



**ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

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

**ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ**

Том 335, № 10, 2024

Издательство
Томского политехнического университета
2024

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

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

Подписной индекс в объединённом каталоге «Пресса России» – 18054

© ФГАОУ ВО НИ ТПУ, 2024

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

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

Учредителем является Томский политехнический университет.

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

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

«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 335, № 10, 2024

EDITORIAL BOARD

Semiletov I.P., editor in chief, 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)
Belozarov 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)
Zavorin A.S., Dr. Sc. (Russia)
Hanjalic K., Dsc (Netherlands)
Markovich D.M., Dr. Sc. (Russia)
Aleksenko S.V., Dr. Sc. (Russia)
Voropai N.I., Dr. Sc. (Russia)
Kochegurov A.I., Cand. Sc. (Russia)
Rui D., PhD (Portugal)
Ziatdinov R.A., Cand. Sc. (South Korea)
Muravyov S.V., Dr. Sc. (Russia)
Spitsyn V.G., Dr. Sc. (Russia)
Poilov V.Z., Dr. Sc. (Russia)
Lotov V.A., Dr. Sc. (Russia)
Sofronov V.L., Dr. Sc. (Russia)
Bouznik V.M., Dr. Sc. (Russia)
Zakharov Yu.A., Dr. Sc. (Russia)
Antipenko V.R., Dr. Sc. (Russia)
Golik V.I., Dr. Sc. (Russia)
Abutalipova E.M., Dr. Sc. (Russia)
Polishchuk V.I., Dr. Sc. (Russia)
Khamitov R.N., Dr. Sc. (Russia)
Zyuzev A.M., Dr. Sc. (Russia)
Tretiak A.Ya., Dr. Sc. (Russia)
Arbuzov S.I., Dr. Sc. (Russia)
Kovalev V.Z., Dr. Sc. (Russia)
Romanenko S.V., Dr. Sc. (Russia)
Kiryanova L.G., Cand. Sc. (Russia)
Strokova L.A., Dr. Sc. (Russia)
Mazurov A.K., Dr. Sc. (Russia)
Mostovshchikov A.V., Dr. Sc. (Russia)
Khakimyanov M.I., Dr. Sc. (Russia)
Boyarko G.Yu., Dr. Sc., Cand. Sc. (Russia)
Strizhak P.A., Dr. Sc. (Russia)
Min R.S., Dr. 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 Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Media (Roskomnadzor)).

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
Решение задачи с малым параметром при фильтрации суспензии в пористой среде Архипова Е.Н., Гильманов А.Я., Шевелёв А.П.	7 Solution of the problem with a small parameter in suspension filtration in a porous medium Arkhipova E.N., Gilmanov A.Ya., Shevelev A.P.
Complex assessment of ambient particulate matter in a small settlement with coal-handling port Kholodov A.S., Kirichenko K.Yu., Vakhniuk I.A., Duan Piaopiao, Golokhvast K.S.	19 Комплексная оценка содержания твердых частиц в атмосферном воздухе поселка, в порту которого ведется перевалка угля Холодов А.С., Кириченко К.Ю., Вахнюк И.А., Дуань Пяопяо, Голохваст К.С.
Влияние изменения нагрузки котельного агрегата на топочные процессы Гиль А.В., Мальцев К.И., Абрамов Н.В., Заворин А.С., Старченко А.В.	32 Impact of boiler unit load changes on furnace processes Gil A.V., Maltsev K.I., Abramov N.V., Zavorin A.S., Starchenko A.V.
Magnetic properties of lake Kandrykul sediments (Republic of Bashkortostan, Russian Federation) Kuzina D.M., Yusupova A.R., Nurgalieva N.G., Nurgaliev D.K., Krylov P.S., Mulikova D.I.	43 Магнитные свойства донных отложений озера Кандрыкуль (Республика Башкортостан, Россия) Кузина Д.М., Юсупова А.Р., Нурғалиева Н.Г., Нурғалиев Д.К., Крылов П.С., Муликова Д.И.
Амазарканское золоторудное месторождение: условия формирования, источники рудного вещества (Восточное Забайкалье) Абрамов Б.Н., Калинин Ю.А., Боровиков А.А., Посохов В.Ф., Реутский В.Н.	56 Amazarkan gold deposit: conditions of formation, sources of ore substance (Eastern Transbaikalia) Abramov B.N., Kalinin Yu.A., Borovikov A.A., Posokhov V.F., Reutsky V.N.
Изотопный состав природных вод Кузбасса на площадях добычи угольного метана Лепокурова О.Е., Домрочева Е.В.	71 Isotopic composition of natural waters of Kuzbass in coalbed methane production areas Lepokurova O.E., Domrocheva E.V.
Теплотехника и химическая кинетика процесса торрефикации древесных пеллет Валинеева А.А., Попов С.К.	87 Thermal engineering and chemical kinetics of wood pellets torrefication Valineeva A.A., Popov S.K.
Численное моделирование напряженно- деформированного состояния вблизи нагнетательной скважины на пунктах глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов Попов С.Н., Кокорев О.Н., Заведий Т.Ю., Маневич А.И.	101 Numerical simulation of the stress-strain state near the injection well at deep disposal facilities for liquid radioactive waste Popov S.N., Kokorev O.N., Zavedy T.Y., Manevich A.I.
Устройство для предотвращения формирования жидкостных пробок в системе сбора газа или в непрямолинейной газовой скважине Муктасипов Д.Р., Сафиуллина Е.У.	111 Device for preventing the formation of liquid plugs in a gas collection system or in a non-straight gas well Muktasipov D.R., Safiullina E.U.
Методы определения рассеянного солнечного излучения с целью повышения точности прогнозирования почасовой выработки электроэнергии солнечными электростанциями Митрофанов С.В.	120 Methods for determining scattered solar radiation in order to increase the accuracy of forecasting hourly electricity generation by solar power plants Mitrofanov S.V.
Комплексирование геоэлектрических методов и дистанционного зондирования Земли при оценке состояния окружающей среды в зоне влияния экологически опасных объектов Гусев А.П.	134 Integration of geoelectric methods and remote sensing in assessing the environment state in the area of impact of ecologically hazardous objects Gusev A.P.
Прогресс в исследованиях ингибиторов набухания глин: аналитический обзор Ал-обаиди С.С., Эван Даси, Харламов С.Н.	146 Progress on clay swelling inhibitors: a comprehensive review Al-obaidi S.S., Evan D., Kharlamov S.N.
Негативное воздействие вибрации на технологические трубопроводы компрессорной станции с электроприводными газоперекачивающими агрегатами Шредер А.С., Курасов О.А., Бурков П.В., Гаврилин А.Н., Ермаков Д.В.	167 Negative impact of vibration on process pipelines of a compressor station with electrically driven gas pumping units Schreder A.S., Kurasov O.A., Burkov P.V., Gavrilin A.N., Ermakov D.V.

