{2,16}Bi_{0,80}S_{3,02})_{5,98}(Au_{1,06}Te_{1,96})_{3,02}$ |
| 3 | 38,33 | 14,61 | 7,79 | 17,37 | 21,29 | 99,39 | $(Pb_{2,21}Bi_{0,84}S_{2,91})_{5,96}(Au_{1,05}Te_{1,99})_{3,04}$ |
| 4 | 36,45 | 15,60 | 8,36 | 16,30 | 22,96 | 99,67 | $(Pb_{2,05}Bi_{0,87}S_{3,03})_{5,95}(Au_{0,96}Te_{2,09})_{3,05}$ |

Примечание. Формула минерала рассчитана на 9 ат.

Note. The mineral formula is calculated for 9 atoms.

В коре выветривания развиты гипергенные минералы Cu, Fe, Pb, As, Bi (чеховичит $\text{Bi}_2\text{Te}_4\text{O}_{11}$, бисмутит $\text{Bi}_2\text{O}_2(\text{CO}_3)$), гипергенное серебро Ag, акантит Ag_2S и ютенбогаардит Ag_3AuS_2 . Гипергенные минералы Ag и Au в виде зерен (до 35 мкм) сложной формы выявлены только в окисленных рудах среди гидроксидов Fe, что предполагает их гипергенное происхождение. Состав (мас. %) ютенбогаардита: Au 33,25–33,46; Ag 54,06–55,18; S 11,31–11,34; акантита: Ag 86,96; S 12,94.

Условия образования березитов и рудных жил

Термобарогеохимические исследования флюидных включений проведены в ЦКП «Многоэлементные и изотопные исследования» СО РАН (г. Новосибирск) и лаборатории термобарогеохимии Южно-Уральского госуниверситета (г. Миасс) согласно опубликованным методикам [6, 7]. Давление захвата флюидных включений рассчитано посредством программы FLINCOR с использованием температур гомогенизации CO_2 . Обработка результатов выполнена в программе Statistica 12.

В кварце березитов (обр. АРБ-68) проанализированы, согласно классификации Э. Рёддера [8], псевдовторичные и вторичные флюидные включения. По фазовому составу выделяются трехфазные (VLS) включения, содержащие твердую, жидкую и газовую фазы, и двухфазные газово-жидкие (VL) включения. Псевдовторичные VLS включения имеют удлиненную форму с неровными краями и размеры до 15 мкм. Твердая минеральная фаза включений светлоокрашенная, изотропная, кубического габитуса, предположительно, представлена NaCl . Газовая фаза, согласно данным рамановской спектроскопии, представлена углекислотой. Температуры гомогенизации трехфазных включений варьируют от 320 до 340 °C. Концентрации солей в псевдовторичных VLS включениях отмечаются от 39,8 до 41,5 мас. % NaCl -экв.

Псевдовторичные VL включения имеют изометрическую форму и размеры 6–10 мкм, в отдельных случаях наблюдаются элементы кристаллографических граней. В составе газовой фазы обнаружены следы CO_2 . Соленость включений, установленная по температурам плавления льда ($T_{\text{пл}}$) –3,8...–3 °C, составляет 4,9–6,1 мас. % NaCl -экв. Температуры гомогенизации (в жидкость) составили 250–320 °C.

Вторичные VL включения образуют «сетку» по всему исследуемому образцу. Они имеют округлую форму и размеры до 6 мкм. Для них получены температуры гомогенизации (в жидкость) 110–180 °C (табл. 3, рис. 6).

В кварце золотоносных жил в березитах изучались первичные и псевдовторичные включения. По фазовому составу среди них выделены следующие генерации: 1) VLS, содержащие газовую, жидкую и твердую фазы; 2) VLC, в которых различаются жидккая углекислота, водно-солевой раствор и газовая фаза; 3) VL – с жидкой и газовой фазами (рис. 7).

В кварце (обр. АР-19) золото-сульфидно-кварцевых жил наблюдаются первичные VLC и псевдовторичные VLS и VL флюидные включения. Первичные VLC включения имеют удлиненную или

округлую форму и размеры от 5 до 10 мкм. Температуры гомогенизации CO_2 в газ составили 28–28,3 °C, а температуры полной гомогенизации в жидкость – 270–280 °C. Эти данные позволили оценить давление захвата около 1800 бар и рассчитать плотность $\text{CO}_2 \approx 0,29 \text{ г/см}^3$. Трехфазные включения с твердой минеральной фазой (VLS) содержат светлую, изотропную минеральную фазу кубической морфологии, которая, предположительно, представлена NaCl . В газовой фазе содержится углекислота. Концентрации солей в этих включениях составили 31,9–32,9 мас. % NaCl -экв., температуры их гомогенизации 200–220 °C. Доля газовой фазы в двухфазных VL включениях около 25 об. % и представлена углекислотой. Температуры гомогенизации (в жидкость) образуют интервал 145–210 °C.

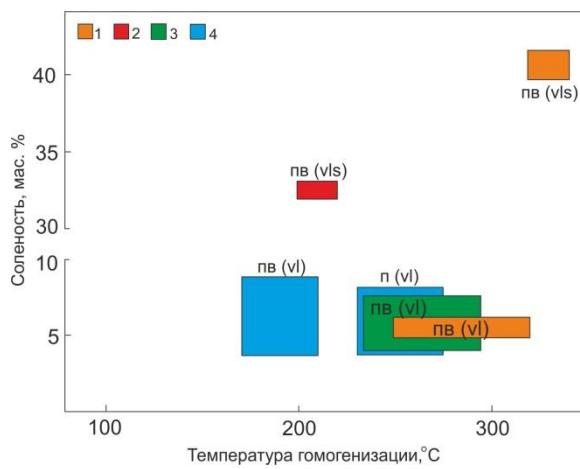


Рис. 6. Температуры гомогенизации и соленость флюидных включений в кварце рудопроявления Арыскан: 1 – березиты; 2–3 – ранние золото-сульфидно-кварцевые жилы; 4 – поздние золототеллуридо-сульфидно-кварцевые жилы. Буквами обозначены генерация и фазовый состав включений (прим. к табл. 3)

Fig. 6. Homogenization temperatures vs salinity of fluid inclusions in quartz from Aryskan ore occurrence: 1 – berezites; 2–3 – early gold-sulfide-quartz veins; 4 – late gold-telluride-quartz veins. The letters indicate the association and phase composition of inclusions (note to table 3)

Псевдовторичные VLS включения в кварце (обр. АР-62, APP-62) золото-сульфидно-кварцевой жилы характеризуются изометрической формой и размерами 5–15 мкм. Газовая фаза представлена углекислотой. Трехфазные (VLS) включения содержат светлоокрашенную, изотропную минеральную фазу, диагностированную как NaCl . Температуры гомогенизации этих включений не были получены вследствие их декрепитации при температурах 260–280 °C.

Псевдовторичные VL включения имеют размеры до 5–10 мкм, кристаллографические очертания и размеры газовых вакуолей до 20–30 % объема включения. Температуры эвтектики образуют диапазон значений от –23,1 до –23,9 °C, отвечающий $\text{NaCl}-\text{KCl}-\text{H}_2\text{O}$ составу флюида. $T_{\text{пл}}$ отмечаются от –2,5 до –4,7 °C, а соленость в соответствии с ними – от 4 до

7,5 мас. % NaCl-экв. Часть этих включений гомогенизируется в газ при температурах от 230 до 290 °С, а часть, одновременно с ними, в жидкость – в интервале температур от 245 до 280 °С. Это является призна-

ком гетерогенизации флюида, что позволяет считать данный интервал (230–290 °С) истинными температурами минералообразования, а также может быть причиной отложения золота в жилах [8, 9].

Таблица 3. Результаты изучения флюидных включений в кварце рудопроявления Арыскан

Table 3. Summarized fluid inclusion data of Aryskan ore occurrence

| Образец Sample | Генерация ФВ (HA) | Фазовый состав (phases) | $T_{\text{гом}}$, °C T_{hom} , °C | $T_{\text{гом}} \text{CO}_2$, °C $T_{\text{hom}} \text{CO}_2$, °C | $T_{\text{эвт}}$, °C T_{eut} , °C | $T_{\text{пл. льда}}$, °C $T_{\text{ice melt}}$, °C | Соленость (мас. % NaCl-экв.) C, wt. %, NaCl equiv | D, г/см ³ D, g/cm ³ | P, бар P, bar | Солевой состав Salt composition |
|--|----------------------|----------------------------|--|---|--|--|---|--|---------------------|---|
| Березиты/Berezites | | | | | | | | | | |
| AP-68 | ПВ | VLS | 320–340 | – | – | – | 39,8–41,5 | – | – | Хлориды/chloride+CO ₂ (газ/gas) |
| | ПВ | VL | 250–320 | – | – | –3,8...–3 | 4,9–6,1 | – | – | + CO ₂ (газ/gas) |
| | В | VL | 110–180 | – | – | – | – | – | – | – |
| Золото-сульфидно-кварцевые жилы/Gold-sulfide-quartz veins | | | | | | | | | | |
| AP-19 | П | VLC | 270–280 | 28–28,3 | – | – | – | 0,29 | 1800 | +CO ₂ (газ/gas+liquid) |
| | ПВ | VLS | 200–220 | – | – | – | 31,9–32,9 | – | – | Хлориды/chloride+CO ₂ (газ/gas) |
| | ПВ | VL | 145–210 | – | – | – | – | – | – | +CO ₂ (газ/gas) |
| AP-62, APP-62 | ПВ | VLS | 260–280* | – | – | – | – | – | – | +CO ₂ (газ/gas) |
| | ПВ | VL | 230–290 (в газ.) 245–280 (в жидкость) | – | –23,1...–23,9 | –2,5...–4,8 | 4,1–7,5 | – | – | NaCl-KCl-H ₂ O+CO ₂ (газ/gas) |
| Золото-теллуридно-сульфидно-кварцевые жилы/Gold-telluride-sulfide-quartz veins | | | | | | | | | | |
| AP-57, AP-60 | П | VL | 200–270 | – | –22,8...–23,9 | –2,3...–5 | 4–8,5 | – | – | NaCl-KCl-H ₂ O, NaCl-Na ₂ HCO ₃ -H ₂ O+CO ₂ (газ/gas) |
| | ПВ | VL | 160–200 | – | –21 | –1,7...–5,0 | 2,9–7,8 | – | – | NaCl-H ₂ O |

*Примечание. Включения: П – первичные, ПВ – псевдовторичные, В – вторичные; VLS – трехфазные газово-жидкие с твердой фазой; VLC – трехфазные газово-жидкие с углекислотой; VL – двухфазные газово-жидкие. $T_{\text{гом}}$ – температура гомогенизации, $T_{\text{гом}} \text{CO}_2$ – Т гомогенизации CO₂, $T_{\text{эвт}}$ – температура эвтектики, $T_{\text{пл}}$ – температура плавления последнего кристалла льда, d – плотность CO₂. Прочерк – не определено. * – температуры декрепитации.*

Note. П – primary inclusions, ПВ – pseudosecondary inclusions, В – secondary inclusions. $T_{\text{гом}}$ – homogenization temperatures, $T_{\text{гом}} \text{CO}_2$ – CO₂ homogenization temperatures, T_{eut} – eutectic temperatures; $T_{\text{ice melt}}$ – final melting temperatures, d – CO₂ density. A dash – not determined.

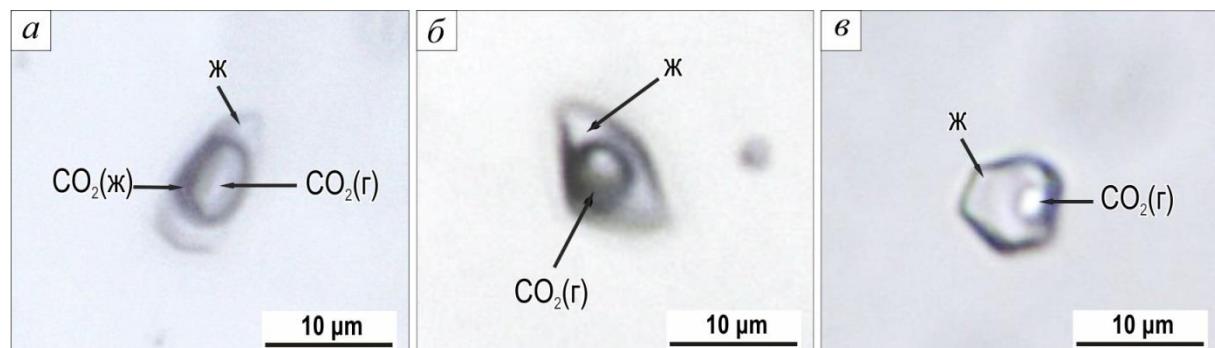


Рис. 7. Флюидные включения в кварце рудопроявления Арыскан: а, б) первичные: а) VLC (AP-19); б) VL (AP-57); в) псевдовторичное VL (AP-19)

Fig. 7. Fluid inclusions in quartz from Aryskan ore occurrence: a, б) primary: а) VLC (AP-19), б) VL (AP-57); в) pseudo-secondary VL (AP-19)

В кварце золото-теллуридно-сульфидно-кварцевых жил (обр. AP-57, AP-60) выделены две генерации двухфазных (VL) флюидных включений: первичные включения имеют изометрическую или удлиненную форму и размеры 10–12 мкм. Газовая фаза занимает около 10 об. % включения и представлена CO₂. Происходит эвтектика в интервале от –22,8 до –23,9 °С, что отвечает NaCl-KCl-H₂O флюиду. $T_{\text{пл}} – 5,5...–5$ °С соответствуют концентрациям солей 7,8–8,5 мас. % NaCl-экв.

Температуры гомогенизации (в жидкость) составили 230–270 °С.

Псевдовторичные VL включения имеют изометрическую форму и размеры до 5 мкм. Доля газовой фазы достигает 20 об. %. Концентрации солей составили 3,3–4,9 мас. % NaCl-экв. согласно $T_{\text{пл}} – 3...–2$ °С. Температуры гомогенизации (в жидкость) составили 160–200 °С. Из-за малого размера включений температура эвтектики была определена только в единичных случаях (–21 °С), что отвечает NaCl-H₂O флюиду.

Таблица 4. Валовый состав растворов флюидных включений в кварце Арысканского рудопроявления

Table 4. Bulk fluid inclusion composition in quartz from Aryskan ore occurrence

| Компоненты Components | Кварц/Quartz | | Среднее Average |
|---|--|---|--------------------|
| | Золото-сульфидно-кварцевые жилы Au-sulfide-quartz veins | Золото-теллуридно-сульфидно-кварцевые жилы Au-telluride-sulfide-quartz veins | |
| <i>Макрокомпоненты, г/кг воды Bulk components, g/kg H₂O</i> | | | |
| CO ₂ | 85,58 | 23,98 | 54,78 |
| CH ₄ | 0,196 | 0,196 | 0,20 |
| HCO ₃ ⁻ | 35,74 | 37,59 | 36,67 |
| Cl ⁻ | 4,51 | 4,27 | 4,39 |
| Na | 12,91 | 13,82 | 13,36 |
| Ca | 1,96 | 1,74 | 1,85 |
| K | 1,32 | 0,53 | 0,92 |
| Mg | 0,255 | 0,446 | 0,35 |
| Na/K | 9,78 | 26,07 | 14,52 |
| <i>Микрокомпоненты, 10⁻³ г/кг воды Trace elements, 10⁻³ g/kg H₂O</i> | | | |
| B | 696,31 | 206,14 | 451,22 |
| Sr | 82,27 | 62,94 | 72,60 |
| Ba | 153,19 | 350,46 | 251,82 |
| Cu | 780,13 | 47,45 | 413,79 |
| Zn | 58,48 | 11,76 | 35,12 |
| As | 208,87 | 101,02 | 154,95 |
| Sb | 27,87 | 0,00 | 13,94 |
| Mn | 42,68 | 35,07 | 38,88 |
| Fe | 9,17 | 18,61 | 13,89 |
| Mo | 10,89 | 2,89 | 6,89 |
| Li | 3,72 | 3,48 | 3,60 |
| Rb | 2,17 | 0,79 | 1,48 |
| Pb | 1,18 | 0,19 | 0,68 |
| Cs | 0,61 | 0,43 | 0,52 |
| Ge | 0,07 | 0,15 | 0,11 |
| Cd | 0,66 | 0,21 | 0,44 |
| Au | 0,17 | 0,11 | 0,14 |
| Ag | 0,21 | 3,12 | 1,67 |
| Bi | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| W | 9,07 | 0,00 | 4,54 |
| Sn | 0,00 | 0,68 | 0,34 |
| Hg | 0,58 | 0,00 | 0,29 |
| Tl | 0,00 | 0,12 | 0,06 |
| Co | 0,35 | 0,45 | 0,40 |
| Ni | 20,38 | 1,45 | 10,92 |
| Cr | 0,00 | 0,93 | 0,47 |
| V | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| U | 0,01 | 0,00 | 0,01 |
| K/Rb | 608 | 670 | 620 |
| CO ₂ /C H ₄ | 439 | 122 | 280 |

Примечание. Анализы выполнены в ФГУП ЦНИГРИ (аналитик С.Г. Кряжев). Прочерк – содержание ниже предела обнаружения.