- | | |
|--|---|
| <p>Блоковый способ отработки карьерных полей как инструмент снижения воздействия на окружающую среду в условиях интенсификации производства
 Селюков А.В., Герасимов А.В.</p> <p>Определение геохимической устойчивости болотных экосистем таежной зоны Западной Сибири к антропогенному влиянию
 Савичев О.Г., Пасечник Е.Ю.</p> <p>Уран в подземных водах Северного Казахстана
 Медешова Н.А., Новиков Д.А., Ауелхан Е.С., Антоненко А.А., Максимова А.А., Деркачев А.С., Дульцев Ф.Ф., Орынбек А.М., Минискул Ш.Д., Черных А.В., Хващевская А.А.</p> <p>Полиароматические углеводороды малых водоемов Томского района
 Чуйкина Д.И., Король И.С., Мухортина Н.А., Колубаева Ю.В.</p> <p>Экспериментальное сравнение систем закрытого охлаждения фотоэлектрических модулей
 Сорогин А.С., Хамитов Р.Н., Жеребцов С.Н.</p> <p>Выявление условий ультразвукового воздействия на газодисперсную среду и создание излучателей для повышения эффективности коагуляции в устройствах с закрученными потоками
 Хмелев В.Н., Нестеров В.А., Шалунов А.В., Терентьев С.А.</p> <p>Вероятностная модель надежности погружных электродвигателей скважинных насосных агрегатов при добыче урана методом скважинного подземного выщелачивания
 Ефремов А.А., Кадыров К.К., Носков М.Д., Филипас А.А., Шchipkov А.А.</p> | <p>178 Block method of mining quarry fields as a tool to reduce environmental impact in conditions of intensification of production
 Selyukov A.V., Gerasimov A.V.</p> <p>189 Determination of geochemical stability of swamp ecosystems of the taiga zone of Western Siberia to anthropogenic impact
 Savichev O.G., Pasechnik E.Yu.</p> <p>203 Uranium in groundwaters of North Kazakhstan
 Medeshova N.A., Novikov D.A., Auelkhan E.S., Antonenko, A.A., Maksimova A.A., Derkachev A.S., Dultsev F.F., Orynbek A.M., Miniskul Sh.D., Chernykh A.V., Khvachshevskaya A.A.</p> <p>216 Polyaromatic hydrocarbons of small reservoirs of the Tomsk region
 Chuikina D.I., Korol I.S., Mukhortina N.A., Kolubaeva Yu.V.</p> <p>226 Experimental comparison of closed cooling systems of photovoltaic modules
 Sorogin A.S., Khamitov R.N., Zherebtsov S.N.</p> <p>238 Identification of conditions for ultrasonic effect on gas-dispersed medium and creation of radiators to increase the efficiency of coagulation in devices with swirling flow
 Khmelev V.N., Nesterov V.A., Shalunov A.V., Terentyev S.A.</p> <p>253 Probabilistic reliability model of electrical motors in submersible well pumping units used in the uranium mining by in-situ leaching
 Efremov A.A., Kadyrov K.K., Noskov M.D., Filipas A.A., Shchipkov A.A.</p> |
|--|---|

УДК 532.546.2

DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4421

Шифр специальности ВАК: 1.1.9; 2.8.4

Решение задачи с малым параметром при фильтрации суспензии в пористой среде

Е.Н. Архипова[✉], А.Я. Гильманов, А.П. Шевелёв

Тюменский государственный университет, Россия, г. Тюмень

[✉]stud0000222738@study.utmn.ru

Аннотация. *Актуальность* обусловлена необходимостью расчёта изменения фильтрационно-емкостных свойств в ходе закачки суспензий для последующего прогнозирования технологических параметров работы скважин. Такой расчёт осложняется наличием разномасштабных эффектов, поскольку глубина проникновения дисперсных частиц на порядки меньше характерных размеров пласта. Эти эффекты ранее не были детально исследованы. *Цель:* с помощью математической модели фильтрации суспензии в пористой среде проанализировать влияние малого параметра на поведение характеристик потока. *Объекты:* коэффициент коьматации, коэффициент фильтрации, распределение концентрации дисперсных частиц в пласте, пористость, математическая модель глубокого проникновения частиц в пористую среду. *Методы:* численное моделирование, явная конечно-разностная схема, решение задачи с малым параметром, введение безразмерных параметров, метод характеристик. *Результаты и выводы.* Показано, что процессы выравнивания профиля приёмистости и коьматации пористой среды описываются в рамках единой системы уравнений глубокого проникновения дисперсных частиц в пористую среду. Установлено, что концентрация осаждённых частиц является малым параметром, позволяющим свести полную систему уравнений глубокого проникновения дисперсных частиц в пористую среду к упрощённому виду, при котором решение может быть получено аналитически с помощью метода характеристик. Проведено сопоставление решений полной и упрощённой систем уравнений глубокого проникновения дисперсных частиц в пористую среду, свидетельствующее об их соответствии с погрешностью менее 4 %. Получены распределения концентрации дисперсных частиц и пористости в пласте при коьматации, показывающие, что с течением времени фронт коьматации распространяется с постоянной скоростью. Показано, что коэффициент коьматации имеет важное значение для процесса вытеснения нефти водой и выступает в качестве малого параметра. Уменьшение коэффициента коьматации приводит к замедлению скорости вытеснения и увеличению размеров стабилизированной зоны около фронта вытеснения.

Ключевые слова: малый параметр, фильтрация в пористой среде, полимер, дисперсные частицы, коьматация, закон Дарси, модель глубокого проникновения частиц

Для цитирования: Архипова Е.Н., Гильманов А.Я., Шевелёв А.П. Решение задачи с малым параметром при фильтрации суспензии в пористой среде // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 10. – С. 7–18. DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4421

UDC 532.546.2

DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4421

Solution of the problem with a small parameter in suspension filtration in a porous medium

E.N. Arkhipova[✉], A.Ya. Gilmanov, A.P. Shevelev

University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation

[✉]stud0000222738@study.utmn.ru

Abstract. Relevance. The necessity to calculate the changes in filtration properties during injection of suspensions for subsequent forecasting of technological parameters of wells. This calculation is complicated by the presence of different-scale ef-

fects, since the penetration depth of dispersed particles is orders of magnitude smaller than the characteristic dimensions of the formation. These effects have not been studied in detail before. **Aim.** To analyze the effect of a small parameter on the behavior of flow characteristics using a mathematical model of suspension filtration in a porous medium. **Objects.** Colmatation coefficient, filtration coefficient, distribution of concentration of dispersed particles in the formation, porosity, mathematical model of deep-bed suspension migration into a porous medium. **Methods.** Numerical modeling, explicit finite-difference scheme, solution of a problem with a small parameter, introduction of dimensionless parameters, method of characteristics. **Results and conclusions.** It is shown that the processes of conformance control and colmatation of a porous medium are described within the framework of a unified system of equations of deep-bed suspension migration into a porous medium. It is identified that the concentration of retained particles is a small parameter that allows reducing the complete system of equations of deep-bed suspension migration into a porous medium to a simplified form, in which the solution can be obtained analytically using the method of characteristics. The authors compared the solutions of the complete and simplified systems of equations of deep-bed suspension migration into a porous medium, indicating their compliance with an error of less than 4%. They obtained the distributions of the concentration of dispersed particles and porosity in the reservoir during colmatation, showing that over time the colmatation front propagates at a constant rate. It is shown that the colmatation coefficient is a small parameter that significantly determines the nature of oil displacement by water, and a decrease in the colmatation coefficient leads to a decrease in the rate of colmatation and the appearance and growth of the size of the stabilized zone near the displacement front.

Keywords: small parameter, filtration in porous medium, polymer, dispersed particles, colmatation, Darcy's law, deep-bed suspension migration model

For citation: Arkhipova E.N., Gilmanov A.Ya., Shevelev A.P. Solution of the problem with a small parameter in suspension filtration in a porous medium. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 10, pp. 7–18. DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4421

Введение

Большинство физических процессов описывается линейными дифференциальными уравнениями в частных производных первого и второго порядка [1–4]. Рассматриваемые процессы протекают в пространстве и времени, а уравнения содержат соответствующие производные. Поэтому для однозначности решения ставится задача Коши, заключающаяся в определении состояния системы по её известной начальной конфигурации [1, 5–7], а также краевая задача на границах рассматриваемой области [6, 8, 9].

Уравнения параболического типа описывают монотонное распространение физического параметра в рассматриваемой области. В частности, к уравнениям параболического типа [6] относятся уравнения массо- и теплопереноса – уравнения диффузии и теплопроводности [2, 10, 11]. В ряде задач наблюдаются разрывные распределения физических величин в области моделирования [12–14]. Такое поведение решения справедливо для уравнений гиперболического типа первого порядка, в частности для закона сохранения массы [3, 15].

Решения дифференциальных уравнений в частных производных первого и второго порядка для описания физических процессов являются корректными в случае, если сами уравнения являются эволюционными, то есть дающими истолкование этих процессов как последовательную смену некоторых состояний без наличия существенных флуктуаций [16]. В случае системы дифференциальных уравнений в частных производных их эволюционность определяется из решения задачи Штурма–

Лиувилля вещественностью собственных значений матриц коэффициентов [17].

В ряде случаев при описании физических систем необходимо учитывать процессы, происходящие после эволюционной смены состояний. В таком случае задача сводится к интегро-дифференциальным уравнениям типа Вольтерра или к дифференциальным уравнениям с запаздывающим аргументом [18].

Большинство физических задач в общей постановке не имеет аналитических решений, либо поиск таких решений требует больших вычислительных мощностей и временных затрат. Преимуществом эволюционных уравнений является их пригодность к использованию численных методов решения, так как в случае малого шага расчётной численной сетки по времени описывается последовательная смена близких состояний физической системы, определяемых начальными условиями [19]. Такие малые шаги по времени можно рассматривать как малые параметры при решении эволюционных систем уравнений.

Актуальность решения задач с малым параметром обусловлена разномасштабностью возникающих процессов в механике многофазных систем, например, при малообъёмных закачках физико-химических реагентов для управления процессом заводнения в нефтяном пласте [20]. В таких задачах в качестве малого параметра выступает размер оторочки реагента [20]. Малый параметр может стоять как коэффициент перед старшей производной (такие задачи называются сингулярно возмущёнными) или в граничных условиях.

С помощью условий, накладываемых на значения малого параметра, для рассматриваемого вида уравнений необходимо контролировать выполнение условий теоремы Коши о существовании и единственности решения [21].

Для решения задач с малым параметром необходимо использование специальных методов теории дифференциальных уравнений, аппарата математического анализа и математической физики [22], в том числе учитывающих возможность эффекта пограничного слоя [23]. При наличии такого эффекта определённые значения малого параметра могут приводить к существенным изменениям решения вблизи границы рассматриваемой области [23], что и наблюдается в процессе применения физико-химических методов увеличения нефтеотдачи пластов [20], в частности суспензий. Кроме того, решение таких уравнений непрерывно зависит от значения малого параметра [24, 25].

Распространённым подходом для моделирования задач подземной гидромеханики является использование гидродинамических симуляторов [26, 27]. В этих симуляторах хорошо себя зарекомендовали методы механики сплошных сред. Однако в настоящее время не исследована корректность применения этих симуляторов для решения задач с малым параметром.

Другим распространённым подходом к моделированию процессов фильтрации суспензий в пласте является использование модели глубокого проникновения частиц реагента в пористую среду [28–30]. В этой модели снижение пористости и проницаемости пласта из-за оседания дисперсных частиц описывается введением двух параметров – коэффициентов фильтрации и повреждения породы. На практике эта модель используется для описания процессов в ходе применения технологии выравнивания профиля приёмистости (выравнивания скоростей фильтрации и расходов по пропласткам) нагнетательной скважины. Целесообразным видится её применение также для описания схожего процесса кольтматации пористой среды при заводнении. Глубина проникновения дисперсных частиц при этом не превышает нескольких метров [20], следовательно, эта глубина и является малым параметром, что отмечается в данной работе впервые. Целью настоящей работы является решение задачи фильтрации суспензии в пористой среде в локальной области вблизи добывающей скважины. Впервые в рамках единой модели рассматриваются процессы выравнивания профиля приёмистости нагнетательной скважины и кольтматации при заводнении, указываются малые параметры в каждом случае.

Математическая модель глубокого проникновения дисперсных частиц в пористую среду

Представлена модель однородной пористой среды, насыщенной раствором полимера (рис. 1).

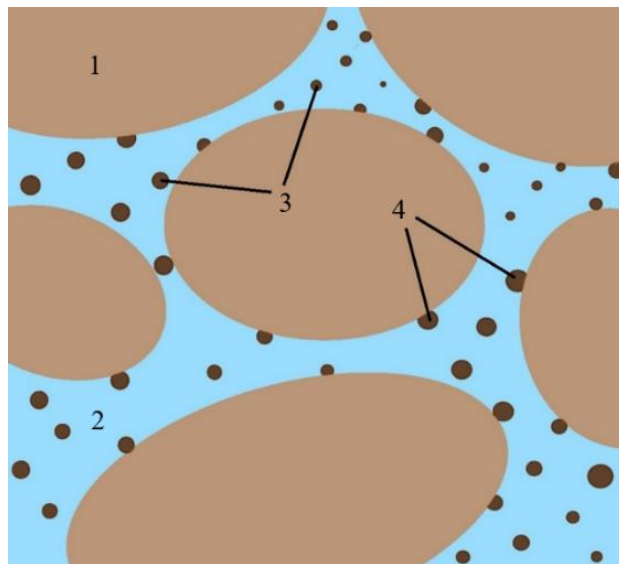


Рис. 1. Пористая среда. Обозначения: 1 – порода; 2 – раствор полимера; 3 – частицы в потоке; 4 – частицы, удержанные на скелете пористой среды

Fig. 1. Porous medium. Description: 1 – rock; 2 – polymer solution; 3 – particles in flow; 4 – particles retained on the rock matrix

Концентрация дисперсных частиц в растворе полимера обозначается массовой концентрацией c . В то же время часть частиц σ , относящаяся к объёму пористой среды, задерживается в сужениях поровых каналов (на скелете пористой среды).

Предполагается, что скорость раствора полимера и взвешенных в нем частиц является одинаковой и равной u (частицы полностью увлекаются несущей фазой), а также если пренебречь диффузионной частью в выражении для плотности потока, что справедливо для достаточно крупных частиц [20], закон сохранения массы частиц записывается в виде:

$$\frac{\partial((m_0 - \sigma)c + \sigma)}{\partial t} + \vec{\nabla}(\vec{u}c) = 0, \quad (1)$$

где t – время; m_0 – начальная пористость.

Первое слагаемое в (1) учитывает тот факт, что при осаждении частиц значение пористости уменьшается [20], и определяет, сколько в единице объёма пористой среды содержится частиц.

Скорость осаждения частиц зависит от концентрации частиц на единицу объёма пористой среды, массовой концентрации частиц в полимере и скорости фильтрации [20]. Обычно полагается, что

полимер присутствует во всем потоке с постоянной начальной концентрацией. В рассматриваемом процессе полимерная составляющая играет роль «цемента», который закрепляет захваченные частицы на скелете породы. С другой стороны, полимер удерживает свободные частицы во взвешенном состоянии. В результате в скорости захвата частиц не будет члена, отвечающего за срывание частиц и затягивание их обратно в поток [20].

Для описания динамики концентрации удержанных частиц можно использовать классическое уравнение глубокого проникновения частиц [20, 28–30]:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} = \lambda u c, \quad (2)$$

где λ – коэффициент фильтрации.

Коэффициент фильтрации в (2) определяют экспериментально [30] и нередко считают постоянным. Однако в общем виде λ считают функцией от концентрации осажженных частиц в единице объема пористой среды [28, 29]:

$$\lambda = \lambda_0 \left(1 - \frac{\sigma}{m_0}\right), \quad (3)$$

где λ_0 – коэффициент фильтрации до закачки суспензии полимера.

Для описания течения раствора полимера в пористой среде можно использовать модифицированное уравнение Дарси, учитывающее снижение проницаемости за счет осаждения частиц [20]:

$$\vec{u} = -\frac{k}{\mu(1+\beta\sigma)} \text{grad } p, \quad (4)$$

где k – абсолютная проницаемость пористой среды; μ – коэффициент динамической вязкости; p – поровое давление; β – коэффициент повреждения породы. Коэффициент β определяется геометрией поровой среды и показывает степень загрязнения пористой среды [20].

Таким образом, с учётом (1), (3), (4) в общем виде система уравнений глубокого проникновения дисперсных частиц в пористую среду имеет вид:

$$\frac{\partial((m_{0i}-\sigma_i)c_i+\sigma_i)}{\partial t} + \vec{\nabla}(\vec{u}_i c_i) = 0, \quad (5)$$

$$\frac{\partial \sigma_i}{\partial t} = \lambda_0 \left(1 - \frac{\sigma_i}{m_{0i}}\right) u_i c_i, \quad (6)$$

$$\vec{u}_i = -\frac{k_i}{\mu(1+\beta\sigma_i)} \text{grad } p, \quad (7)$$

где i – номер пропластка.

Система уравнений (5)–(7) далее будет называться полной. Эта система уравнений может быть решена численно, например, при помощи явной схемы, так как аналитически такую задачу решить не получится ввиду ее нелинейности. Однако нужно понимать, что на промысле точность и время – это главные параметры, позволяющие правильно и

быстро предсказывать дальнейшую работу участка месторождения. К сожалению, для повышения точности расчётов приходится выбирать достаточно малые шаги по координатам численной сетки в случае использования численных решений или гидродинамических симуляторов, что приводит к росту времени расчётов.