Note. The analyses were performed in FSBI TSNIGRI (operator S.G. Kryazhev). A dash – below the detection limit.

Геохимические особенности флюидов

Газовый состав флюида, содержание анионов, катионов и микроэлементов проанализированы выше указанных приборах по методике [10] в ЦНИГРИ (г. Москва).

Рудообразующий флюид, отложивший золото-сульфидно-кварцевые жилы, рудопроявления Арыскан характеризуется многокомпонентным составом

(табл. 4). Среди катионов главную роль играет (г/кг H₂O) Na (12,91), в подчиненном количестве находятся Ca (1,96), K (1,32), и Mg (0,26). Растворенных газов в рудообразующем флюиде много, и среди них преобладала углекислота. Установлены значимые количества таких компонентов, как (г/кг H₂O): CO₂ (85,58), HCO₃⁻ (35,74), Cl⁻ (4,51) и CH₄ (0,20). Из микрокомпонентов в значительных количествах присутствует (10⁻³ г/кг H₂O): Cu (780), B (696), As (209), Ba (153), Sb (27,9) и другие, в небольших количествах – Pb (1,18), Hg (0,58), Ag (0,21), Au (0,17), Bi и U (0,01) и др. (табл. 4).

Отношения главных компонентов флюида изменяются в следующих пределах: Na/K – от 26,07 до 9,78, CO₂/CH₄ – от 122 до 439.

Во флюиде, отложившем золото-теллуридно-сульфидно-кварцевые жилы, среди катионов главную роль играет (г/кг H₂O) Na (13,82), в подчиненном количестве находятся Ca (1,74), K (0,53), и Mg (0,45). Установлены значимые количества (г/кг H₂O): CO₂ (23,98), HCO₃⁻ (37,59), Cl⁻ (4,27) и CH₄ (0,20). Из микрокомпонентов присутствует (10⁻³ г/кг H₂O): Ba (350,5), B (206,1), As (101), Sr (62,9), Cu (47,5), Fe (18,61), Zn (11,8), Ag (3,12), Mo (2,89), Ni (1,45), Cr (0,93), Pb (0,19), Au (0,11), Bi (0,01) и др. (табл. 4).

Средний химический состав рудообразующих флюидов показан на рис. 8.

Изотопный состав серы пирита и флюида

Определение отношений стабильных изотопов серы в пирите выполнено в ЦКП «Многоэлементные и изотопные исследования» СО РАН с использованием газового масс-спектрометра Finnigan MAT Delta в режиме двойного напуска (г. Новосибирск, аналитики В.Н. Реутский, М.Н. Колбасова). Значения δ³⁴S приведены в промилле (‰) относительно стандарта CDT.

Для определения изотопного состава сульфидной серы были отобраны монофракции двух проб пирита из золото-теллуридно-сульфидно-кварцевых жил. Изотопный состав пирита характеризуется от +1,6 до +2,5 ‰. Изотопный состав серы сульфидов гидротермальных месторождений зависит от источника серы гидротермальной жидкости и условий осаждения минерала (температура осаждения, pH и fO₂ и т. д.) [11–13].

Значения δ³⁴S_{H₂S} флюида в соответствии с уравнением фракционирования [11, 14], варьируют от -0,5 до 1,1 ‰ при 270–160 °C, что свидетельствует об участии серы магматического происхождения (от -3 до +3‰) [11, 12].

Обсуждение результатов

Золотое оруденение на рудопроявлении Арыскан парагенетически связано с дайками риолит- и гранодиоритов-порфиров баянкольского комплекса (D₃) и сопряжено с процессами березитизации интрузивных и осадочных пород. Отметим, что образование березитов с кварцем, пиритом, серицитом, анкеритом и сидеритом по интрузивным (кислым, средним) и осадочным, вулканогенно-осадочным породам описано на Мечниковском, Ганеевском (Южный Урал) и Кедровом (Забайкалье) месторождениях [15–19].

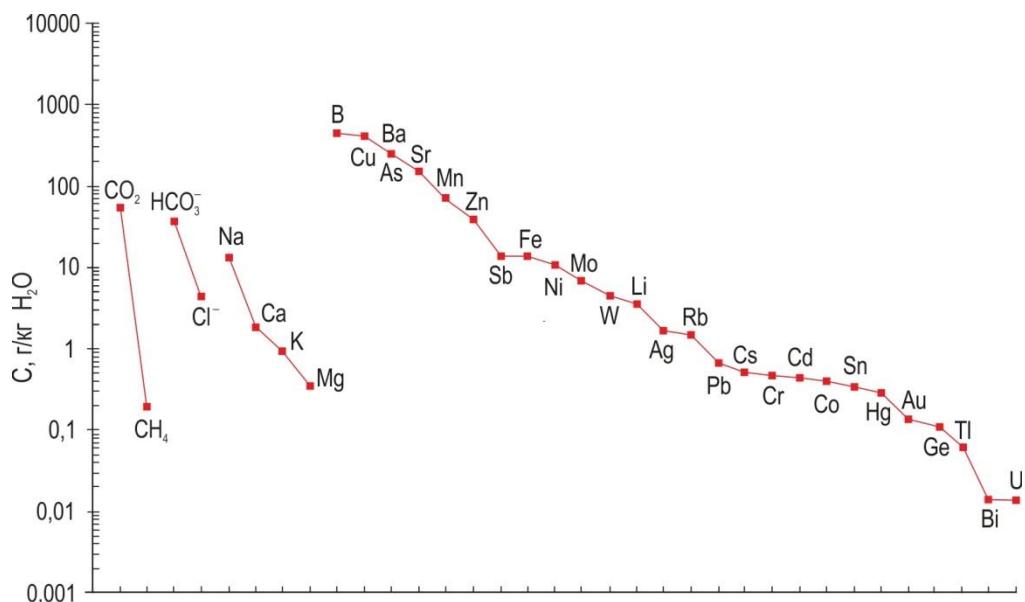


Рис. 8. Средний химический состав флюида рудопроявления Арыскан

Fig. 8. Average chemical fluid composition of Aryskan ore occurrence

Рудопроявление Арыскан характеризуется своеобразным минеральным составом руд, а именно наличием теллуридов (петцит, гессит, теллуроисмутит, цумоит, алтант), селенидов (фишессерит, клаусталит) и сульфотеллурида Au (букхорнит), последние характерны для вулканогенно-гидротермальных золото-серебряных, вулканогенно-плутоногенных золото-кварцевых месторождений [20].

Минералого-геохимическими методами установлено, что средняя проба золота рудопроявления Арыскан составляет 894 % при вариациях от 810 до 935 %, золото-сульфидно-кварцевой стадии – 893 % (от 810 до 935 %), золото-теллуридно-сульфидно-кварцевой стадии – 900 % (866–925 %), т. е. золотины золотосодержащих минеральных ассоциаций рудопроявления сходны и характеризуются с небольшой дисперсией.

По данным ICP-MS, среди анионов в рудообразующем флюиде преобладает гидрокарбонат, концентрации которого существенно выше хлора. Из катионов рудообразующий флюид наиболее обогащен Na с примесями Ca, K и Mg; и флюид можно отнести к гидрокарбонатно-хлоридно-натриевому типу, что не противоречит данным термометрии. Повышенные количества Ca, Mg и Ba (\pm Sr, Mn) и гидрокарбонат-иона выражаются в отложении карбонатов во вмещающих березитах.

Обогащение флюида рудными элементами (Cu, Zn, As, Sb) отражает состав сульфидов золотосодержащих минеральных ассоциаций. Высокие концентрации Cu во флюиде выражены в широком развитии халькопирита в жилах.

Согласно данным рамановской спектроскопии флюидных включений, золотосодержащие жилы и метасоматиты рудопроявления Арыскан отлагались метан-углекислотно-водно-хлоридным флюидом. 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 и Ag, что согласуется с минералогическими данными (наличием барита и теллуридов Ag). Степень окисленности флюида (CO₂/CO₂+CH₄) при минералообразовании стабильна и составляет 0,9–1. На окисленный характер флюида указывает также присутствие в жилах селенидов и Se-содержащих минералов, т. к., по данным [21], развитие селенидов в рудах свидетельствует о высоком окислительном потенциале среди рудообразования.

По результатам термометрии флюидных включений, березиты образовались при участии углекислотно-водно-хлоридного флюида с соленостью 4,9–41,5 мас. % экв. NaCl при минимальных температурах 250–340 °C.

Ранние золото-сульфидно-кварцевые жилы образовались при P ~1,8 кбар (~5,4 км) из флюида состава NaCl-KCl-H₂O ±CO₂ с концентрациями солей 4,1–32,9 мас. % NaCl-экв. при температурах 145–290 °C.

Золото-теллуридно-сульфидно-кварцевые жилы образованы углекислотно-водным флюидом состава NaCl-KCl-H₂O, NaCl-Na₂HCO₃-H₂O и NaCl-H₂O с концентрациями солей 2,9–8,5 мас. % NaCl-экв. при температурах 145–290 °C. Отметим, что параметры формирования парагенезисов Ag₃AuTe₂–Ag₂Te–Au соответствуют 128–280 °C, при f (Te₂) = 10⁻¹³–10⁻¹⁰ [21].

Парагенезис золота в золото-сульфидно-кварцевых жилах с пиритом, халькопиритом и галенитом предполагает то, что фугитивность серы (f S₂) в минералообразующей системе составляла от 10^{-14,5} до 10^{-8,6} при 250 °C [22, 23]. Парагенезис теллуридов, сульфидов и селенидов в золото-теллуридно-сульфидно-кварцевых жилах образовался при фугитивности теллура (f Te₂) от 10^{-17,9} до 10^{-9,5}, f S₂ – 10^{-23,5}–10^{-9,5}, f Se₂ – 10^{-21,2}–10^{-18,5} при 200 °C [22, 23].

Изотопные значения $\delta^{34}\text{S}_{\text{H,S}}$ флюида (от -0,5 до 1,1 %, при 270–160 °C) свидетельствуют о магматиче-

ском происхождении рудообразующих флюидов на рудопроявлении Арыскан [11–13, 24]. Также на это указывает высокая соленость флюидов и комплексный многокомпонентный состав с хлоридами Na и K и гидрокарбонатами. Повышенные концентрации В во флюиде и присутствие так называемых «магмафильных» элементов (W, Sb, Mo, Sb) также указывают на участие магматогенного флюида в рудообразовании [25, 26].

Для золоторудных месторождений России (Березовское, Кочкиарское) вовлечение в рудообразование флюидов магматического, метаморфического или метеорного происхождения при доминирующей роли магматического флюида является типичным [27]. Для рудопроявления Арыскан зафиксирован широкий интервал солености флюидов от 32 до 3 мас. % NaCl-экв., что может быть интерпретировано как разбавление магматического флюида с повышенной соленостью нагретыми метеорными водами [28].

Подобный разброс солености флюида может также указывать на то, что рудоотложение обеспечивалось гетерофазным магматогенным флюидом, состоящим из высокосоленого раствора и более низкоплотной и низкосоленой флюидной фазы [29]. В пользу этого свидетельствует близкий макро-, микроэлементный и газовый состав флюидных включений с разной соленостью, присутствие включений, гомогенизирующихся в газовую и жидкую фазу в одинаковом интервале температур. Плотности флюидов, рассчитанные с помощью программы Flincor [30] и диаграммы из [28], составили 0,9–1,1 г/см³ для высокосоленого флюида и 0,7–0,9 г/см³ для слабосоленой фазы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зайкова Е.В., Зайков В.В. О золотом оруденении в Западной Туве, связанном с девонским магматизмом // Материалы по геологии Тувинской АССР. – Кызыл: Тувинское книжное издво, 1969. – С. 72–76.
2. Кужугет Р.В., Зайков В.В., Анкушева Н.Н. Минералого-геохимические особенности Арысканского рудопроявления золота кварцево-жильного типа в березитах (Западная Тува) // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2017. – № 1 (29). – С. 98–110.
3. Рудные формации Тувы / В.В. Зайков, В.И. Лебедев, В.Г. Тюлькин, В.Н. Гречишцева, К.С. Кужугет. – Новосибирск: Наука, 1981. – 201 с.
4. Золотое оруденение в зоне Хемчикско-Куртушибинского глубинного разлома (Тува) / Б.Д. Васильев, В.П. Дружков, А.И. Красиков, Г.Ю. Боярко // Рудные формации и месторождения Сибири. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 1979. – С. 91–95.
5. Безруков О.А. Результаты поисково-оценочных работ в бассейне рек Ак-Суг, Алаш, Хемчик. – Кызыл: Изд-во Тувинской геологоразведочной экспедиции, 1969. – 199 с.
6. Борисенко А.С. Анализ солевого состава растворов газовождких включений в минералах методом криометрии // Использование методов термобарогеохимии при поисках и изучении рудных месторождений / под ред. Н.П. Лаверова. – М.: Недра, 1982. – С. 37–46.
7. Bodnar R.J., Vityk M.O. Interpretation of microthermometric data for H₂O–NaCl fluid inclusions // Fluid Inclusions in Minerals, Methods and Applications / Eds. B. De Vivo, M.L. Frezzotti. – Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute & State University publ., 1994. – P. 117–130.
8. Реддер Э. Флюидные включения в минералах. – М.: Мир, 1978. – Т. 1. – 360 с.
9. Коваленкер В.А., Наумов В.Б., Прокофьев В.Ю. Гетерогенизация флюидов как один из факторов отложения продуктив-
10. 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.
11. 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.
12. Ohmoto H. Stable isotope geochemistry of ore deposits // Review Mineralogy. – 1986. – V. 16. – P. 491–560.
13. Hoefs J. Stable Isotope Geochemistry. – Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2009. – 281 p.
14. Li Y., Liu J. Calculation of sulfur isotope fractionation in sulfides // Geochimica Cosmochimica Acta. – 2006. – V. 70. – P. 1789–1795.
15. Артемьев Д.С. Рудоносность гидротермально-метасоматических образований Майского рудного поля (Чукотский Автономный Округ): автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – СПб., 2018. – 20 с.
16. Петрохимическая характеристика магматических горных пород и гидротермально-метасоматических образований Кедровского золоторудного поля / Г.Г. Попов, Б.Г. Попов, Х.Х. Муратшин, Д.Г. Мизиряк // Разведка и охрана недр. – 2017. – № 9. – С. 27–32.
17. Listvenite-related gold deposits of the South Urals (Russia): a review / E.V. Belogub, I.Yu. Melekestseva, K.A. Novoselov, M.V. Zabotina, G.A. Tret'yakov, V.V. Zaykov, A.M. Yuminov // Ore Geology Reviews. – 2017. – V. 85. – P. 247–270.
18. Условия образования Ганевского золоторудного месторождения, Учалинский рудный район: минералогическая термометрия и изучение флюидных включений / М.В. Заботина, Н.Н. Анкушева, С.Н. Шанина, В.А. Котляров // Минералогия. – 2018. – № 4. – С. 55–67.