Если предположить, что концентрация осажженных частиц на единицу объема пористой среды много меньше начальной пористости ($\sigma \ll m_0$), можно получить упрощенную систему уравнений глубокого проникновения частиц [20]:

$$\frac{\partial(m_{0i}c_i+\sigma_i)}{\partial t} + \vec{\nabla}(\vec{u}_i c_i) = 0, \quad (8)$$

$$\frac{\partial \sigma_i}{\partial t} = \lambda_0 u_i c_i, \quad (9)$$

$$\vec{u}_i = -\frac{k_i}{\mu(1+\beta\sigma_i)} \text{grad } p. \quad (10)$$

Упрощенная система уравнений может быть решена аналитически [31]. Аналитическое решение, в отличие от численного, будет давать точный и быстрый результат.

Таким образом, получены две системы уравнений: полная – учитывает влияние осаждаемых частиц на значение пористости и коэффициент фильтрации и может быть решена численно, упрощенная – пренебрегает размером осадка по отношению к начальной пористости и может быть решена аналитически.

Сопоставление решений полной и упрощенной систем уравнений

Для проверки предположения о малости концентрации осажженных частиц в единице объема пористой среды по сравнению с начальной пористостью необходимо решить полную и упрощенную системы уравнений – (5)–(7) и (8)–(10), соответственно.

Пусть рассматривается задача о полимер-дисперсной обработке слоисто-неоднородного пласта вблизи трещины. Эта задача подробно описана и аналитически решена при помощи метода характеристик с использованием упрощенной системы уравнений глубокого проникновения частиц для линейного (одномерного) течения в работе [20].

Поэтому разумно использовать результаты авторов [20], а также их параметры модели для того, чтобы сопоставить решение полной системы уравнений с решением упрощенной. Как выше было сказано, полная система может быть решена численно, например, при помощи явной конечно-разностной схемы.

Предварительно нужно обезразмерить систему уравнений. Для этого вводятся следующие безразмерные переменные [20]:

$$X = \frac{x}{L}, \quad (11)$$

$$\Lambda = \lambda_0 L, \quad (12)$$

$$T = \frac{Qt}{2LHl}, \quad (13)$$

$$V_i = \frac{k_i H}{\sum_j k_j h_j}, \quad (14)$$

где L – характерный линейный размер задачи; Q – расход суспензии в нагнетательной скважине; l – длина трещины; H – эффективная толщина пласта; h – толщина пропластка; x – горизонтальная координата; V_i – безразмерная проводимость; X , Λ и T – безразмерные координата, коэффициент фильтрации и время соответственно; j – номер пропластка.

Перед обезразмериванием вводится поток в i -ом пропластке [20]:

$$Q_i = \frac{k_i h_i}{\sum_j k_j h_j} Q. \quad (15)$$

Обезразмеренная с учётом (11)–(15) система уравнений будет иметь вид

$$\frac{\partial c_i}{\partial T} + \frac{V_i}{(m_{0i} - \sigma_i)} \frac{\partial c_i}{\partial X} = \frac{\Lambda V_i c_i}{m_{0i}} (c_i - 1),$$

$$\frac{\partial \sigma_i}{\partial t} = \Lambda \left(1 - \frac{\sigma_i}{m_{0i}} \right) V_i c_i.$$

Начальные и граничные условия для системы будут иметь вид:

$$c(X=0, T \geq 0) = c_0, \quad c(X > 0, T=0) = 0, \quad \sigma(X \geq 0, T=0) = 0,$$

где c_0 – начальная концентрация частиц в потоке.

Решение будет производиться с использованием явной конечно-разностной схемы по программе, написанной на языке программирования Python.

Расчет будет идти до тех пор, пока $T < T_0$, где T_0 – безразмерный объем закачки, определяющийся по формуле

$$T_0 = \frac{V_{\text{зак}}}{2LHl},$$

где $V_{\text{зак}}$ – объем закачки.

Результатом применения технологии выравнивания профиля приёмистости является снижение проницаемости в призабойной зоне, что позволяет перераспределить потоки нагнетаемой жидкости между пропластками с низкой и высокой проницаемостью, то есть провести выравнивание скоростей фильтрации в пропластках, а следовательно, и фронта вытеснения нефти водой.

Проницаемость для i -го пропластка после обработки определяется формулой:

$$k_{1i} = \frac{k_i}{\int_0^1 (1 + \beta \sigma_i) dx}. \quad (16)$$

Знаменатель в формуле (16) называется дополнительным фильтрационным сопротивлением g_i ,

которое образовалось в результате закрепившихся частиц на скелете породы. Так как из-за неоднородности пласта в каждый пропласток входит разный объем реагента, дополнительное фильтрационное сопротивление для каждого пропластка будет разным.

Для того чтобы сопоставить значения дополнительного фильтрационного сопротивления, определяемого при помощи аналитического решения и численного, интеграл в формуле (16) можно решить, например, при помощи метода Монте-Карло.

Пусть имеется модельный пласт с параметрами, приведенными в таблице. Всего имелось пять пропластков. Значения эмпирических параметров были следующими: $\lambda_0 = 10 \text{ м}^{-1}$, $\beta = 400$. Начальная концентрация суспензии взята $c_0 = 0,02$, а для вязкости принималось значение $\mu = 0,008 \text{ Па}\cdot\text{с}$. Длина трещины $l = 79 \text{ м}$, а размер призабойной зоны скважины $L = 40 \text{ м}$. Объем закачки брался равным 1302 м^3 [20]. Шаг по координате $\Delta X = 10^{-3}$ и по времени $\Delta T = 10^{-5}$.

Таблица. Параметры пропластков
Table. Interlayers parameters

Номер пропластка/Interlayer no.	k_i , мД/мД	h_i , м/м	m_{0i}
1	1213	1,3	0,236
2	371	1,4	0,209
3	52	4,7	0,189
4	106	1,6	0,201
5	135	1,3	0,196

Рассматривалась обработка вертикальной скважины с трещиной гидроразрыва. Распределения частиц в потоке и доли осажденных частиц на скелете породы в наиболее высокопроницаемом пропластке с проницаемостью 1213 мД приведены на рис. 2, 3 соответственно. Для сравнения также приведены распределения концентраций частиц вблизи трещины в высокопроницаемом пропластке, полученные аналитически с использованием упрощенной системы уравнений [20].

Как видно из рисунков, решения, полученные для полной и упрощенной систем уравнений, соответствуют друг другу с относительной ошибкой менее 4 %. Действительно, концентрация осажденных частиц в единице объема пористой среды мала по сравнению с начальной пористостью. Этот результат позволяет использовать данное предположение для упрощения системы уравнений глубокого проникновения частиц, которую в дальнейшем можно решить аналитически.

Также были сопоставлены значения дополнительного фильтрационного сопротивления, рассчитанного аналитически при помощи упрощенной системы уравнений и рассчитанного численного при помощи полной.

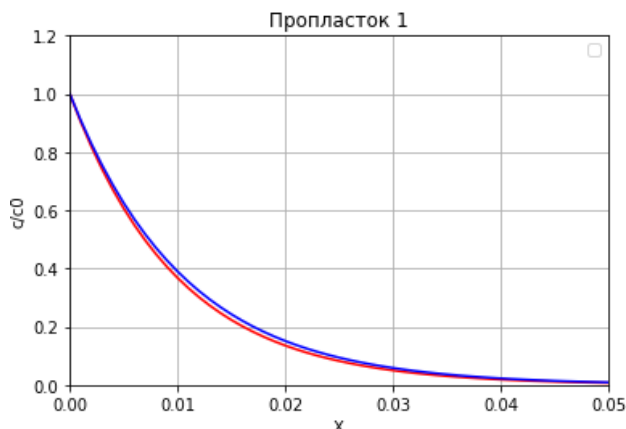


Рис. 2. Распределение концентрации взвешенных частиц в потоке вблизи трещины. Решения полной (синяя кривая) и упрощенной (красная кривая) систем уравнений

Fig. 2. Distribution of volumetric particle content moving with the flow near a fracture. Solutions of complete (blue curve) and simplified (red curve) systems of equations

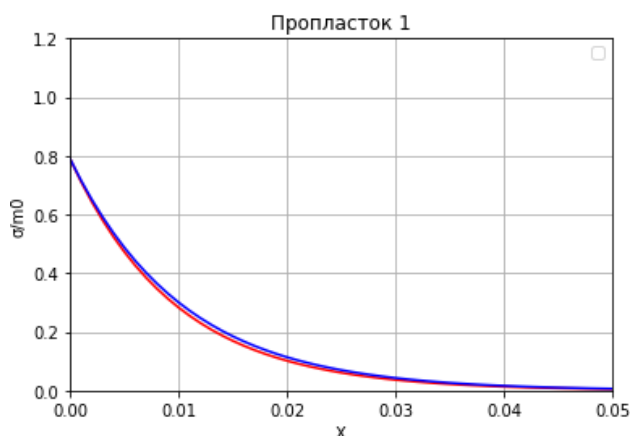


Рис. 3. Распределение концентрации осажденных частиц вблизи трещины. Решения полной (синяя кривая) и упрощенной (красная кривая) систем уравнений

Fig. 3. Distribution of the volumetric particle content retained in the unit volume of porous media near a fracture. Solutions of complete (blue curve) and simplified (red curve) systems of equations

Для высокопроницаемого пропластка дополнительное фильтрационное сопротивление, полученное при помощи решения упрощенной и полной систем уравнений, равно 1,744 и 1,807 соответственно. Разница между значениями примерно равна 3,5 %. В некоторых ситуациях такое отклонение может быть значительным, поэтому был проведен расчет для шага по координате $\Delta X=10^{-4}$ и по времени $\Delta T=10^{-6}$ для того, чтобы численное решение стремилось к аналитическому. В таком случае значения дополнительного фильтрационного парамет-

ра равны 1,744 и 1,740 соответственно для упрощенной и полной систем уравнений. Теперь разница между значениями составляет 0,2 %. Данный результат также подтверждает допущение о малости концентрации осажденных частиц по сравнению с начальной пористостью и показывает корректность полученного решения полной системы уравнений при помощи явной конечно-разностной схемы (при уменьшении шагов численной сетки решение должно стремиться к аналитическому – условие сходимости).

Математическая модель кольтмации пористой среды

В другом подходе учитывается изменение пористости вследствие осаждения частиц в поровых каналах. В таком случае скорость осаждения частиц и снижения пористости характеризуется коэффициентом кольтмации, который также является малым параметром. Система уравнений при этом остаётся подобной уравнениям глубокого проникновения дисперсных частиц в пористую среду, но меняется закон осаждения частиц и соответствующее уменьшение пористости [32].

Фильтрация суспензий с небольшой массовой долей дисперсных частиц описывается системой уравнений, в которую входит баланс массы частиц в суспензии и несущей жидкости, закон Дарси, функциональная зависимость проницаемости от пористости, например, формула Козени–Кармана и уравнение, описывающее динамику оседания частиц на скелете пористой среды [32]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(mc) + \operatorname{div}(c\vec{u}) &= \frac{\partial m}{\partial t}, \\ \frac{\partial}{\partial t}((1-c)m) + \operatorname{div}((1-c)\vec{u}) &= 0, \\ \vec{u} &= -\frac{k(m)}{\mu} \operatorname{grad} p, \quad k(m) = k_0 \left(\frac{m}{m_0}\right)^r, \\ \frac{\partial m}{\partial t} &= -\gamma c(m - m_{\text{ст}}), \end{aligned}$$

где c – объемная концентрация частиц в суспензии; μ – вязкость суспензии; m – пористость; $m_{\text{ст}}$ – стационарное значение пористости, меньше которой пористость не снижается; γ – коэффициент кольтмации; k_0 – начальное значение проницаемости пласта; r – показатель степени. Предполагается, что отложение частиц на скелете не приводит к задерживанию жидкости в порах (как следствие, отсутствуют капиллярные силы), а скорость частиц совпадает со скоростью жидкости, поскольку концентрация частиц c мала.

Вводится комплекс безразмерных параметров и переменных: (11),

$$T = \frac{t}{t_0},$$

$$P = \frac{p-p_l}{p_w-p_l},$$

$$\Gamma = \frac{\gamma}{\gamma_0},$$

$$U = \frac{u}{u_0},$$

где P – безразмерное давление; Γ – безразмерный коэффициент кольтации; U – безразмерная скорость; p_w – забойное давление; p_l – давление на контуре питания; u_0 – характерная скорость; t_0 – характерное время; γ_0 – характерный коэффициент кольтации.

После их подстановки в исходную систему получается удобным ввести характерные значения параметров как:

$$u_0 = \frac{k_0(p_w-p_l)}{\mu L},$$

$$t_0 = \frac{\mu L^2}{k_0(p_w-p_l)},$$

$$\gamma_0 = \frac{1}{t_0}.$$

Тогда система уравнений в безразмерном виде будет выглядеть так:

$$\frac{\partial(mc)}{\partial T} + \frac{\partial(Uc)}{\partial X} = \frac{\partial m}{\partial T}, \quad \frac{\partial((1-c)m)}{\partial T} + \frac{\partial((1-c)U)}{\partial X} = 0,$$

$$U = -\left(\frac{m}{m_0}\right)^r \frac{\partial P}{\partial X}, \quad k(m) = k_0 \left(\frac{m}{m_0}\right)^r, \quad (17)$$

$$\frac{\partial m}{\partial T} = -\Gamma c(m - m_{ст}).$$

Решение будет производиться с использованием явной конечно-разностной схемы.

Чтобы определить распределения объемной концентрации частиц в суспензии, необходимо

учесть условия на границах пласта и в начальный момент времени. Начальное условие принимается следующим:

$$c(X, 0) = 0.$$

Граничное условие записывается следующим образом:

$$c(0, T) = c_0.$$

Нахождение распределения пористости также требует задания начального условия:

$$m(X, 0) = m_0.$$

В итоге имеется замкнутая система уравнений, позволяющая определить распределения пористости и концентрации дисперсных частиц в пласте.

Результаты исследования

В результате решения задачи были получены графические зависимости пористости призабойной зоны, объемной концентрации частиц в суспензии, проницаемости и давления от координаты в различные моменты времени: $t=30$ сут, $t=60$ сут, $t=90$ сут, остальные параметры соответствуют моделям задач подземной гидромеханики: $L=100$ м, $\mu=1$ мПа·с, $m_{ст}=0,05$, $\gamma=0,01$ 1/с, $k_0=100$ мД, $r=3$.

Из рис. 4 можно увидеть, что за фронтом вытеснения концентрация частиц становится равной концентрации частиц в закачиваемой смеси, а пористость уменьшается до минимального значения, которое называется стационарной пористостью. Это происходит из-за оседания дисперсных частиц и соответствующего снижения фильтрационно-емкостных свойств пласта.

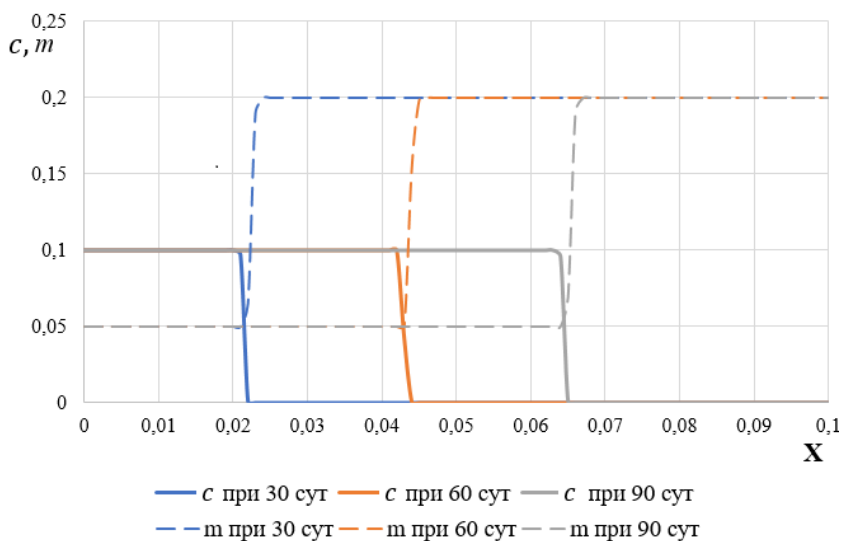


Рис. 4. Распределение пористости и объемной концентрации частиц примеси по координате в различные моменты времени