Заключение

Таким образом, золотое оруденение на рудопроявлении Арыскан сопряжено с процессами березитизации интрузивных и осадочных пород. По минералого-геохимическим особенностям руд рудопроявление можно отнести к малосульфидной золото-кварцевой вулканогенно-плутоногенной формации.

По данным изучения флюидных включений в кварце золотосодержащих жил и березитов рудопроявления Арыскан установлено, что они образовались из магматического гетерофазного углекислотно-водного флюида в близких диапазонах температур и давлений. Минералообразование протекало в условиях эволюции (остывания) от 340–320 °C (березиты) до 145°C (поздние золото-теллуридные жилы), при вариациях *f*O₂, *f*S₂, *f*Se₂ и *f*Te₂. Содержания рудных элементов (Cu, Zn, As, Sb и др.) во флюиде отражают состав золотосодержащих минеральных ассоциаций.

Полученные результаты могут иметь практическое значение для региональных прогнозно-металлогенических построений, поисков и оценки месторождений и рудопроявлений золота.

Авторы благодарны Е.К. Дружковой и Б.Д. Васильеву за помощь в проведении исследований. Минералого-геохимические и изотопные исследования выполнены по государственному заданию ТУИКОПР СО РАН (0384-2016-0012), термобарогеохимические исследования включений выполнены по государственным заданиям ИГМ СО РАН (0330-2016-0002) и ИМин ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН (2019–2021 гг.).

19. Геологическое строение и минералогия Мечниковского месторождения золота, Южный Урал / И.Ю. Мелекесцева, В.В. Зайков, Г.А. Третьяков, К.А. Филиппова, В.А. Котляров // Литосфера. – 2019. – Т. 19. – № 1. – С. 111–138.
20. Спиридонов Э.М. Обзор минералогии золота в ведущих типах Au минерализации // Золото Кольского полуострова и сопредельных регионов: Труды Всероссийской (с международным участием) научной конференции, посвящённой 80-летию Кольского НЦ РАН. – Апатиты, 26–29 сентября 2010. – Апатиты: Изд-во К&М, 2010. – С. 143–171.
21. Парагенезисы теллуридов золота и серебра в золоторудном месторождении Флоренсия (Республика Куба) / Н.С. Бортников, Х.Л. Крамер, А.Д. Генкин, Л.Я. Крапива, М. Санта-Крус // Геология рудных месторождений. – 1988. – № 2. – С. 49–61.
22. 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.
23. 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.
24. Kerrich R. Source processes for Archean Au-Ag vein deposits: evidence from lithophile-element systematics of the Hollinger-McInture and Buffalo ankerite deposits, Timmins // Canadian Journal of Earth Sciences. – 1989. – V. 26. – P. 755–781.
25. Бор и борные кислоты в эндогенных рудообразующих флюидах / В.Ю. Прокопьев, И.С. Перетяжко, С.З. Смирнов, Б.Р. Тагиров, Е.О. Грознова, Е.А. Самсонова. – М.: Пасьва, 2003. – 192 с.
26. Trace element and REE geochemistry of the Zhewang gold deposit, southeastern Guizhou Province / L. Kun, Y. Ruidong, C. Wenyong, L. Rui, T. Ping // Chinese Journal of Geochemistry. – 2014. – V. 33. – P. 109–118.
27. Бортников Н.С. Геохимия и происхождение рудообразующих флюидов в гидротермально-магматических системах в тектонически активных зонах // Геология рудных месторождений. – 2006. – Т. 48. – № 1. – С. 3–28.
28. Wilkinson J.J. Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits // Lithos. – 2001. – V. 55. – P. 229–272.
29. 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.
30. Brown P.E. FLINCOR: a microcomputer program for the reduction and investigation of fluid inclusion data // American Mineralogist. – 1989. – V. 74. – P. 1390–1393.

Поступила 16.06.2020 г.

Информация об авторах

Кужугет Р.В., кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории геодинамики, магматизма и рудообразования 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; старший преподаватель Геологического факультета Южно-Уральского государственного университета.

Редина А.А., младший научный сотрудник лаборатории рудоносности щелочного магматизма Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН.

Прокопьев И.Р., кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник лаборатории рудоносности щелочного магматизма Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН; старший преподаватель Геолого-геофизического факультета Новосибирского государственного университета.

Ондар Э.-Д.В., преподаватель кафедры горного дела Тувинского государственного университета.

UDC 553.2: 549.283 (571.52)

ARYSKAN GOLD-SULPHIDE-QUARTZ ORE OCCURRENCE (WESTERN TUVA): CONDITIONS OF FORMATION AND GEOCHEMICAL PECULIARITIES OF FLUIDS

Renat V. Kuzhuget¹,
rkuzhuget@mail.ru

Natalia N. Ankusheva^{2,3},
ankusheva@mail.ru

Anna A. Redina⁴,
anna-red@outlook.com

Ilya R. Prokopyev^{4,5},
prokopev_ilya@mail.ru

Ertine Dash V. Ondar⁶,
ondar21@mail.ru

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, Ilmensky Reserve, Miass, 456317, Russia.

³ South Urals State University, Miass,
10, 8 Iyulya street, Miass, 456316, Russia.

⁴ V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS,
3, Academician Koptyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

⁵ Novosibirsk State University,
1, Pirogov street, Novosibirsk, 630090, Russia.

⁶ Tuvan State University,
36, Lenin street, Kyzyl, 667000, Russia.

The relevance of the research is defined by the need to determine the genesis and formation conditions of gold deposits from Tuva Republic for improving the efficiency of geological prospecting and increasing the gold mineral resource base of the region.

The aim of the research is to examine the conditions of fluid formation and geochemical peculiarities of Aryskan gold ore occurrence in Western Tuva.

Analytical methods. The temperatures, fluid composition, salinity, and trapping pressures were examined due to fluid inclusion study by means of Linkam TMS-600 cryostage equipped with Olympus BX 51 optical microscope; gas composition of fluid inclusions was detected using Ramanor U-1000 Raman spectrometer equipped with Horiba DU420E-OE-323 detector and Millenia Pro (Spectra-Physics) laser; bulk element composition of fluid was determined on Agilent 6890 gas chromatograph, extracted anion amounts of fluid were detected using TSVET-3000 ion chromatograph, cations and trace elements – by means of ICP MS (Elan-6100); S isotopic compositions were specified on Finnigan MAT Delta gas mass-spectrometer.

Results. We specified that early beresites of Aryskan ore occurrence were formed due to CO_2 water-chloride fluid with salinity ranged between 4,9 and 41,5 wt. % NaCl equiv. and temperatures from 250 to 340 °C. The Au-bearing mineral associations were formed at $P \sim 1,8$ kbar ($\sim 5,4$ km depth) in mesoabissal environment due to CO_2 watered fluids contained $\text{NaCl}-\text{KCl}-\text{H}_2\text{O}$, $\text{NaCl}-\text{Na}_2\text{HCO}_4-\text{H}_2\text{O}$ and $\text{NaCl}-\text{H}_2\text{O}$ with salinity from 2,9 up to 32,9 wt. % NaCl equiv. in front of the temperatures ranged between 290–145 °C (I Au-bearing substage – 290–145 °C, II Au-bearing substage – 270–160 °C) with varying $f\text{O}_2$, $f\text{S}_2$, $f\text{Se}_2$ and $f\text{Te}_2$. The isotopic $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$ (from -0,5 up to +1,1 ‰) and salt composition of fluids and trace elements indicate the magmatic genesis.

Key words:

Gold, beresites, gold deposits, quartz, Tuva, fluid inclusions, trace elements, sulphur isotopic composition.

We thank E.K. Druzhkova and B.D. Vasiliev for help in conducting research. Mineralogical, geochemical and isotopic researches are supported by the State Contract of TuvIENR SB RAS (0384-2016-0012), fluid inclusion study was supported by State Contracts of the Institute of Geology and Mineralogy SB RAS (0330-2016-0002) and Institute of Mineralogy SU FRC MiG UB RAS (project for 2019–2021).

REFERENCES

1. Zaykova E.V., Zaykov V.V. O zolotom orudenenii v Zapadnoy Tuve, svyazannom s devonskim magmatizmom [Gold mineraliza-

tion in the Western Tuva related to Devonian magmatism]. *Materialy po geologii Tuvinskoy ASSR* [Materials in geology of Tuva ASSR]. Kyzyl, TGRE Publ., 1969. pp. 72–76.

2. Kuzhuget R.V., Zaykov V. V., Ankusheva N.N. Mineral and geochemical features of the Aryskanskoye gold-quartz mineralisation in berasites (Western Tuva). *Geology and mineral resources of Siberia*, 2017, no. 1 (29), pp. 98–110. In Russ.
3. Zaykov V.V., Lebedev V.I., Tulkin V.G., Grechischeva V.N., Kuzhuget K.S. *Rudnye formatsii Tuvy* [Ore formations of Tuva]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1981. 201 p.
4. Vasiliev B.D., Druzhkov V.P., Krasikov A.I., Boyarko G.Yu. Zolotoe orudenie v zone Khemchiksko-Kurtushibinskogo glubinnogo razloma (Tuva) [Gold mineralization in Khemchik-Kurtushibinsky fault, Tuva]. *Rudnye formatsii i mestorozhdeniya Sibiri* [Ore formations and deposits of Siberia]. Tomsk, TPU Publ., 1979. pp. 91–95.
5. Bezrukov O.A. *Rezul'taty poiskovo-otsenochnykh rabot v basseyne rek Ak-Sug, Alash, Khemchik* [Results of prospecting of basin of Ak-Sug, Alash and Khemchik rivers]. Kyzyl, TGRE Publ., 1969. 199 p.
6. Borisenko A.S. Analiz solevogo sostava rastvorov gazovozhzhikh v klyucheniyu v mineralakh metodom kriometrii [Analysis of salt composition of solutions of gas-liquid inclusions in minerals using the cryometry method]. *Ispolzovanie metodov termobaroge okhimii pri poiskakh i izuchenii rudnykh mestorozhdeniy* [Use of thermobaroge geochemistry methods for prospecting and studying ore deposits]. Ed. by N. Laverov. Moscow, Nauka Publ., 1982. pp. 37–46.
7. Bodnar R.J., Vityk M.O. Interpretation of microthermometric data for H_2O -NaCl fluid inclusions. *Fluid Inclusions in Minerals, Methods and Applications*. Eds. B. De Vivo, M.L. Frezzotti. Blacksburg, Virginia Polytechnic Institute & State University Publ., 1994. pp. 117–130.
8. Roedder E. *Flyuidnye v klyucheniyu v mineralakh* [Fluid inclusions in minerals]. Moscow, Mir Publ., 1987. 360 p.
9. Kovalenker V.A., Naumov V.B., Prokofiev V.Yu. *Geterogenizatsiya flyuidov kak odin iz faktorov otlozheniya produktivnykh assotsiy pri formirovani zolotorudnykh i zoloto-serebryanykh mestorozhdeniy* [Heterogenization of fluids as one of the factors of the deposition of productive associations during the formation of gold and gold-silver deposits]. *Mineraloobrazovaniye iz vskipayushchikh rastvorov* [Mineralogy from incubating solutions]. Perm, Perm University Publ., 1988. pp. 217–218.
10. 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.
11. 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.
12. Ohmoto H. Stable isotope geochemistry of ore deposits. *Review Mineralogy*, 1986, vol. 16, pp. 491–560.
13. Hoefs J. *Stable Isotope Geochemistry*. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2009. 281 p.
14. Li Y., Liu J. Calculation of sulfur isotope fractionation in sulfides. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 2006, vol. 70, pp. 1789–1795.
15. Artemiev D.S. *Rudonosnost' gidrotermalno-metasomatischeskikh obrazovaniy Mayskogo rudnogo polya (Chukotskiy Avtonomny Okrug)*. Avtoreferat Kand. nauk. [Ore content of hydrothermal and metasomatic formations of the May ore field (Chukotka Autonomous Okrug)]. Cand. Diss. Abstract]. Petersburg, 2018. 20 p.
16. Popov G.G., Popov B.G., Muratshin H.H., Miziryak D.G. Petrochemical characteristic of magmatic rocks and hidrotermal-metasomatic of formations of kedrovsky of the gold field. *Prot. spect and protection of mineral resources*, 2017, no. 9, pp. 27–32. In Russ.
17. Belogub E.V., Melekestseva I.Yu., Novoselov K.A., Zabotina M.V., Tret'yakov G.A., Zaykov V.V., Yuminov A.M. Listvenite-related gold deposits of the South Urals (Russia): a review. *Ore Geology Reviews*, 2017, vol. 85, pp. 247–270.
18. Zabotina M.V., Ankusheva N.N., Shanina S.N., Kotlyarov V.A. Formation conditions of the Ganeevskoe gold deposit, Uchaly ore district: mineralogical thermometry and fluid inclusion study. *Mineralogy*, 2018, no. 4, pp. 55–67. In Russ.
19. Melekestseva I.Yu., Zaykov V.V., Tret'yakov G.A., Filippova K.A., Kotlyarov V.A. Geological structure and mineralogy of the Mechnikovskoe gold deposit, the Southern Urals. *Litosfera*, 2019, vol. 19, no. 1, pp. 111–138. In Russ.
20. Spiridonov E.M. Obzor mineralogii zolota v vedushchikh tipakh Au mineralizatsii [Review of gold mineralogy in major types of Au mineralization]. *Zoloto Kolskogo poluostrova i sopredelnykh regionov. Trudy Vserossiiskoy (s mezhdunarodnym uchastiem) nauchnoy konferentsii, posvyashchennoy 80-letiyu Kolskogo NC RAN* [Gold of the Kola Peninsula and Adjacent Regions. Proceedings of the Russian (with International Participants) Conference Dedicated to the 80th Anniversary of the Kola Scientific Center (Russian Academy of Sciences)]. Apatity, K&M Publ., 2010. pp. 143–171.
21. Bortnikov N.S., Kramer Kh., Genkin A.D., Krapiva L.Ya., Santa Cruz M. Paragenesis of Gold and Silver Tellurides in the Florencia Gold Deposit, the Republic of Cuba. *International Geology Review*, 1988, vol. 30 (3), pp. 294–306.
22. 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.
23. Afifi A.M., Kelly W.C., Essene E.J. Phase relations among tellurides, sulfides, and oxides: I. Thermochemical data and calculated equilibria; II. Applications to telluride-bearing ore deposits. *Economic Geology*, 1988, vol. 83, pp. 377–394.
24. Kerrich R. Source processes for Archean Au-Ag vein deposits: evidence from lithophile-element systematics of the Hollinger-McInture and Buffalo ankerite deposits, Timmins. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1989, vol. 26, pp. 755–781.
25. Prokofev V.Yu., Peretyazhko I.S., Smirnov S.Z., Tagirov B.R., Groznova E.O., Samsonova E.A. *Bor i bornye kislotsy v endogenykh rudoobrazuyushchikh flyuidakh* [Boron and boric acid in endogenous ore-forming processes]. Moscow, Pasva Publ., 2003. 192 c.
26. Kun L., Ruidong Y., Wenyong C., Rui L., Ping T. Trace element and REE geochemistry of the Zhewang gold deposit, southeastern Guizhou Province. *Chinese Journal of Geochemistry*, 2014, vol. 33, pp. 109–118.
27. Bortnikov N.S. Geochemistry and origin of the ore-forming fluids in hydrothermal-magmatic systems in tectonically active zones. *Geology of Ore Deposits*, 2006, vol. 48, no. 1, pp. 3–28.
28. Wilkinson J.J. Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. *Lithos*, 2001, vol. 55, pp. 229–272.
29. 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.
30. Brown, P.E. FLINCOR: a microcomputer program for the reduction and investigation of fluid inclusion data. *American Mineralogist*, 1989, vol. 74, pp. 1390–1393.

Received: 16 June 2020.