Fig. 4. Distribution of porosity and volumetric particles concentration along the coordinate at different moments of time

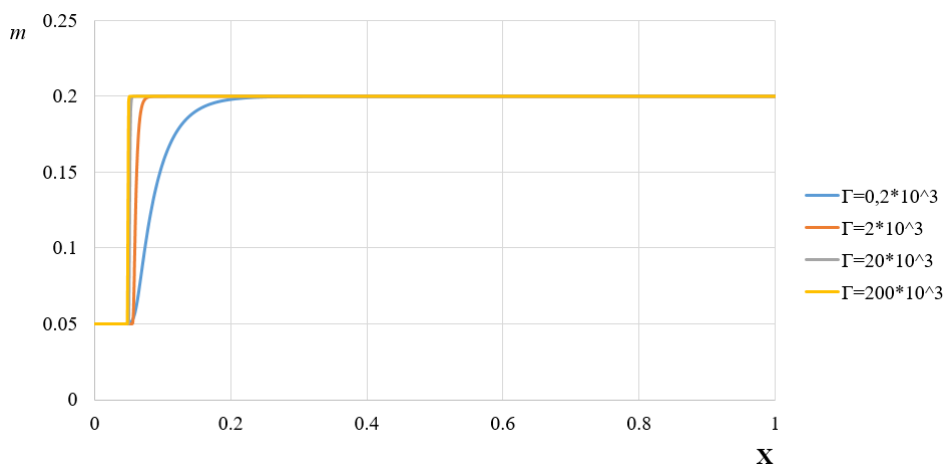


Рис. 5. Распределение пористости по координате при различных значениях коэффициента кольтмации в момент времени 30 сут

Fig. 5. Porosity distribution along the coordinate at different values of the colmatation coefficient at the time of 30 days

Помимо этого, можно заметить, что фронт вытеснения продвигается дальше со временем, причём его скорость движения остается постоянной.

Также был произведен расчет распределения пористости по координате при различных значениях коэффициента кольтмации Γ : $0,2 \cdot 10^3$, $2 \cdot 10^3$, $20 \cdot 10^3$, $200 \cdot 10^3$ (рис. 5), остальные параметры соответствуют модельному случаю.

При уменьшении коэффициента кольтмации на фронте вытеснения не возникает разрывное решение, а образуется стабилизированная зона. В этой зоне концентрация постепенно уменьшается до нуля, а пористость увеличивается. Ширина стабилизированной зоны определяется между точками с наименьшей и наибольшей пористостью. Путем анализа результатов было выяснено, что причиной образования стабилизированной зоны является конечная скорость кольтмации, которая характеризуется коэффициентом кольтмации. Согласно рис. 5, чем меньше этот коэффициент, тем шире становится стабилизированная зона, что обусловлено уменьшением пористости согласно (17). Это приводит к постепенному снижению пористости по координате. Таким образом, коэффициент кольтмации является малым параметром, который значительно влияет на процесс вытеснения и определяет его характер. Аналогом такого малого параметра являются капиллярные силы в задаче Рапопорта-Лиса [33].

Выводы

1. Показано, что процессы выравнивания профиля приёмистости и кольтмации пористой среды описываются в рамках единой системы уравнений глубокого проникновения дисперсных частиц в пористую среду.
2. Установлено, что концентрация осаждённых частиц является малым параметром, позволяющим свести полную систему уравнений глубокого проникновения дисперсных частиц в пористую среду к упрощённому виду, при котором решение может быть получено аналитически с помощью метода характеристик.
3. Проведено сопоставление решений полной и упрощённой систем уравнений глубокого проникновения дисперсных частиц в пористую среду, свидетельствующее об их соответствии с погрешностью менее 4 %.
4. Получены распределения концентрации дисперсных частиц и пористости в пласте при кольтмации, показывающие, что с течением времени фронт кольтмации распространяется с постоянной скоростью.
5. Показано, что коэффициент кольтмации является малым параметром, существенно определяющим характер вытеснения нефти водой, причём уменьшение коэффициента кольтмации приводит к уменьшению скорости вытеснения и увеличению размеров стабилизированной зоны вблизи фронта вытеснения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A new semi-analytical method for solving a class of time fractional partial differential equations with variable coefficients / J. Lin, W. Feng, S. Reutsiy, H. Xu, Y. He // Applied Mathematics Letters. – 2021. – Vol. 112. – № 106712. – P. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aml.2020.106712>
2. Васютин М.А., Данилова Е.В., Кузьмичев Н.Д. Оценка максимального нагрева пленки NbN токовым импульсом при низких температурах на основе уравнения теплопроводности // Теплофизика и аэромеханика. – 2022. – № 3. – С. 473–480.

3. The coupled model of transient non-equilibrium interphase mass transfer rate of sliding bubble and two-phase flow in variable gradient drilling / R. Zhang, J. Li, G. Liu, H. Yang, R. Gao // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2022. – Vol. 208. – № 109277. – P. 1–16. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109277>
4. Lissenden C.J. Nonlinear ultrasonic guided waves – principles for nondestructive evaluation // *Journal of Applied Physics*. – 2021. – Vol. 129. – № 171103. – P. 1–27. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0046878>
5. Global solutions of the Cauchy problem to Euler–Poisson equations of two-carrier types / S. Yin, X. Wang, Y. Lu, C. Klingenberg // *Applied Mathematics Letters*. – 2022. – Vol. 132. – № 108174. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aml.2022.108174>
6. Boaca T., Malureanu I. Determination of oil reservoir permeability from resistivity measurement: A parabolic identification problem // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2017. – Vol. 153. – P. 345–354. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2017.04.014>
7. Liu C.-S., Wang F., Gu Y. A Trefftz/MFS mixed-type method to solve the Cauchy problem of the Laplace equation // *Applied Mathematics Letters*. – 2019. – Vol. 87. – P. 87–92. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aml.2018.07.028>
8. Time-dependent shape factor for scaling of multi-dimensional counter-current imbibition with different boundary conditions / G. Li, Y. Liu, L. Mi, L. Song, Z. Cheng, Q. Qian, L. Xue, X. Pei // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2022. – Vol. 217. – № 110880. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2022.110880>
9. Zakirov T.R., Khramchenkov M.G. Study of the pore space heterogeneity effect on the absolute permeability tensors calculated under different boundary conditions and driving forces using a “Computational Rock Physics” technology // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2022. – Vol. 216. – № 110750. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2022.110750>
10. Achour S.H., Okuno R. A single-phase diffusion model for gas injection in tight oil reservoirs // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2022. – Vol. 213. – № 110469. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2022.110469>
11. Rong X., Zhu H.-W. Thermal insulation design of subsea vertical X-mas tree // *Petroleum Science*. – 2021. – Vol. 18. – P. 1182–1194. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petsci.2021.05.001>
12. Fedorov K.M., Zubkov P.T. Placement of gels in stratified reservoirs using a sequential injection technique // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 1996. – Vol. 15. – № 1. – P. 69–80. DOI: [https://doi.org/10.1016/0920-4105\(95\)00061-5](https://doi.org/10.1016/0920-4105(95)00061-5)
13. Evaluation of machine learning methodologies using simple physics based conceptual models for flow in porous media / D. Magzymov, R.R. Ratnakar, B. Dindoruk, R.T. Johns // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2022. – Vol. 219. – № 111056. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2022.111056>
14. Каракин А.В. Обобщённая задача Баклея–Левверетта // *Математическое моделирование*. – 2010. – Т. 22. – № 8. – С. 3–23.
15. Родионов В.Е., Цыбулин И.В., Карпаев А.А. Численное моделирование волны внутрискластового горения при двухфазном фильтрационном течении // *Труды МФТИ*. – 2016. – Т. 8. – № 3. – С. 180–193.
16. Tan W., Zhang W., Zhang J. Evolutionary behavior of breathers and interaction solutions with M-solitons for $(2 + 1)$ -dimensional KdV system // *Applied Mathematics Letters*. – 2019. – Vol. 101. – № 106063. – P. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aml.2019.106063>
17. Гельфанд И.М. Некоторые задачи теории квазилинейных уравнений // *Успехи математических наук*. – 1959. – Т. 14. – № 2 (86). – С. 87–158.
18. Rakhmanov A.T., Kuznetsov S.F. Determination of dynamic errors of converter temperature and humidity measured quickly changing output signals // *International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology*. – 2019. – Vol. 6. – № 4. – P. 8945–8949.
19. Hong Q., Li J., Wang Q. Supplementary variable method for structure-preserving approximations to partial differential equations with deduced equations // *Applied Mathematics Letters*. – 2020. – Vol. 110. – № 106576. – P. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aml.2020.106576>
20. A theoretical analysis of profile conformance improvement due to suspension injection / K.M. Fedorov, A.Y. Gilmanov, A.P. Shevelev, A.V. Kobayashv, D.A. Anuriev // *Mathematics*. – 2021. – Vol. 9. – № 1727. – P. 1–14. DOI: <https://doi.org/10.3390/math9151727>
21. Bockstal K.V. Existence and uniqueness of a weak solution to a non-autonomous time-fractional diffusion equation (of distributed order) // *Applied Mathematics Letters*. – 2020. – Vol. 109. – № 106540. – P. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aml.2020.106540>
22. Шишкин Г.И., Шишкина Л.П. Схема Рундсона повышенного порядка точности для семилинейного сингулярно возмущенного эллиптического уравнения конвекции-диффузии // *Журнал вычислительной математики и математической физики*. – 2010. – Т. 50. – № 3. – С. 458–478.
23. Polyanin A.D., Shingareva I.K. Hypersingular nonlinear boundary-value problems with a small parameter // *Applied Mathematics Letters*. – 2018. – Vol. 81. – P. 93–98. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aml.2018.02.010>
24. Демидов А.С. Эллиптические псевдодифференциальные краевые задачи с малым параметром при старшем операторе // *Математический сборник. Новая серия*. – 1973. – Т. 91 (133). – № 3 (7). – С. 421–444.
25. Юлдашев Т.К. О дифференцируемости по малым параметрам решения смешанной задачи для нелинейного псевдогиперболического уравнения // *Журнал Сибирского Федерального университета. Математика и физика*. – 2014. – № 7 (2). – С. 260–271.
26. Гатауллин Т.И. Применение гидродинамических моделей линий тока для повышения эффективности заводнения // *Нефтяное хозяйство*. – 2010. – № 2. – С. 40–42.
27. Каневская Р.Д. Математическое моделирование гидродинамических процессов разработки месторождений углеводородов. – М.; Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2002. – 140 с.
28. Modified particle detachment model for colloidal transport in porous media / P. Bedrikovetsky, F.D. de Siqueira, C.A. Furtado, A.L.S. de Souza // *Transport in Porous Media*. – 2011. – Vol. 86. – № 2. – P. 353–383. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11242-010-9626-4>