Information about the authors

- Renat V. Kuzhuget**, Cand. Sc., lead researcher, Tuvian Institute for Exploration of Natural Resources SB RAS.
- Natalia N. Ankusheva**, Cand. Sc., scientist, Institute of Mineralogy SU FRC MG UB RAS; senior lecturer, South Urals State University.
- 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; senior lecturer, Novosibirsk State University.
- Ertine Dash V. Ondar**, teacher, Tuvan State University.

УДК 517.9; 004; 551.58

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ ГЛОБАЛЬНОГО КЛИМАТА КАК СЛОЖНОЙ СИСТЕМЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЕЙВЛЕТНЫХ ФАЗО-ЧАСТОТНЫХ ФУНКЦИЙ, ФАЗО-ЧАСТОТНЫХ И ФАЗО-ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГЕЛИОКОСМИЧЕСКИХ И КЛИМАТИЧЕСКИХ ПЕРЕМЕННЫХ. ЧАСТЬ 1

Алексеев Валерий Иванович,

v_alekseev@ugrasu.ru

Югорский государственный университет,

Россия, 628012, г. Ханты-Мансийск, ул. Чехова, 16

Актуальность исследования обусловлена необходимостью установления истинных причин и закономерностей изменений глобального климата на Земле как сложной системы.

Цель: разработать и предложить эффективный метод извлечения информации об изменчивости переменных, содержащейся в исходных данных изменений гелиокосмических и климатических переменных, заданных в виде временных рядов, и применить этот метод для обоснования климатических изменений на Земле.

Объекты: временные ряды изменений гелиокосмических и климатических переменных.

Методы: непрерывное прямое вейвлет-преобразование исходных данных с использованием комплексного вейвлета 'сгайб' с вычислением их временных вейвлетных фазо-частотных функций, фазо-частотных и фазо-временных характеристик; оценка спектра периодичностей функций по фазо-временным характеристикам переменных; оценка и анализ плотностей распределений фазо-частотных и фазо-временных характеристик; оценка и анализ коэффициентов корреляций между фазо-частотными и фазо-временными характеристиками переменных в разных интервалах времени.

Результаты. Получены временные вейвлетные фазо-частотные функции и их изображения, позволяющие визуализировать и оценить спектры периодичностей исследуемых переменных; оценки вейвлетных фазо-частотных и фазо-временных характеристик переменных, позволяющие проводить весь комплекс сравнительных исследований переменных и установить закономерности их изменений. К этим исследованиям относятся: оценивание плотностей распределений этих характеристик, позволяющих идентифицировать факторы, влияющие на эти изменения; вычисление матриц корреляций между вейвлетными фазо-частотными и фазо-временными характеристиками переменных в заданных равных интервалах времени, позволяющие оценить степени согласованности изменений переменных в фазо-частотной области и в области фазо-временных изменений. Установлена тесная взаимосвязь между колебательными процессами гелиокосмических переменных, солнечной активностью и вулканическими процессами на Земле, изменениями концентрации двуокиси углерода CO_2 в атмосфере. Показано, что движение Солнца относительно барицентра, обусловленное движением планет-гигантов Солнечной системы, управляет солнечной активностью, тектоническими процессами на Земле, в том числе вулканическими извержениями, климатом на Земле.

Ключевые слова:

Глобальное изменение климата, непрерывное прямое вейвлет-преобразование, временная вейвлетная фазо-частотная функция, вейвлетная фазо-частотная и фазо-временная характеристики, коэффициенты корреляций.

Введение

По данным Всемирной метеорологической организации (ВМО) 20 самых теплых лет в истории наблюдений приходятся на последние 22 года, а четыре самых теплых года – на четыре последних года [1, 2]. В работах подчеркивается, что главным фактором роста приземной температуры в современности является рост концентрации в атмосфере парниковых газов, углекислого газа CO_2 , выбрасываемого в атмосферу человечеством при использовании ресурсовскопаемого топлива. В итогах конференции по изменению климата в Катовице (Польша) СОП24 в 2018 г. [3], в докладе об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2018 [4], в докладе о климатических рисках на территории Российской Федерации [5], а также в работах [6–10] утверждается, что главным поставщиком парниковых газов в атмосферу является человеческая деятельность.

В коллективных научных трудах [11–13] представлены фундаментальные научные исследования о факторах, определяющих современные глобальные изменения природной среды и глобального климата;

о влиянии гелиокосмических, геофизических и других процессов на развитие вулканизма и изменения глобального климата. На изменения природной среды влияют многие усиливающиеся в современности факторы, в том числе и воздействие деятельности человека.

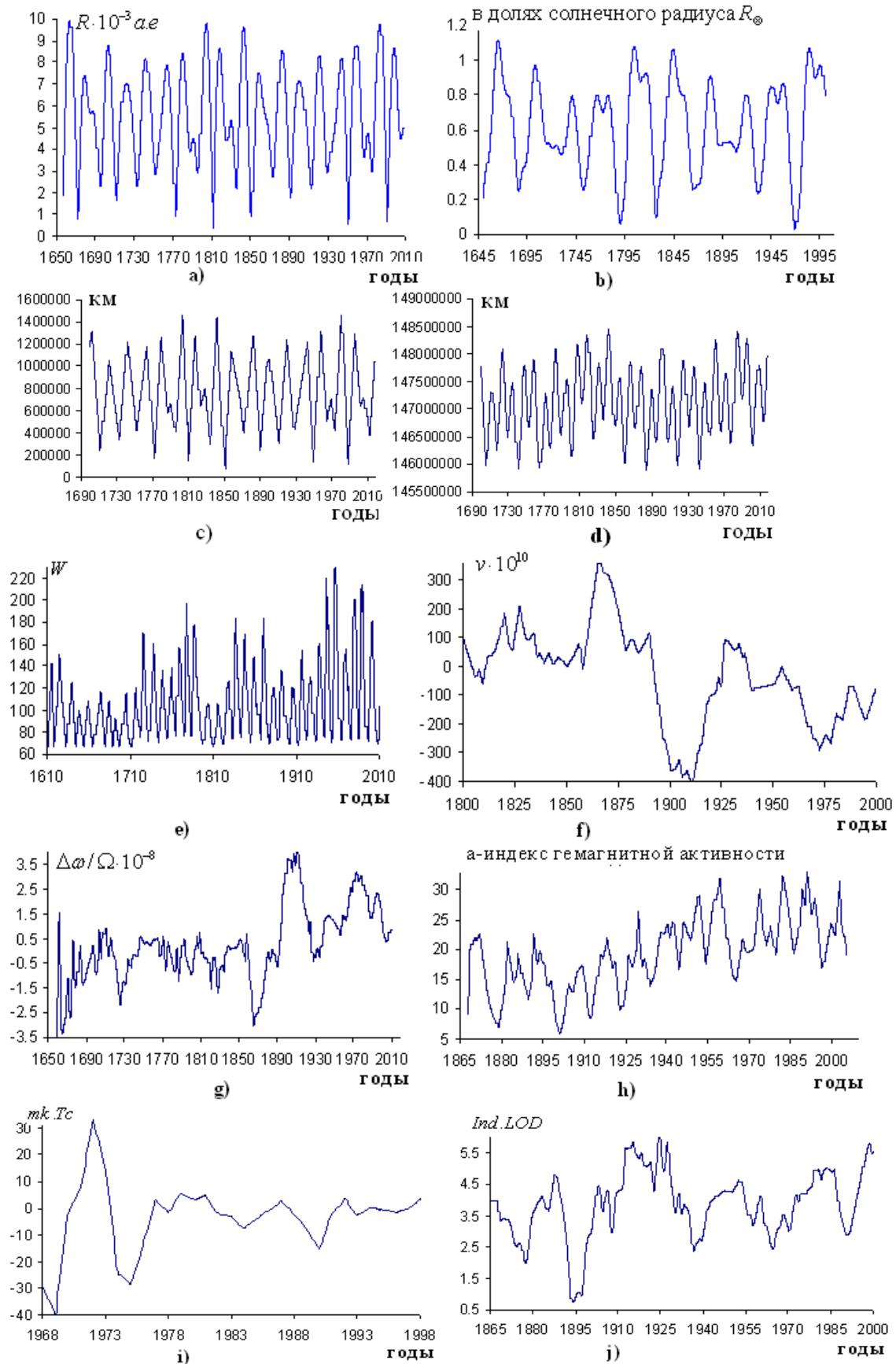
Изменения природной среды и климата во времени и в пространстве обусловлены изменениями факторов, влияющих на эти процессы: гелиокосмических, геофизических, климатических и антропогенных.

Цель исследования – разработка метода, позволяющего установить закономерности изменений глобального климата в прошлом, в современности и причины этих изменений.

Исходные данные

Решение задачи производится анализом гелиокосмических переменных и многих других факторов, влияющих на природные процессы Земли [11–13]. В качестве таких факторов использованы графики изменений барицентрического движения Солнца, асимметричного движения Солнца вокруг центра

масс (ЦМ), относительных отклонений угловой скорости вращения Земли от эталонной величины, отклонения длительности суток, расстояния от ЦМ солнечной системы до Солнца и до Земли. Графики изменений этих и других переменных, использованных в работе, приведены на рис. 1.



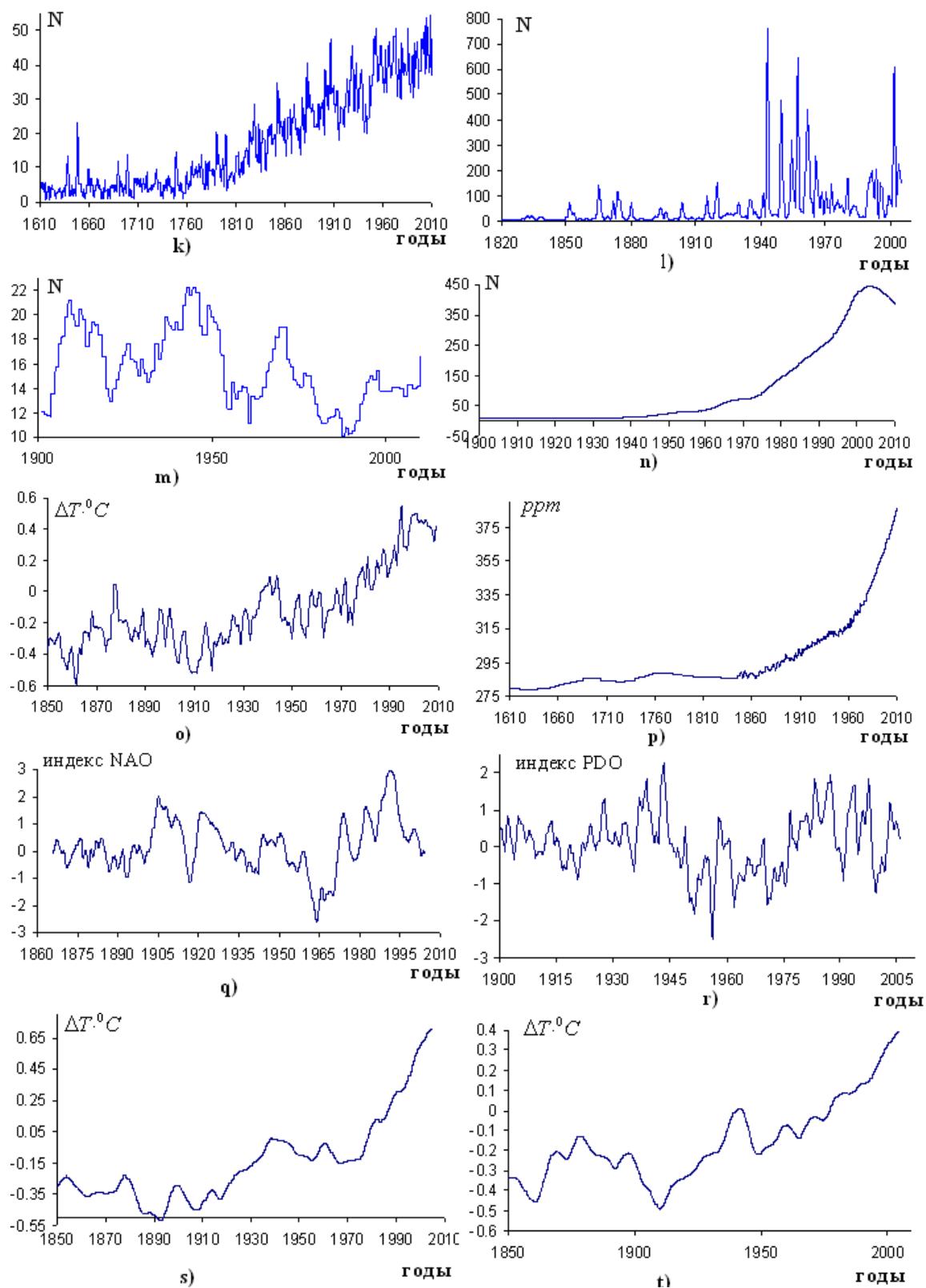


Рис. 1. Графики изменений гелиокосмических, климатических факторов: а) $f_1(t)$ – изменение со временем расстояния центра масс (ЦМ) Солнца от барицентра в 10^{-3} а.е. по ординате на интервале с 1656 до 2009 гг. с учетом Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна [13]; б) $f_2(t)$ – асимметричное движение Солнца вокруг ЦМ солнечной системы, расстояние Солнца от субъюпитерной точки (в долях солнечного радиуса по ординате) по ординате в 1650–2000 гг. [14]; в) $f_3(t)$ – изменение расстояния ЦМ солнечной системы до Солнца в км в 1700–2018 гг. [15]; д) $f_4(t)$ – изменение расстояния ЦМ солнечной системы до Земли в км в 1700–2018 гг. [15]; е) $f_5(t)$ – временные вариации солнечной активности (чисел Вольфа по ординате) в 1700–2010 гг. [16]; ж) $f_6(t)$ – ход изменения скорости вращения Земли. По оси ординат отложены относительные уклоны угловой скорости $v \cdot 10^{10}$ в 1610–2012 гг. [17]; г) $f_7(t)$ – ход среднегодовых относительных отклонений угловой

скорости вращения Земли от эталонной величины ($\Delta\omega/\Omega \cdot 10^{-8}$) по ординате в интервале с 1656 по 2008 гг. [13]; h) $f_8(t)$ – изменение индекса «а» геомагнитной активности Земли в 1868–2000 гг. (в магнитных индексах) [18]; i) $f_9(t)$ – временные вариации среднегодовых значений напряженности общего магнитного поля Солнца в 1968–2000 гг. (в микротеслах) [19], j) $f_{10}(t)$ – график скорости изменения со временем длительности земных суток (LOD) между 1865 и 2005 гг., скользящие средние по пяти годам [14]; k) $f_{11}(t)$ – график количества вулканических извержений в мире в 1610–2014 гг. [20]; l) $f_{12}(t)$ – график количества зарегистрированных цунами в мире в 1820–2006 гг. [21]; m) $f_{13}(t)$ – изменение количества землетрясений в мире в 1900–2010 гг. с усреднением по пяти годам [21]; n) $f_{14}(t)$ – количество зарегистрированных катастроф в Мире в 1900–2010 гг. [22]; o) $f_{15}(t)$ – график изменения аномалии средней глобальной приземной температуры в 1850–2009 гг. относительно среднего в 1961–1990 гг. [23]; p) $f_{16}(t)$ – график изменения концентрации CO_2 в ррт в атмосфере Земли в 1610–2012 гг. [23]; q) $f_{17}(t)$ – график изменения индекса Североатлантического колебания (NAO) между 1864 и 2006 гг., скользящие средние по пяти годам [14, 24]; r) $f_{18}(t)$ – график изменения индекса Тихоокеанского декадного колебания (PDO) в 1707–2000 гг. [14]; s) $f_{19}(t)$ – график изменения аномалии глобальной температуры воздуха Δt °C в районе суши между 1850 и 2005 гг. [18]; t) $f_{20}(t)$ – график изменения аномалии глобальной температуры воздуха Δt °C на поверхности Мирового океана между 1850 и 2005 гг. [18]