29. Particle detachment under velocity alternation during suspension transport in porous media / P. Bedrikovetsky, A. Zeinijahromi, F.D. de Siqueira, C.A. Furtado, A.L.S. de Souza // *Transport in Porous Media*. – 2012. – Vol. 91. – № 1. – P. 173–197. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11242-011-9839-1>.
30. Determining model parameters for non-linear deep-bed filtration using laboratory pressure measurements / A. Vaz, P. Bedrikovetsky, P. Fernandes, A. Badalyan, T. Carageorgos // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2017. – № 151. – P. 421–433. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2017.01.001>
31. Herzig J.P., Leclerc D.M., Goff P.L. Flow of suspensions through porous media. Application to deep filtration // *Industrial and Engineering Chemistry Research*. – 1970. – № 62. – P. 8–35.
32. Леонтьев Н.Е. О структуре фронта пористости при движении суспензии в пористой среде // *Вестник Московского Университета. Серия 1. Математика, механика*. – 2006. – № 5. – С. 73–76.
33. Архипова Е.Н., Гильманов А.Я., Шевелёв А.П. Моделирование кольматации пористой среды при закачке воды с частицами примеси // *Вычислительная механика сплошных сред*. – 2023. – Т. 16. – № 2. – С. 171–178.

Информация об авторах

Екатерина Николаевна Архипова, студент физико-технического института, Тюменский государственный университет, Россия, 625003, г. Тюмень, ул. Перекопская, 15а; stud0000222738@study.utmn.ru; <https://orcid.org/0009-0003-0022-5605>

Александр Янович Гильманов, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры моделирования физических процессов и систем физико-технического института, Тюменский государственный университет, Россия, 625003, г. Тюмень, ул. Перекопская, 15а; a.y.gilmanov@utmn.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7115-1629>

Александр Павлович Шевелёв, кандидат физико-математических наук, профессор кафедры моделирования физических процессов и систем физико-технического института Тюменский государственный университет, Россия, 625003, г. Тюмень, ул. Перекопская, 15а; a.p.shevelev@utmn.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0017-4871>

Поступила в редакцию: 03.10.2023

Поступила после рецензирования: 30.11.2023

Принята к публикации: 09.09.2024

REFERENCES

1. Lin J., Feng W., Reutsiy S., Xu H., He Y. A new semi-analytical method for solving a class of time fractional partial differential equations with variable coefficients. *Applied Mathematics Letters*, 2021, vol. 112, no. 106712, pp. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aml.2020.106712>
2. Vasyutin M.A., Danilova E.V., Kuzmichev N.D. Estimating the maximum heating of NbN film with a current pulse at a low temperature: calculation by heat conduction equation. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2022, no. 3, pp. 473–480. (In Russ.)
3. Zhang R., Li J., Liu G., Yang H., Gao R. The coupled model of transient non-equilibrium interphase mass transfer rate of sliding bubble and two-phase flow in variable gradient drilling. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, vol. 208, no. 109277, pp. 1–16. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109277>
4. Lissenden C. J. Nonlinear ultrasonic guided waves – principles for nondestructive evaluation. *Journal of Applied Physics*, 2021, vol. 129, no. 171103, pp. 1–27. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0046878>
5. Yin S., Wang X., Lu Y., Klingenberg C. Global solutions of the Cauchy problem to Euler–Poisson equations of two-carrier types. *Applied Mathematics Letters*, 2022, vol. 132, no. 108174. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aml.2022.108174>
6. Boaca T., Malureanu I. Determination of oil reservoir permeability from resistivity measurement: a parabolic identification problem. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2017, vol. 153, pp. 345–354. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2017.04.014>
7. Liu C.-S., Wang F., Gu Y. A Trefftz/MFS mixed-type method to solve the Cauchy problem of the Laplace equation. *Applied Mathematics Letters*, 2019, vol. 87, pp. 87–92. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aml.2018.07.028>
8. Li G., Liu Y., Mi L., Song L., Cheng Z., Qian Q., Xue L., Pei X. Time-dependent shape factor for scaling of multi-dimensional counter-current imbibition with different boundary conditions. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, vol. 217, no. 110880. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2022.110880>
9. Zakirov T.R., Khramchenkov M.G. Study of the pore space heterogeneity effect on the absolute permeability tensors calculated under different boundary conditions and driving forces using a “Computational Rock Physics” technology. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, vol. 216, no. 110750. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2022.110750>
10. Achour S. H., Okuno R. A single-phase diffusion model for gas injection in tight oil reservoirs. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, vol. 213, no. 110469. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2022.110469>