Fig. 1. Graphs of changes in solar and climatic factors: a) change over time of the distance of the Sun center of mass (CM) from the barycenter in a.u. by ordinate in the interval from 1656 to 2009, taking into account Jupiter, Saturn, Uranus and Neptune [13]; b) the asymmetric movement of the Sun around the solar center of the solar system, the distance of the Sun from the sub-pit point (in fractions of the solar radius along the ordinate) along the ordinate in 1650–2000 [14]; c) the change in the distance of the solar system to the Sun in km in 1700–2018 [15]; d) change in the distance of the CM of the solar system to the Earth in km in 1700–2018 [15]; e) temporary variations in solar activity (Wolf numbers in ordinate) in 1700–2010 [16]; f) is the course of the change in the Earth rotation speed. The relative deviations of the angular velocity in 1610–2012 are plotted along the ordinate axis [17]; g) the course of the average annual relative deviations of the angular velocity of the Earth's rotation from the reference value along the ordinate in the interval from 1656 to 2008 [13]; h) change in the index «а» of the geomagnetic activity of the Earth in 1868–2000 (in magnetic indices) [18]; i) temporal variations of the annual average values of the total magnetic field of the Sun in 1968–2000 (in microtesla) [19]; j) graph of the rate of change with time of the duration of the Earth's Day (LOD) between 1865 and 2005, moving averages over five years [14]; k) graph of the number of volcanic eruptions in the world in 1610–2014 [20]; l) graph of the number of registered tsunamis in the world in 1820–2006 [21]; m) change in the number of earthquakes in the world in 1900–2010 with averaging over five years [21]; n) the number of recorded disasters in the World in 1900–2010 [22]; o) graph of changes in the anomaly of the average global surface temperature in 1850–2009 relative to the average in 1961–1990 [23]; p) graph of changes in concentration in the atmosphere of the Earth in 1610–2012 [23]; q) graph of changes in the North Atlantic Oscillation (NAO) Index between 1864 and 2006, moving averages over five years [14, 24]; r) graph of the Pacific Decade Oscillation Index (PDO) in 1707–2000 [14]; s) graph of changes in the anomaly of global air temperature in the land area between 1850 and 2005 [18]; t) graph of changes in the anomaly of global air temperature on the surface of the oceans between 1850 and 2005 [18]

В изменениях приведенных выше факторов (функций) существует глубокая связь. Изменения каждой из этих функций в той или мере обусловлены изменениями других переменных. Для установления причинно-следственных связей в изменениях переменных необходимы инструменты, позволяющие установить эти связи. Таким инструментом, среди известных, выбран анализ временных вейвлетных фазо-частотных функций исследуемых переменных [25, 26] с вычислением их фазо-частотных и фазо-временных характеристик. Это связано с тем, что в космическом пространстве, где действует закон всемирного тяготения масс И. Ньютона и законы движения планет И. Кеплера, движения в пространстве одной планеты или группы планет влияют не только на траекторию движений других планет, но и на процессы, происходящие внутри планет, которые улавливаются вейвлетными преобразованиями.

Вычисление временной вейвлетной фазо-частотной функции сигнала $y(t)=f(t)$ и его основных отличительных характеристик

В основе метода лежит вейвлет-преобразование [27–29]

$$Wf(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt. \quad (1)$$

В исследованиях весьма полезно использование изменений мгновенных фазовых характеристик функции $f(t)$ во времени, вычисленных на множестве задаваемых исследователем масштабов $a(1:k)$. Это возможно при использовании вейвлетного преобразования $Wf(a, b)$. Мгновенные фазовые характеристики функции $f(t)$ в пакете Matlab вычисляются по формуле $\varphi(a, b) = \text{angle}[W(a, b)]$, изменяющиеся в интервале $\pm\pi$ радиан, где комплекснозначная матрица $Wf(a, b)$ размерности $a \times N$, N – число дискретных отсчетов сигнала $f(t)$ в исследуемом временном интервале.

В формуле (1) функция $\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ – комплексно-сопряженный вейвлет с параметрами $a(1:k)$ и b , где b – параметр сдвига на временной оси (в вычислениях b изменяется в интервале $1:N$); максимальное значение k масштаба a вейвлета определяется частотным составом, интервалом времени наблюдения сигнала $f(t)$. Например, для наблюдений факторов более 300 лет $k=1000$, для наблюдений около 150 лет $k=700$, для наблюдений менее 100 лет $k=(300:500)$. В работе под сигналом $f(t)$ понимается кривая изменений исследуемого гелиокосмического фактора климатической переменной. Эти кривые приведены на рис. 1.

На рис. 2, *a* в качестве примера представлено изображение временной вейвлетной фазо-частотной функции $\varphi_{f_1}(a, b)$ барицентрического движения Солнца $f_1(t)$, приведенной на рис. 1, *a* и его вейвлетные фазо-частотная $\varphi_{f_1}(a, \bar{b})$ и фазо-временная $\varphi_{f_1}(\bar{a}, b)$

характеристики. Изображение получено при использовании вейвлета 'cgaus5' с масштабом $a(1:1000)$. В работе все вейвлетные преобразования произведены с использованием вейвлета 'cgaus5'.

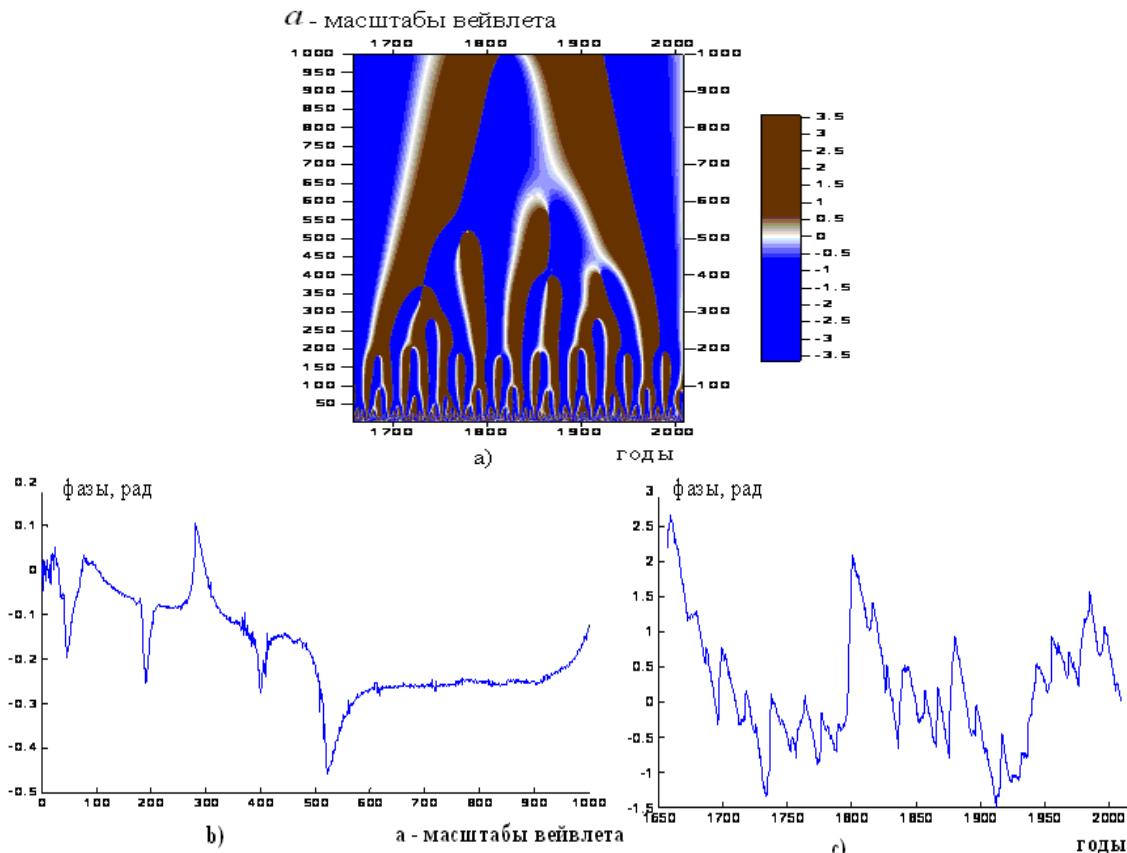


Рис. 2. *a*) изображение временной вейвлетной фазо-частотной функции $\varphi_{f_1}(a, b)$ изменения расстояния Солнца до барицентра $f_1(t)$, распределенной по масштабу a (ординате) в интервале $[1:1000]$ и времени b (абсциссе) в 1656,5–2009 гг.; *b*) фазо-частотная характеристика $\varphi_{f_1}(a, \bar{b})$; *c*) фазо-временная характеристика $\varphi_{f_1}(\bar{a}, b)$; фаза сигнала изменяется в интервале $\mp\pi$ радиан. В преобразованиях $\varphi_{f_1}(a, \bar{b})$ и $\varphi_{f_1}(\bar{a}, b)$ знаки \bar{a} и \bar{b} обозначают операции усреднений по a и b в преобразовании $\varphi_{f_1}(a, b)$

Fig. 2. *a*) image of the time wavelet phase-frequency function of the change in the distance of the Sun to the barycenter, distributed over the scale (ordinate) in the interval $[1:1000]$ and time (abscissa) in 1656,5–2009; *b*) phase-frequency response; *c*) phase-time characteristic; phase of the signal varies in the range $\mp\pi$ of radians. In the formulas $\varphi_{f_1}(a, \bar{b})$ and $\varphi_{f_1}(\bar{a}, b)$ signs \bar{a} and \bar{b} denote the averaging operations for a and b in the conversion $\varphi_{f_1}(a, b)$

Изображение функции $\varphi_{f_1}(a, b)$ на рис. 2, *a* характеризует ветвление «дерева» низкочастотных фаз сигнала на определенных масштабных уровнях a на высокочастотные составляющие; чередование положительных и отрицательных фаз сигнала формируют периодичность сигнала. Исследуемая функция $f_1(t)$ состоит из набора характерных для сигнала гармоник с разными частотами.

На графике фазо-частотной характеристики $\varphi_{f_1}(a, \bar{b})$ функции $f_1(t)$ отображается изменение фазы сигнала при изменении масштаба a вейвлета от меньшего к большему (от большей частоты сигнала к меньшей). На графике выделяются особые точки с острыми пиками, направленными вниз и вверх, кото-

рым соответствуют определенные вейвлетные масштабы a ; при этих значениях вейвлетных масштабов a происходят бифуркации частот сигнала, а иногда и утройение частоты, наблюдаемые на рис. 2, *a*. Наличие бифуркаций на вейвлетных фазо-частотных функциях $\varphi_{f_1}(a, b)$ сигналов $f_1(t)$ является признаком нелинейности процесса изменения исследуемой переменной, признаком нелинейности колебательной системы [26, 30]. Как известно, выходами таких систем могут быть квазипериодические, субгармонические и хаотические колебания. Из рис. 2, *b* следует, что бифуркации частот сигнала $f_1(t)$ происходили при значениях $a \approx 1000, 524, 401, 282, 191$ и 47 . Изменения функции $\varphi_{f_1}(a, \bar{b})$ между особыми точками также характери-

зуют особенности структуры функции $f_1(t)$, изменения ее частоты в зависимости от вейвлетного масштаба. Функция $\varphi_{f_1}(a, b)$ является отличительным, индивидуальным (уникальным) признаком сигнала $f_1(t)$, его «отпечатком пальца». График функции $\varphi_{f_1}(a, b)$ на рис. 2, с характеризует изменение усредненной по вейвлетным масштабам мгновенных фаз сигнала $f_1(t)$ в наблюдаемом интервале времени (фазо-временная характеристика). Заметим, что такие особенности изменений сигнала не могут быть получены при Фурье-анализе сигнала.

Фазо-временная характеристика преобразования $\varphi(a, b)$ вычисляется как $\varphi_f(a, b) = -\varphi_f(a, b)$, знак минус перед преобразованием необходим для согласования изменений фазо-временной характеристики $\varphi_f(a, b)$ с изменениями исходной функции $f(t)$. Можно утверждать, что функции $\varphi(a, b)$, $\varphi_f(a, b)$ и

$\varphi_f(a, b)$ являются основными отличительными признаками любых исследуемых функций $f(t)$ и они в работе используются для установления причинно-следственных связей между переменными, определяющими климат на Земле.

Применение вейвлетных фазо-частотных и фазо-временных характеристик для оценивания согласованности (коррелированности) изменений климатических переменных, полученных на станции «Восток» в Антарктиде

В продолжительных временных интервалах наблюдений нестационарные сигналы $f_i(t)$, $i=1, \dots, k$ могут подвергаться существенным изменениям как по частотному, так и по фазовому составам в результате действия разных факторов. В этой связи вейвлетные характеристики $\varphi_f(a, b)$ и $\varphi_f(a, b)$ могут быть использованы для оценивания коррелированности сравниваемых функций $f_i(t)$, $i=1, \dots, l$; l – число сравниваемых функций.

Таблица 1. Коэффициенты линейных корреляций между изменениями орбитально-климатической диаграммы (ОКД) $f_{OKD}(t)$ [31], изменениями температуры $f_{Temp}(t)$ и двуокиси углерода $f_{CO_2}(t)$ на планете в интервале времени от 800 тыс. лет в прошлом до современности [32]

Table 1. Linear correlation coefficients between changes in the orbital-climatic diagram (OKD) [31], changes in temperature and carbon dioxide on the planet in the time interval from 800 thousand years in the past to the present [32]

| условия terms | $\varphi_f(a, b)$ – фазо-частотные характеристики, $a=1:1500$ phase-frequency characteristics | | | $\varphi_f(a, b)$ – фазо-временные характеристики, $a=1:1500$ phase-time characteristics | | | Исходные временные функции $f(t)$ Initial time functions $f(t)$ | | |
|-----------------|--|---------------|---------------|---|---------------|---------------|--|---------------|---------------|
| факторы factors | $f_{OKD}(t)$ | $f_{Temp}(t)$ | $f_{CO_2}(t)$ | $f_{OKD}(t)$ | $f_{Temp}(t)$ | $f_{CO_2}(t)$ | $f_{OKD}(t)$ | $f_{Temp}(t)$ | $f_{CO_2}(t)$ |
| $f_{OKD}(t)$ | 1,00 | | | 1,00 | | | 1,00 | | |
| $f_{Temp}(t)$ | -0,58 | 1,00 | | 0,42 | 1,00 | | 0,46 | 1,00 | |
| $f_{CO_2}(t)$ | 0,67 | -0,07 | 1,00 | 0,05 | 0,46 | 1,00 | 0,29 | 0,85 | 1,00 |

Примечание. Коэффициенты корреляций $r > 0,065$ значимы с вероятностью 0,95 по критерию Стьюдента [33].

Note. Correlation coefficients $r > 0,065$ are significant with a probability of 0,95 according to Student's criterion [33].

Корреляции вычислены в вариантах с использованием вейвлетных преобразований $\varphi_f(a, b)$, $\varphi_f(a, b)$ и без них. Кривая изменений $f_{OKD}(t)$ является характеристикой изменений климата на Земле, инсоляцией, обусловленной изменениями элементов орбиты Земли (эксцентриситета, угла наклона и климатической прецессии со знаком «минус» в пропорции 1:0,7:0,55) [31]. Эффективный метод прогнозирования кривой ОКД(t) с использованием многомасштабных вейвлетов изложен в работе [34].

При корреляционном анализе изменчивостей переменных с использованием вейвлетных преобразований $\varphi_f(a, b)$ и $\varphi_f(a, b)$ необходимо учитывать следующие обстоятельства:

1) при использовании преобразования $\varphi_f(a, b)$ коэффициенты корреляций характеризуют меру присутствия фазо-частотной характеристики $\varphi_{f_1}(a, b)$ в $\varphi_f(a, b)$, меру причинной обусловленности переменных по аналогии с принципом причинности Грэндже-ра [35]. Модули коэффициентов корреляций являются мерами согласованности характеристик по частотам, а их знаки – согласованности по фазам; 2) при использо-

вании преобразования $\varphi_f(a, b)$ коэффициенты корреляций описывают меру присутствия фазо-временной характеристики $\varphi_{f_1}(a, b)$ в $\varphi_f(a, b)$, согласованность изменений переменных по фазам и времени. Эти коэффициенты корреляций отражают меру влияния на изменчивость переменной $f_i(t)$ других климатических факторов в наблюдаемом интервале времени. В табл. 1 и на рис. 3, а, б отражаются закономерности взаимосвязанных изменений переменных в продолжительном интервале времени в трех вариантах: фазо-частотной, фазо-временной и временной, в присутствии других воздействующих факторов. Как видно, между ними есть существенные отличия, характеризующие структуры пространств, в которых они изменяются. Например, изменения приземной температуры $f_{Temp}(t)$ и двуокиси углерода $f_{CO_2}(t)$ происходят не только под влиянием инсоляции $f_{OKD}(t)$, но и под воздействием температуры мирового океана $f_{19}(t)$, вулканических извержений $f_{11}(t)$ и многих других факторов. Из табл. 1 также видно, что вычисления корреляций между переменными только во временной области, знания только частотного состава переменных, недостаточно для установления взаимо-

влияний между переменными. Другим свойством функций $\varphi_f(a, b)$ и $\varphi_f(a, \bar{b})$ является то, что плотности распределений этих функций дают представление о числе основных факторов, влияющих на изменения функций $f_i(t)$ и их спектральных составах. На графиках *c*, *d* и *e* рис. 3 приведены кривые плотностей распределений вейвлетных

фазо-временных характеристик: $\varphi_{OKD}(a, b)$, $\varphi_{Temp}(a, b)$ и $\varphi_{CO_2}(a, b)$, которые состоят из смесей плотностей распределений нескольких существенных факторов [36], каждый из них формируется влияниями нескольких переменных, изменяющихся разными периодичностями.

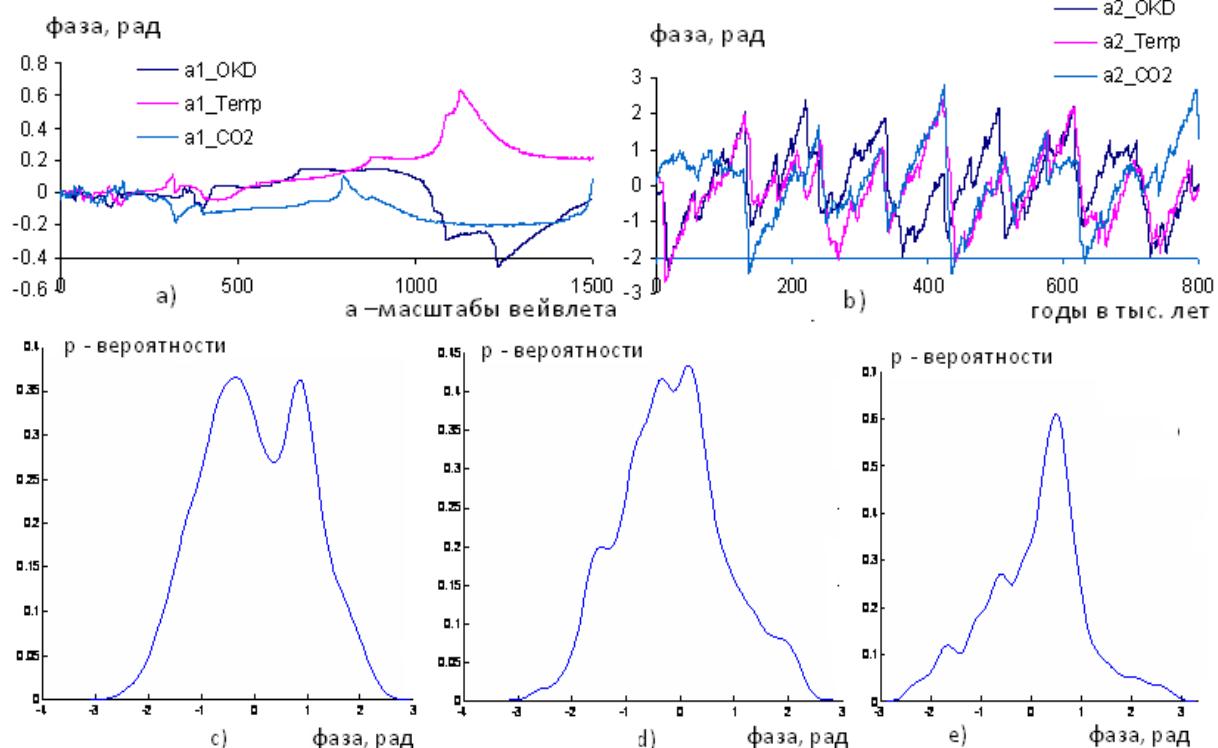


Рис. 3. а) фазо-частотные $\varphi_f(a, \bar{b})$, б) фазо-временные $\varphi_f(a, b)$ характеристики и плотности распределений вейвлетных фазо-временных характеристик орбитально-климатической диаграммы (ОКД) и климатических переменных по данным исследований кернов Антарктического льда в интервале времени 800 тыс. лет в прошлом [31]: в) ОКД(*t*), построенной в пропорции (1:0,7:0,55); д) приземной температуры Temp(*t*); е) двуокиси углерода CO₂(*t*) в Антарктиде. Фазы переменных изменяются в интервале $\mp\pi$ по абсциссе. Вейвлетные преобразования выполнены при масштабах вейвлета *a*(1:1500)

Fig. 3. a) phase-frequency, b) phase-time characteristics and densities of distributions of wavelet phase-time characteristics of the orbital-climatic diagram (OKD) and climate variables according to studies of Antarctic ice cores in the time interval of 800 thousand years in the past [31]: c) OKD (*t*), built in proportion (1:0,7:0,55); d) surface temperature; e) carbon dioxide in Antarctica. The phases of the variables vary in the interval $\mp\pi$ on the abscissa. Wavelet transforms performed at wavelet scale *a*(1:1500)

Вычисление частотного состава (периодичности) функций $y(t)=f(t)$

Изображение временной вейвлетной фазо-частотной функции исследуемой функции $\varphi_f(a, b)$, представленное на рис. 2, *a*, подчеркивает периодичность функции $f_i(t)$ при заданных масштабах *a* вейвлета, ее спектральный состав и подсказывает метод оценивания этой периодичности. Вычисление периодичности функции $\varphi_f(a, b)$ состоит из последовательности шагов:

а) для заданного значения масштаба *a* вычисляются значения функции $\varphi_{f_i}(a, b)$ на всем интервале изменений *b*; на рис. 4 приведен график функции $\varphi_{f_i}(a, b)$, вычисленный при *a*=150, временной параметр *b* изменяется в интервале 1656,5–2009 гг. с шагом $\Delta b=0,1$

год. Как видно из рисунка, график разреза функции циклический, почти периодический.

б) оцениваются временные координаты \hat{T}_i , $i=1:k$ максимумов или минимумов полученного графика функции $\varphi_{f_i}(a, b)$, где *k* – количество экстремумов функции;

в) вычисляется среднее значение $T_a=\text{mean}(T_i, i=1:k)$ периодичности функции $\varphi_{f_i}(a, b)$ для заданного значения *a* и его стандартное отклонение $\sigma_a=\text{std}(T_i, i=1:k)$ относительно среднего периода T_a , если $k \geq 3$.

Если график функции $\varphi_{f_i}(a, b)$ окажется зашумленным, то с целью более точного оценивания координат *T_i* экстремумов может быть использовано ее сглаживание с использованием стандартных процедур;

г) задавая значения характерного масштаба a от большего к меньшему вычисляется весь спектральный состав исследуемой функции $f(t)$ с оцениванием средних значений периодичностей \hat{T}_f и их стандартных отклонений σ_{T_f} .

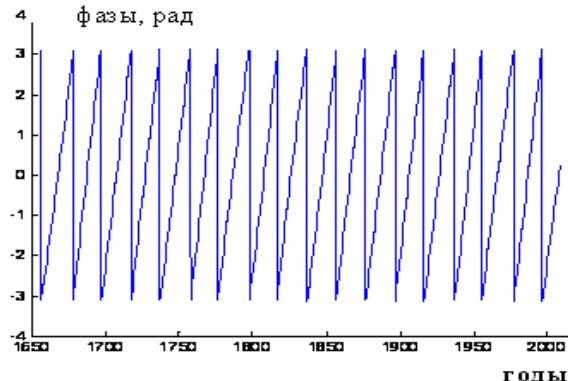


Рис. 4. График функции $\varphi_f(a, b)$ в радианах в интервале $\pm\pi$, вычисленный при $a=150$ в интервале времени 1656,5–2009 гг.

Fig. 4. Graphic of the function in radians in the interval $\pm\pi$ calculated for $a=150$ in 1656,5–2009

Таблица 2. Коэффициенты влияния гелиокосмических переменных, солнечной активности и вулканической деятельности Земли на изменения приземной температуры, климатические изменения, происходящие на поверхности океанов в 1955–2006 гг., вычисленные с вейвлетными преобразованиями $\varphi_{f_i}(a(1:700), b)$, $i=1, \dots, 24$

Table 2. Coefficients of the effect of solar-cosmic variables, solar activity and the Earth's volcanic activity on changes in surface temperature, climatic changes occurring on the surface of the oceans in 1955–2006, calculated with wavelet transformations $\varphi_{f_i}(a(1:700), b)$, $i=1, \dots, 24$

| f | f_1 | f_2 | f_5 | f_6 | f_{10} | f_{11} | f_{15} | f_{16} | f_{17} | f_{18} | f_{19} | f_{20} | f_{21} | f_{22} | f_{23} | f_{24} |
|----------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| f_1 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | |
| f_2 | 0,30 | 1 | | | | | | | | | | | | | | |
| f_5 | 0,94 | 0,30 | 1 | | | | | | | | | | | | | |
| f_6 | -0,73 | -0,75 | -0,74 | 1 | | | | | | | | | | | | |
| f_{10} | 0,64 | 0,26 | 0,79 | -0,60 | 1 | | | | | | | | | | | |
| f_{11} | 0,84 | 0,23 | 0,94 | -0,67 | 0,88 | 1 | | | | | | | | | | |
| f_{15} | 0,32 | 0,36 | 0,39 | -0,49 | 0,32 | 0,30 | 1 | | | | | | | | | |
| f_{16} | 0,78 | 0,15 | 0,90 | -0,65 | 0,86 | 0,94 | 0,34 | 1 | | | | | | | | |
| f_{17} | 0,44 | 0,54 | 0,42 | -0,59 | 0,33 | 0,33 | 0,32 | 0,34 | 1 | | | | | | | |
| f_{18} | 0,46 | 0,28 | 0,52 | -0,57 | 0,38 | 0,44 | 0,74 | 0,56 | 0,19 | 1 | | | | | | |
| f_{19} | -0,11 | 0,26 | -0,07 | -0,05 | -0,06 | -0,09 | 0,36 | -0,15 | -0,47 | 0,29 | 1 | | | | | |
| f_{20} | 0,19 | 0,30 | 0,17 | -0,30 | 0,07 | 0,07 | 0,56 | 0,09 | 0,21 | 0,35 | 0,40 | 1 | | | | |
| f_{21} | -0,05 | 0,03 | -0,08 | 0,06 | -0,13 | -0,15 | 0,30 | -0,14 | 0,03 | 0,03 | 0,29 | 0,84 | 1 | | | |
| f_{22} | 0,18 | 0,17 | 0,22 | -0,29 | 0,23 | 0,22 | 0,72 | 0,28 | -0,14 | 0,73 | 0,61 | 0,42 | 0,19 | 1 | | |
| f_{23} | -0,08 | -0,59 | -0,10 | 0,39 | -0,29 | -0,16 | 0,11 | -0,10 | -0,33 | 0,03 | 0,14 | 0,38 | 0,55 | 0,23 | 1 | |
| f_{24} | 0,64 | 0,80 | 0,60 | -0,88 | 0,36 | 0,49 | 0,47 | 0,46 | 0,62 | 0,55 | 0,01 | 0,21 | -0,15 | 0,27 | -0,51 | 1 |

Примечание: вычисленные коэффициенты корреляции по критерию Стьюдента значимы при $abs(r)>0,1$ с вероятностью $p=0,95$.

Note: the calculated correlation coefficients $abs(r)>0,1$ by the Student criterion are significant at probability $p=0,95$.

Как в наборе периодов циклических движений Солнца, так и в наборе частот вариаций солнечной активности присутствуют такие периоды в годах, как 4,85 (1,4), 10,65 (1,4), 12,95 (3,86), 22 (9,6), 44 (7,45), 66,9 (13,2), 112 (12) (в скобках указаны стандартные отклонения σ от средних). В частотных составах изменений расстояния центра масс Солнца от барицентра $f_1(t)$, отклонений угловой скорости вращения Земли от эталонной $f_7(t)$ в интервале времени с 1656 по

2008 гг. и в вариациях солнечной активности в интервале времени 1610–2010 гг., наблюдаются частоты с периодами ≈ 178 , ≈ 36 и $\approx 11,5$ лет. В асимметрии движения Солнца присутствуют гармоники с периодами 46,6 (3,4), 35,87 (2,3), 19,6 (2,1), 12,8 (4,6), соответствующие синодическим периодам Сатурна/Урана, Сатурна/Нептуна, Сатурна/Юпитера и Юпитера/Нептуна соответственно. Эти периоды являются целыми кратными 179-летнего цикла Жозе [37]. Эти и

Совместный корреляционный анализ гелиокосмических и климатических переменных по наблюдениям в 1955–2006 гг.

В табл. 2 наблюдается высокая согласованность изменений пар (f_1, f_5) , (f_1, f_{11}) , (f_5, f_{11}) , (f_6, f_{10}) , (f_1, f_{11}) , (f_6, f_{24}) , (f_{10}, f_{11}) , (f_{10}, f_{16}) , (f_{11}, f_{16}) и других пар, характеризующих высокую согласованность изменений гелиокосмических переменных f_1 , f_2 , солнечной активности f_5 , земных климатических переменных f_6 , f_7 , f_{10} , f_{11} – f_{14} , характеризующих тектонические процессы на Земле, переменных f_{15} – f_{23} , определяющих температурный режим на Земле, и переменную f_{24} , характеризующую электромагнитную связь между изменениями солнечных и земных переменных.

другие частоты, наблюдаемые в движениях Солнца, хорошо коррелируются с периодами солнечной активности. Такие выводы получены и в работах [38–46]. Известна согласованность периодических движений планет солнечной системы и их гравитационное взаимодействие [47].

Все движения Солнца отражаются на движении Земли и на ее глубинных процессах, в том числе и в виде случайных составляющих [30]. Эти процессы проявляются в виде циклических изменений скорости вращения Земли (строка и столбец f_6 в табл. 2) с высокими отрицательными коэффициентами корреляции. Отрицательный знак корреляции характеризует неоднородность строения Земли: любые изменения в угловом импульсе жидкой части земной системы, вызванные движением Солнца и его планет относительно Земли, должны быть скомпенсированы равным и противоположным по знаку изменением в угловом импульсе твердой Земли [48].

Таблица 2 является обобщенной характеристикой связей между нелинейными взаимосвязанными колебательными контурами Солнечно-Земной системы. В этой системе движения планет солнечной системы приводят к изменениям солнечной активности f_5 и вулканических извержений f_{11} , других тектонических движений на Земле. В свою очередь, вулканические извержения тесно согласуются с изменениями $\text{CO}_2 f_{16}$ и изменениями скорости вращения Земли f_6 и продолжительности земных суток $\text{LOD } f_{10}$.

Из табл. 2 коэффициентов корреляций изменений климатических факторов следует, что:

- солнечная энергия, получаемая Землей, перераспределяется в тепловую энергию воздуха суши, тепловую энергию воздуха на поверхности Мирового океана и тепловую энергию толщи воды океана. В этом процессе значительное место занимает вулканическая деятельность Земли, при которой из недр в атмосферу Земли выбрасывается огромная масса парниковых газов, в том числе углекислый газ CO_2 ;
- изменение приземной температуры (столбец f_{15}) в значительной мере согласовано с изменениями CO_2 в атмосфере f_{16} ($r=0,34$), Тихоокеанского декадного колебания (PDO) f_{18} , глобальной температуры воздуха над сушей f_{19} , теплосодержания океана в ее толще f_{21} , аномальной температуры океана в зоне от $60^\circ S$ до $60^\circ N f_{22}$, вариаций Южного колебания/Эль-Ниньо f_{23} с коэффициентами от 0,11 до 0,74. Источником тепловой энергии атмосферного воздуха (строка f_{15}) является солнечная активность f_5 с коэффициентом 0,39; на ее изменчивость влияют изменчивость длительности суток f_{10} и вулканическая деятельность Земли f_{11} , а также скорость вращения Земли f_6 ;
- температурная неоднородность океана и атмосферы Земли приводят к движениям водных и воздушных масс в огромных пространственных масштабах, устанавливаются самоорганизующиеся колебательные процессы Североатлантической, Тихоокеанской декадной и Южной/Эль-Ниньо ко-
- лебаний набором периодичностей. Эти периодичности согласованы с периодичностями асимметричных движений Солнца относительно его барицентра;
- вариации индекса Южных колебаний/Эль-Ниньо f_{23} синхронизированы с аномалиями роста температуры f_{22} поверхности океана в зоне от $60^\circ S$ до $60^\circ N$, теплосодержанием 700 метрового слоя океана f_{21} , глобальной температурой воздуха на поверхности океана f_{20} , глобальной температурой воздуха в районе суши f_{19} , изменениями скорости вращения Земли f_6 и изменениями приземной температуры f_{15} ; изменение переменной f_{23} находится в противофазе с изменениями длительности суток LOD f_{10} , извержений вулканов f_{11} , изменениями концентраций $\text{CO}_2 f_{16}$ и индекса Североатлантического колебания f_{17} ;
- аномалии роста теплосодержания океана f_{21} в толще воды 0–700 м синхронизированы ростом глобальной температуры приземной температуры f_{15} , аномалиями роста температуры воздуха на поверхности Мирового океана f_{20} и аномалиями роста температуры воздуха над сушей f_{19} ; находятся в противофазе с изменениями длительности суток f_{10} , вулканических извержений f_{11} и изменений CO_2 в атмосфере;
- в строке f_{24} табл. 2 отражены меры согласованности изменений числа магнитных бурь с изменениями солнечной активности f_5 , вулканической деятельности Земли f_{11} , концентрации в атмосфере углекислого газа f_{16} и колебательных процессов, происходящих в атмосфере Земли и в океане, факторов $f_{17}–f_{23}$. Интенсивность магнитных бурь тесно согласована с активностью Солнца, вулканическими извержениями на Земле, изменениями приземной температуры и CO_2 в атмосфере, индексов Североатлантического и Тихоокеанского декадных колебаний. Значительно согласованы изменения магнитных бурь с Южными колебаниями/Эль-Ниньо f_{23} и изменениями скорости вращения Земли f_6 с отрицательными знаками, $r=-0,51$ и $r=-0,88$ соответственно; знак коэффициентов корреляций между переменными зависит от продолжительности наблюдений и выбранного для анализа масштаба a вейвлета. В работе [14] отмечена коррелированность изменений Североатлантического и Тихоокеанского декадного колебаний с изменениями скорости вращения Земли и возможная связь этой зависимости с асимметриями в движении Солнца вокруг центра масс солнечной системы.
- Из табл. 2 коэффициентов линейных корреляций между вейвлетными фазо-частотными характеристиками $\varphi_{f_i}(a, b)$ сравниваемых факторов в одинаковых интервалах времени, определяющих климат на Земле, следует, что:
- вулканическая деятельность на Земле индуцируется асимметричным движением Солнца относительно барицентра, формируемого планетами Солнечной системы, при этом циклические про-

- цессы на Солнце активизируются приливными, гравитационными силами, формируемыми планетами-гигантами солнечной системы (Юпитером, Сатурном, Ураном, Нептуном);
- воздушные движения Солнца гравитационными силами передаются на процессы, происходящие в атмосфере Земли и в недрах неоднородной Земли, возбуждая в ней вулканические, геомагнитные и другие процессы. Вулканические, тектонические процессы на Земле активизируются также приливными силами Луны;
 - имеется высокая согласованность изменений концентрации CO_2 в атмосфере Земли с изменениями интенсивности вулканических извержений с коэффициентами $r=0,88-0,94$ в разных временных интервалах наблюдений.
- В природе все процессы происходят в циклическом режиме и согласованы с асимметричными периодическими движениями Солнца относительно бария, периодическими изменениями солнечной активности и вулканической деятельности Земли. Причем периоды изменений процессов, происходящих в природе, отличаются друг от друга. По этой причине представляют интерес сравнительное исследование изменений этих процессов в одних и тех же временных интервалах, позволяющих предсказать будущее этих изменений с заданной периодичностью (при заданных значениях масштаба a вейвлета) с использованием вейвлетных фазо-временных характеристик $\varphi_{f_i}(\alpha, b)$. Результаты этих и других исследований представлены во второй части работы.
- ### Выводы
- Разработан метод, позволяющий извлечь из временных рядов наблюдений $f(t)$ наиболее существенные характеристики, отличающие их от других временных рядов. Такими характеристиками любого сигнала являются: временная вейвлетная фазо-частотная функция $\varphi(a, b)$ и ее вейвлетные фазо-частотные $\varphi_f(a, b)$ и фазо-временные $\varphi_f(\alpha, b)$ характеристики, позволяющие идентифицировать климатические изменения на Земле.
 - Вейвлетные характеристики $\varphi_f(a, b)$ и $\varphi_f(\alpha, b)$ являются индивидуальными для каждой функции $f(t)$ и зависят от влияний других климатических факторов системы, изменяющихся во времени, выбранного для анализа масштаба a вейвлета.
 - Вычислением коэффициентов корреляций между характеристиками $\varphi_{f_i}(a, b)$ сравниваемых переменных $i=1, \dots, 24$, изменяющихся в 1955–2006 гг., установлено, что изменчивости солнечной активности f_5 , вулканических извержений f_{11} , скорости вращения Земли f_6 , продолжительности земных суток f_{10} сильно согласованы с изменениями расстояния Солнца относительно бария f_1 .
 - Изменение концентрации двуокиси углерода CO_2 f_{16} в атмосфере сильно согласовано с изменениями вулканических извержений f_{11} , обусловленными изменениями f_1 .
 - Изменения приземной температуры f_{15} согласованы с изменениями f_5, f_{16} и изменениями теплосодержания океана f_{21} , температуры океана в экваториальной зоне f_{22} , температуры воздуха на поверхности мирового океана f_{20} , температурных изменений Тихоокеанских колебаний f_{18} , изменений индекса Североатлантических колебаний f_{17} и Эль-Ниньо f_{23} .
 - Изменения магнитных бурь f_{24} согласованы с изменениями многих переменных f_1-f_{18} и f_{23} .
 - В матрице табл. 2 проявляются многоуровневые синхронизованные изменения гелиокосмических и климатических переменных $f_{12}-f_{24}$, обусловленные изменениями переменной f_1 – движением центра масс (ц.м.) Солнца относительно ц.м. солнечной системы в фазо-частотной области.
 - Временная вейвлетная функция $\varphi(a, b)$ и ее характеристики $\varphi_f(a, b)$, $\varphi_f(\alpha, b)$ весьма информативны и удобны для наглядного графического представления, сравнения исследуемых функций, анализа, интерпретации результатов исследований объектов произвольной природы; информативные преимущества вновь введенных функций используются для уточнения и развития роли изменений гелиокосмических переменных в изменениях природной среды во второй части работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Сигналы и последствия изменений климата сохраняются в 2018 году // Пресс-релиз Всемирной метеорологической организации. Номер документа 29112018. Дата публикации 29 ноября 2018 г. URL: <https://public.wmo.int/ru/media/пресс-релизы/сигналы> (дата обращения 20.05.2019).
- Глобальное потепление на 1,5 °C // Доклад межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК). Опубликован 8 октября 2018 г. URL: www.meteorf.ru/upload/iblock/f5e/Izmenenie_klimata_N75OctNo_v_2018.pdf (дата обращения 20.05.2019).
- Итоги конференции по изменению климата в Катовице СОП24. – Польша, 2018. Дата публикации 15.12.2018. URL: <http://ecounion.kz/?p=716> (дата обращения 20.05.2019).
- Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2018 год. – М., 2019. – 79 с. URL: <http://meteo.ru/events/102-raznoe/754-doklad-ob-osobennostyakh-klimata-na-territorii-rossijskoj-federatsii-za-2018-god> (дата обращения 20.05.2019).
- Доклад о климатических рисках на территории Российской Федерации // Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (РОСГИДРОМЕТ). Климатический центр. – СПб., 2017. – 106 с. URL: <http://cc.voeikovmgo.ru/images/dokumenty/2017/riski.pdf> (дата обращения 20.05.2019).
- Rosenzweig R. Global climate change policy and carbon markets. – London: Springer, 2016. – 322 p.
- Carbon markets for greenhouse gas emission reduction in a warming world an evaluation of the world bank group's support to carbon finance. International Bank for Reconstruction and Development / The World Bank. Washington, 2018. – 227 p.
- Shiferaw B., Store A. Building the next generation of carbon markets for climate change mitigation // Independent Evaluation Group (IEG). World Bank Group. 2019
- Wang S., Lee W., Son Y. Low carbon development pathways in Indian agriculture // Change Adaptation Socio-Ecological Systems. – 2017. – V. 3. – P. 18–26.

10. Gordon E., Lieberman B. Climate change in human history: prehistory to the present. – London: Bloomsbury Academic & Professional, 2018. – 244 p.
11. Современные глобальные изменения природной среды. В 2-х т. Т. 1 / под ред. Клиге Р.К., Лукьяновой С.А. – М.: Научный мир, 2006. – 696 с.
12. Современные глобальные изменения природной среды. В 2-х т. Т. 2 / под ред. Клиге Р.К., Лукьяновой С.А. – М.: Научный мир, 2006. – 776 с.
13. Современные глобальные изменения природной среды. Т. 3. Факторы глобальных изменений / под ред. Клиге Р.К., Хлыстова А.И. – М.: Научный мир, 2012. – 444 с.
14. Хлыстов А.И., Клиге Р.К., Сидоренков Н.С. Резонанс третьего рода в Солнечной системе // Современные глобальные изменения природной среды. Т. 3. Факторы глобальных изменений. – М.: Научный мир, 2012. – С.147–160.
15. Вильсон Ян Р.Г. Изменение во вращении Земли относительно барицентра и климатический эффект // Современные глобальные изменения природной среды. Т. 3. Факторы глобальных изменений. – М.: Научный мир, 2012. – С. 78–102.
16. Хлыстов А.И., Долганов В.П., Доможилова Л.М. Барицентрическое движение Солнца и его следствие для Солнечной системы // Современные глобальные изменения природной среды. Т. 3. Факторы глобальных изменений. – М.: Научный мир, 2012. – С. 62–77.
17. Сидоренков Н.С. Нестабильности вращения Земли и глобальные изменения природных процессов // Современные глобальные изменения природной среды. Т. 2. – М.: Научный мир, 2006. – С. 737–747.
18. Касимов Н.С., Клиге Р.К. Введение. Проблемы глобальных изменений // Современные глобальные изменения природной среды. Т. 3. Факторы глобальных изменений. – М.: Научный мир, 2012. – С. 19–34.
19. Милецкий Е.В., Наговицын Ю.А. Магнитные поля солнечных пятен в 21–22 циклах солнечной активности // Известия Государственной Астрономической Обсерватории. – 2000. – Т. 215. – С. 259–270.
20. Volkano eruptions of 2014 and all eruptions since 1600 to present // The Big Wobble. 18 June 2016. URL: <http://www.thebigwobble.org/2016/06/volcano-eruptions-of-2014-and-all.html1> (дата обращения 20.05.2019).
21. Хайн В.Е., Халилов Э.Н. Цикличность геодинамических процессов: ее возможная природа. – М.: Научный мир, 2009. – 520 с.
22. Рост природных катализмов за последнее столетие по данным Центра исследования развития катастроф (CRED). URL: <https://www.liveinternet.ru/users/famar/post367117884> (дата обращения 20.05.2019).
23. Гладильщикова А.А., Семенов С.М. Межправительственная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК): цикл шестого оценочного доклада // Фундаментальная и прикладная климатология. – 2017. – Т. 2. – С. 13–25.
24. Hurrell J. National Center for Atmospheric Research (NCAR). 2007. URL: <http://www.cgd.ucar.edu/cas/jhurrel/Data/naodjfmindex.asc> (дата обращения: 20.05.2019).
25. Алексеев В.И. Вейвлетный фазо-частотный анализ климатических переменных по данным глубокого бурения ледниковых скважин в Антарктиде // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. – 2013. – Т. 4. – № 2. – С. 9–26.
26. Алексеев В.И. Вейвлет-анализ динамики изменений явления Эль-Ниньо и его прогнозирование // Вестник Югорского государственного университета. – 2018. – Т. 3 (50). – С. 75–87.
27. Блаттер К. Вейвлет-анализ. Основы теории. – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2004. – 280 с.
28. Дьяконов В.П. Вейвлеты. От теории к практике. – М.: СОЛОН-Пресс, 2004. – 400 с.
29. Малла С. Вейвлеты в обработке сигналов / Пер. с англ. – М: Мир, 2005. – 671 с.
30. Moon F.C. Chaotic vibration. An introduction for applied scientists and engineers. – Ithaca, New York: Theoretical and Applied Mechanics Cornell University, 1990. – 309 р.
31. Большаков В.А. Новая концепция орбитальной теории палеоклимата. – М.: МГУ, 2003. – 256 с.
32. Кремер Н.Ш. Математическая статистика. – М.: ЮРАЙТ, 2018. – 259 с.
33. Алексеев В.И. Прогнозирование динамики изменений орбитально-климатической диаграммы на основе методов вейвлет-анализа и нечетких нейронных сетей // Вестник Югорского государственного университета. – 2018. – Т. 1 (48). – С. 13–21.
34. Weaver C.G. Fundamental causation: physics, metaphysics, and the deep structure of the world. – London: Routledge, 2018. – 368 р.
35. Хименко В.И. Случайные данные: структура и анализ. – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2017. – 424 с.
36. Бялко А.В. Палеоклимат: дополнения к теории Миланковича // Природа. – 2009. № 12. – С. 18–28.
37. Jose P.D. Sun's motion and sunspots // The Astronomical Journal. – 1965. – V. 70. – № 3. – P. 193–200.
38. Shirley J.H., Sperber K.R., Fairbridge R.W. Sun's interval and Luminosity // Solar Physics. – 1990. – V. 127. – № 2. – P. 379–392.
39. Darwin G.H. On the precession of a viscous spheroid and on the remote history of the Earth // Proc. of the Royal Society of London. – 1879. – V. 170. – P. 447–530.
40. Darwin G.H. On the secular changes in the elements of the orbit of a satellite revolving about a tidally distorted planet // Proc. of the Royal Society of London. – 1880. – V. 171. – P. 713–891.
41. Sidorenkov N.S. The interaction between Earth's rotation and geophysical processes. – Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH and Co. KGaA, 2009. – 317 p.
42. Khlystov A., Dolgachov V.P., Domozhilova L.M. Barycentric movement of the Sun and Solar-Terrestrial relations // Biophysics. – 1992. – V. 37. – № 3. – P. 455–460.
43. Charvatova I. On the relation between solar motion and the solar activity in the years 1730–80 and 1910–60 a.d. // Bulletin Astronomic Institute Czech Republic. – 1990. – V. 41. – № 3. – P. 200–204.
44. Прокудина В.С. Приложение метода планетных конфигураций к активным явлениям на Солнце // Сообщение Государственного Астрономического Института им. П.К. Штенберга. – 1973. – № 181. – С. 11–29.
45. Fairbridge R.W., Shirley J.H. Prolonged minima and the 179-yr cycle of the solar inertial motion // Solar Physics. – 1987. – V. 110. – № 1. – P. 191–220.
46. Wood R.M., Wood K.D. Solar motion and sunspot comparison // Nature. – 1965. – V. 208. – № 5006. – P. 129–131.
47. The 90day oscillation of Jupiter's Great Red Spot revisited / J.M. Trigo-Rodrigues, A. Sanchez-Lavega, J.M. Gomez, J. Lecacheux, F. Colas, I. Miyazaki // 31st Annual Meeting of the DPS. Kursaal Centr. Poster, 1999.
48. Dickey J.O. Earth rotation // Global Earth Physics: a handbook of physical constants American Geophysical Union / Ed. by T.J. Ahrens. – Washington: American Geophysical Union, 1995. – P. 356–368.

Поступила 16.06.2020 г.

Информация об авторах

Алексеев В.И., доктор технических наук, профессор Института цифровой экономики Югорского государственного университета.

UDC 517.9; 004; 551.58

STUDYING CHANGES IN GLOBAL CLIMATE AS A COMPLEX SYSTEM USING WAVELET PHASE-FREQUENCY FUNCTIONS, PHASE-FREQUENCY AND PHASE-TEMPORAL CHARACTERISTICS OF HELOCOSMIC AND CLIMATIC VARIABLES. PART 1

Valery I. Alekseev,
v_alekseev@ugrasu.ru

Yugra State University,
16, Chekhov street, Khanty-Mansiysk, 628012, Russia.

The relevance of the research is caused by the need to establish the true causes and patterns of global climate change on Earth. **The aim** of the research is to develop and propose an effective method for extracting information on the variability of variables contained in the initial data of changes in heliocentric and climate variables specified in the form of time series and apply this method to substantiate climatic changes on Earth.

Objects: time series of changes in heliocentric and climate variables.

Methods: continuous direct wavelet transform of source data using a complex wavelet with the calculation of their time wavelet phase-frequency functions, phase-frequency and phase-time characteristics; evaluation of the frequency spectrum of functions on the phase-time characteristics of variables; assessment and analysis of density distribution of phase-frequency and phase-time characteristics; evaluation and analysis of correlation coefficients between the phase-frequency and phase-time characteristics of variables in equal time intervals.

Results. The author has obtained the wavelet time phase-frequency functions and their images, which allow visualizing and estimating the periodicity spectra of the studied variables. Estimates are obtained for the wavelet phase-frequency and phase-time characteristics of the variables, which make it possible to carry out the full range of comparative studies of the variables and to establish the patterns of their changes. These studies include: estimating the densities of distributions of these characteristics, which allow identifying the factors influencing these changes; calculation of correlation matrices between wavelet phase-frequency and phase-time characteristics of variables in specified equal time intervals, which allows assessing the degree of consistency of changes in variables in the phase-frequency domain and in the area of phase-time changes. A close relationship was established between the oscillatory processes of heliocentric variables, solar activity and volcanic processes on Earth, and changes in carbon dioxide concentration in the atmosphere. It is shown that the movement of the Sun relative to the barycenter, caused by the movement of the giant planets of the Solar System, controls solar activity, tectonic processes on the Earth, including volcanic eruptions, the climate on the Earth.

Key words:

Global climate change, continuous direct wavelet transform, wavelet time phase-frequency function, wavelet phase-frequency and phase time characteristics, correlation coefficients.

REFERENCES

1. Signals and consequences of climate change persist in 2018. *Press release of the World Meteorological Organization*. Document number 29112018. Date of publication November 29, 2018. Available at: <https://public.wmo.int/en/media/press-releases/> signals (accessed 20 May 2019).
2. *Globalnoe poteplenie na 1,5 °C. Doklad mezhpravitelstvennoy gruppy ekspertov po izmeneniyu klimata* [Global warming by 1.5. Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)]. Available at: <https://pop-science.ru/doklad-mgeik-2018-goda> (accessed 20 May 2019).
3. *Itogi konferentsii po izmeneniyu klimata v Katowice SOP24* [Results of the conference on climate change in Katowice SOP24]. Poland, 2018. Publication date 12/15/2018. Available at: <http://ecounion.kz/?p=716> (accessed 20 May 2019).
4. *Doklad ob obobennostyakh klimata na territorii Rossiyskoy Federatsii za 2018 god* [Report on climate features in the Russian Federation for 2018]. Moscow, 2019. 79 p. Available at: <http://meteo.ru/events/102-raznoe/754-doklad-ob-osobennostyakh-klimata-na-territorii-rossiyskoy-federatsii-za-2018-god> (accessed 20 May 2019).
5. *Doklad o klimaticheskikh riskakh na territorii Rossiyskoy Federatsii* [Report on climate risks in the Russian Federation]. Federalnaya sluzhba po gidrometeorologii i monitoring okruzhayushchey sredy [Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring (ROSHYDROMET). Climatic center]. St. Petersburg, 2017. 106 p. Available at: <http://cc.voeikovmgo.ru/images/dokumenty/2017/riski.pdf> (accessed 20 May 2019).
6. Rosenzweig R. *Global climate change policy and carbon markets*. London, Springer, 2016. 322 p.
7. *Carbon markets for greenhouse gas emission reduction in a warming world an evaluation of the world bank group's support to car-*
- bon finance. International Bank for Reconstruction and Development. Washington, 2018. 227 p.
8. Wang S., Lee W., Son Y. Low carbon development pathways in Indian agriculture. *Change Adaptation Socio-Ecological Systems*, 2017, vol. 3. pp. 18–26.
9. Gordon E., Lieberman B. *Climate change in human history: pre-history to the present*. London, Bloomsbury Academic & Professional, 2018. 244 p.
10. *Sovremennye globalnye izmeneniya prirodnoy sredy* [Modern global changes in the environment]. Eds. R.K. Klige., S.A. Lukyanova. Moscow, Nauchny mir Publ., 2006. Vol. 1, 696 p.
11. *Sovremennye globalnye izmeneniya prirodnoy sredy* [Modern global changes in the environment]. Eds. R.K. Klige S.A., Lukyanova. Moscow, Nauchny mir Publ., 2006. Vol. 2, 776 p.
12. *Sovremennye globalnye izmeneniya prirodnoy sredy* [Modern global changes in the environment]. T. 3. Faktory globalnykh izmeneni [Factors of global change] Eds. R.K. Klige, A.I. Khlystova. Moscow, Nauchny mir Publ., 2012. 444 p.
13. Khlystov A.I., Klige R.K., Sidorenkov N.S. Rezonans tretego roda v Solnechnoy sisteme [Resonance of the third kind in the solar system]. *Sovremennye globalnye izmeneniya prirodnoy sredy* [Modern global changes in the natural environment]. T. 3. Faktory globalnykh izmeneni [Factors of global change]. Moscow, Nauchny mir Publ., 2012. pp. 147–160.
14. Wilson Jan R.G. Izmenenie vo vrashchenii Zemli otносительно baritsentra i klimaticheskiy effekt [Change in the Earth's rotation relative to the barycenter and the climatic effect]. *Sovremennye globalnye izmeneniya prirodnoy sredy* [Modern global changes in the natural environment]. T. 3. Faktory globalnykh izmeneni [Factors of global change]. Moscow, Nauchny mir Publ., 2012. pp. 78–102.
15. Khlystov A.I., Dolganov V.P., Domozhilova L.M. Baritsentricheskoe dvizhenie Solntsa i ego sledstviya dlya Solnechnor sistemy [The barycentric movement of the sun and its consequences for the

- solar system]. *Sovremennye globalnye izmeneniya prirodnoy sredy* [Modern global changes in the natural environment]. T. 3. Faktory globalnykh izmeneni [Factors of global change]. Moscow, Nauchny mir Publ., 2012. pp. 62–77.
16. Khlystov A.I., Somov B.V. Nelineyny metod prognoza 24-go solnechnogo tsikla [Nonlinear method for predicting the 24th solar cycle]. *Sovremennye globalnye izmeneniya prirodnoy sredy* [Modern global changes in the natural environment]. T. 3. Faktory globalnykh izmeneni [Factors of global change]. Moscow, Nauchny mir Publ., 2012. pp. 137–146.
17. Sidorenkov N.S. Nestabilnosti vrashcheniya Zemli i globalnye izmeneniya prirodnykh protsessov [Earth rotation instabilities and global changes in natural processes]. *Sovremennye globalnye izmeneniya prirodnoy sredy* [Modern global changes in the natural environment]. Moscow, Nauchny mir Publ., 2006. Vol. 2, pp. 737–747.
18. Kasimov N.S., Klige R.K. Vvedenie. Problemy globalnykh izmeneniy [Introduction. Problems of global changes]. *Sovremennye globalnye izmeneniya prirodnoy sredy* [Modern global changes in the natural environment]. T. 3. Faktory globalnykh izmeneniy [Factors of global change]. Moscow, Nauchny mir Publ., 2012. pp. 19–34.
19. Miletsky E.V., Nagovitsyn Yu.A. Magnetic fields of sunspots in 21–22 cycles of solar activity. *Bulletin of the State Astronomical Observatory*, 2000, vol. 215, pp. 259–270. In Rus.
20. Volkano eruptions of 2014 and all eruptions since 1600 to present. *The Big Wobble*. June 18, 2016. Available at: <http://www.thebigwobble.org/2016/06/volcano-eruptions-of-2014-and-all.html1> (accessed 20 May 2019).
21. Khain V.E., Khalilov E.N. *Tsiklichnost geodinamicheskikh protsessov: ee vozmozhnaya priroda* [Cyclicity of geodynamic processes: its possible nature]. Moscow, Nauchny mir Publ., 2009. 520 p.
22. *The growth of natural disasters over the past century according to the Center for Disaster Development Research (CRED)*. Available at: <https://www.liveinternet.ru/users/famar/post367117884>. (accessed 20 May 2019).
23. Gladilshchikova A.A., Semenov S.M. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): sixth assessment report cycle. *Fundamental and Applied Climatology*, 2017, vol. 2, pp. 13–25. In Rus.
24. Hurrell J. *National Center for Atmospheric Research (NCAR)*. 2007. Available at: <http://www.cgd.ucar.edu/cas/jhurrel/Data/naodjfmindex.asc> (accessed 20 May 2019).
25. Alekseev V.I. Weyvletny phazo-chastotny analiz klimaticheskikh peremennnykh po dannym glybokogo burenia lednikovykh skazhiv v Antarktide [Wavelet phase-frequency analysis of climatic variables according to deep drilling of ice wells in Antarctica]. *Dinamika okpuzhayushey sredy i globalnye izmenenia klimata*, 2013, vol. 4, no. 2, pp. 9–26.
26. Alekseev V.I. Weyvletny analiz dinamiki izmeneniy yavleniya El-Nino i ego prognozirovaniye [Wavelet analysis of the dynamics of changes in the El Nino phenomenon and its forecasting]. *Vestnik Yugorskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2018, vol. 3 (50), pp. 75–87.
27. Blatter K. *Veyvlet-analiz. Osnovy teorii* [Wavelet Analysis. Fundamentals of the theory]. Moscow, TEKHNOSFERA Publ., 2004. 280 p.
28. Dyakonov V.P. *Veyvlety. Ot teorii k praktike* [Wavelets. From theory to practice]. Moscow, SOLON-Press, 2004. 400 p.
29. Malla S. *Veyvlety v obrabotke signalov* [Wavelets in signal processing]. Translated from English. Moscow, Mir Publ., 2005. 671 p.
30. Moon F.C. *Chaotic vibration. An introduction for applied scientists and engineers*. Ithaca, New York, Theoretical and Applied Mechanics Cornel University, 1990. 312 p.
31. Bolshakov V.A. *Novaya kontsepsiya orbitalnoy teorii paleoklimata* [A new concept of the orbital theory of paleoclimate]. Moscow, MGU Publ., 2003. 256 p.
32. Kremer N.Sh. *Matematicheskaya statistika* [Mathematical statistics]. Moscow, Yurayt Publ., 2018. 259 p.
33. Alekseev V.I. Prognozirovaniye dinamiki izmeneniy orbitalno-klimaticheskoy diagrammy na osnove metodov weyvlet-analiza i nechetkikh neyronnykh setey [Predicting the dynamics of changes in the orbital-climatic diagram based on the methods of wavelet analysis and fuzzy neural networks]. *Vestnik Yugorskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2018, vol. 1 (48), pp. 1–21.
34. Weaver C.G. *Fundamental causation: physics, metaphysics, and the deep structure of the world*. London, Routledge, 2018. 368 p.
35. Khimenko V.I. *Sluchayne dannye: struktura i analiz* [Random data: structure and analysis]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2017. 424 p.
36. Byalko A.V. Paleoclimate: additions to the theory of Milankovitch. *Nature*, 2009, no. 12, pp. 18–28. In Rus.
37. Jose P.D. Sun's motion and sunspots. *The Astronomical Journal*, 1965, vol. 70, no. 3, pp. 193–200.
38. Shirley J.H., Sperber K.R., Fairbridge R.W. Sun's interval and Luminosity. *Solar Physics*, 1990, vol. 127, no. 2, pp. 379–392.
39. Darwin G.H. On the precession of a viscous spheroid and on the remote history of the Earth. *Proc. of the Royal Society of London*, 1879, vol. 170, pp. 447–530.
40. Darwin G.H. On the secular changes in the elements of the orbit of a satellite revolving about a tidally distorted planet. *Proc. of the Royal Society of London*, 1880, vol. 171, pp. 713–891.
41. Sidorenkov N.S. *The interaction between Earth's rotation and geophysical processes*. Weinheim, WILEY-VCH Verlag GmbH and Co. KGaA, 2009. 317 p.
42. Khlystov A., Dolgachov V.P., Domozhilova L., M. Barycentric movement of the Sun and Solar-Terrestrial relations. *Biophysics*, 1992, vol. 37, no. 3, pp. 455–460.
43. Charvatova I. On the relation between solar motion and the solar activity in the years 1730–80 and 1910–60 a.d. *Bulletin Astronomic Institute Czech Republic*, 1990, vol. 41, no. 3, pp. 200–204.
44. Prokudina V.S. Application of the method of planetary configurations to active phenomena on the Sun. *Communication of the State Astronomical Institute named after P.K. Stenberg*, 1973, no. 181, pp. 11–29. In Rus.
45. Fairbridge R.W., Shirley J.H. Prolonged minima and the 179-yr cycle of the solar inertial motion. *Solar Physics*, 1987, vol. 110, no. 1, pp. 191–220.
46. Wood R.M., Wood K.D. Solar motion and sunspot comparison. *Nature*, 1965, vol. 208, no. 5006, pp. 129–131.
47. Trigo-Rodrigues J.M., Sanchez-Lavega A., Gomez J.M., Lecacheux J., Colas F., Miyazaki I. The 90day oscillation of Jupiter's Great Red Spot revisited. *Journal Planetary and Space Science*, 2000, vol. 48, Iss. 4, pp. 331–339.
48. Dickey J.O. Earth rotation. *Global Earth Physics: a handbook of physical constants* American Geophysical Union. Ed. by T.J. Ahrens. Washington, American Geophysical Union, 1995. pp. 356–368.

Received: 16 June 2020.

Information about the authors

Alekseev V.I., Dr. Sc., professor, Yugra State University.

**Компьютерная верстка О.Ю. Аршинова
Корректура и перевод на английский язык С.В. Жаркова
Дизайн обложки Т.В. Буланова**

Фотографии на обложке взяты из личного архива
Валерия Касаткина

Руководство для авторов и образец оформления статьи: izvestiya.tpu.ru

Подписано к печати 29.08.2020. Формат 60x84/8. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл. печ. л. 29,31. Уч.-изд. л. 26,51.
Заказ 95-20. Тираж 500 экз.



Издательство

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