11. Rong X., Zhu H.-W. Thermal insulation design of subsea vertical X-mas tree. *Petroleum Science*, 2021, vol. 18, pp. 1182–1194. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petsci.2021.05.001>
12. Fedorov K.M., Zubkov P.T. Placement of gels in stratified reservoirs using a sequential injection technique. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 1996, vol. 15, no. 1, pp. 69–80. DOI: [https://doi.org/10.1016/0920-4105\(95\)00061-5](https://doi.org/10.1016/0920-4105(95)00061-5)
13. Magzymov D., Ratnakar R.R., Dindoruk B., Johns R.T. Evaluation of machine learning methodologies using simple physics based conceptual models for flow in porous media. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, vol. 219, no. 111056. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2022.111056>
14. Karakin A.V. Generalized Buckley–Leverett problem. *Matematicheskoe modelirovanie*, 2010, vol. 22, no. 8, pp. 3–23. (In Russ.)
15. Rodionov V.E., Tsybulin I.V., Karpaev A.A. Numerical simulation of an in-situ combustion wave for two-phase flow through porous media. *Proceedings of the Moscow Institute of Physics and Technology*, 2016, vol. 8, no. 3, pp. 180–193. (In Russ.)
16. Tan W., Zhang W., Zhang J. Evolutionary behavior of breathers and interaction solutions with M-solitons for $(2 + 1)$ -dimensional KdV system. *Applied Mathematics Letters*, 2019, vol. 101, no. 106063, pp. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aml.2019.106063>
17. Gelfand I.M. Some problems in the theory of quasilinear equations. *Uspekhi matematicheskikh nauk*, 1959, vol. 14, no. 2 (86), pp. 87–158. (In Russ.)
18. Rakhmanov A.T., Kuznetsov S.F. Determination of dynamic errors of converter temperature and humidity measured quickly changing output signals. *International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology*, 2019, vol. 6, no. 4, pp. 8945–8949.
19. Hong Q., Li J., Wang Q. Supplementary variable method for structure-preserving approximations to partial differential equations with deduced equations. *Applied Mathematics Letters*, 2020, vol. 110, no. 106576, pp. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aml.2020.106576>
20. Fedorov K.M., Gilmanov A.Y., Shevelev A.P., Kobayashv A.V., Anuriev D.A. A theoretical analysis of profile conformance improvement due to suspension injection. *Mathematics*, 2021, vol. 9, no. 1727, pp. 1–14. DOI: <https://doi.org/10.3390/math9151727>
21. Bockstal K.V. Existence and uniqueness of a weak solution to a non-autonomous time-fractional diffusion equation (of distributed order). *Applied Mathematics Letters*, 2020, vol. 109, no. 106540, pp. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aml.2020.106540>
22. Shishkin G.I., Shishkina L.P. A higher order Richardson scheme for a singularly perturbed semilinear elliptic convection-diffusion equation. *Computational Mathematics and Mathematical Physics*, 2010, vol. 50, no. 3, pp. 437–456. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.1134/s0965542510030061>
23. Polyanin A.D., Shingareva I.K. Hypersingular nonlinear boundary-value problems with a small parameter. *Applied Mathematics Letters*, 2018, vol. 81, pp. 93–98. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aml.2018.02.010>
24. Demidov A.S. Elliptic pseudodifferential boundary value problems with a small parameter for the senior operator. *Matematicheskii sbornik. Novaya seriya*, 1973, vol. 91 (133), no. 3 (7), pp. 421–444. (In Russ.)
25. Yuldashev T.K. On the differentiability with respect to small parameters of the solution of a mixed problem for a nonlinear pseudohyperbolic equation. *Journal of the Siberian Federal University. Mathematics and physics*, 2014, no. 7 (2), pp. 260–271. (In Russ.)
26. Gataullin T.I. Application of hydrodynamic models of current streamlets for waterflooding effectiveness increase. *Neftyanoe Khozaystvo = Oil Industry*, 2010, no. 2, pp. 40–42. (In Russ.)
27. Kanevskaya R.D. *Mathematical modeling of hydrodynamic processes in the development of hydrocarbon deposits*. Moscow, Izhevsk, Institute for Computer Research Publ., 2002. 140 p. (In Russ.)
28. Bedrikovetsky P., De Siqueira F.D., Furtado C.A., De Souza A.L.S. Modified particle detachment model for colloidal transport in porous media. *Transport in Porous Media*, 2011, vol. 86, no. 2, pp. 353–383. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11242-010-9626-4>
29. Bedrikovetsky P., Zeinijahromi A., De Siqueira F.D., Furtado C.A., De Souza A.L.S. Particle detachment under velocity alternation during suspension transport in porous media. *Transport in Porous Media*, 2012, vol. 91, no. 1, pp. 173–197. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11242-011-9839-1>
30. Vaz A., Bedrikovetsky P., Fernandes P., Badalyan A., Carageorgos T. Determining model parameters for non-linear deep-bed filtration using laboratory pressure measurements. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2017, no. 151, pp. 421–433. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2017.01.001>
31. Herzig J.P., Leclerc D.M., Goff P.L. Flow of suspensions through porous media. Application to deep filtration. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 1970, no. 62, pp. 8–35.
32. Leontiev N.E. On the structure of the porosity front during the movement of a suspension in a porous medium. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 1. Matematika, mekhanika*, 2006, no. 5, pp. 73–76. (In Russ.)
33. Arkhipova E.N., Gilmanov A.Ya., Shevelev A.P. Modeling colmatation of a porous medium during the injection of water with impurity particles. *Computational Continuum Mechanics*, 2023, vol. 16, no. 2, pp. 171–178. (In Russ.)

Information about the authors

Ekaterina N. Arkhipova, Student, University of Tyumen, 15a, Perekopskaya street, Tyumen, 625003, Russian Federation; stud0000222738@study.utmn.ru; <https://orcid.org/0009-0003-0022-5605>

Alexander Y. Gilmanov, Cand. Sc., Associate Professor, University of Tyumen, 15a, Perekopskaya street, Tyumen, 625003, Russian Federation; a.y.gilmanov@utmn.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7115-1629>

Alexander P. Shevelev, Cand. Sc., Professor, University of Tyumen, 15a, Perekopskaya street, Tyumen, 625003, Russian Federation; a.p.shevelev@utmn.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0017-4871>

Received: 03.10.2023

Revised: 30.11.2023

Accepted: 09.09.2024

UDC 504.3.054/504.75.05

DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4491

Complex assessment of ambient particulate matter in a small settlement with coal-handling port

A.S. Kholodov¹✉, K.Yu. Kirichenko², I.A. Vakhniuk², P. Duan³, K.S. Golokhvast²

¹ Far East Geological Institute FEB RAS, Vladivostok, Russian Federation

² Siberian Federal Scientific Center of Agrobiotechnology RAS, Krasnoobsk, Russian Federation

³ China University of Mining and Technology, Jiangsu, China

✉ alex.holodov@gmail.com

Abstract. Relevance. Russian coal exports have been steadily increasing in recent years, and Far Eastern ports, originally not adapted to dusty cargoes, have switched to coal operations. Unoptimized coal handling leads to increased content of coal-containing particles in the air and to various environmental problems. **Aim.** To analyze the concentration of particulate matter in the air and the chemical composition of particles on the surface of conifer needles in the Posyet settlement (Primorsky Krai, Russia), where a large coal terminal operates. **Materials and methods.** The chemical composition was studied on the surface of conifer needles by X-ray fluorescence and in washout of conifer needle samples using Raman spectroscopy and energy dispersive analysis. Concentrations of particles with the diameter of 2.5 and 10 μm (PM_{2.5} and PM₁₀, respectively) were measured using automatic monitoring stations. **Results and conclusions.** Chemical composition was dominated by mineral particles (calcite, silicates, etc.). However, the presence of coal particles (up to 8.3%) and metal particles was also observed. Mean concentrations of PM_{2.5} and PM₁₀ were within the Russian and international health standards, but close to their upper limits. Concentrations of both measured particle fractions were highest during the winter months (as well as in March, which is traditionally a cold month in the Far East), followed by a gradual decrease. The study obtained new data on the annual variations of concentrations of PM_{2.5} and PM₁₀, as well as on the basic composition of particles from the surface of woody vegetation (needles) as an indicator of the state of air pollution in this settlement.

Keywords: particulate matter, air pollution, PM_{2.5}, PM₁₀, coal dust, heavy metals

For citation: Kholodov A.S., Kirichenko K.Yu., Vakhniuk I.A., Duan P., Golokhvast K.S. Complex assessment of ambient particulate matter in a small settlement with coal-handling port. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 10, pp. 19–31. DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4491

УДК 504.3.054/504.75.05

DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4491

Шифр специальности ВАК: 25.00.36

Комплексная оценка содержания твердых частиц в атмосферном воздухе поселка, в порту которого ведется перевалка угля

А.С. Холодов¹✉, К.Ю. Кириченко², И.А. Вахнюк², П. Дуань³, К.С. Голохваст²

¹ Дальневосточный геологический институт Дальневосточного отделения РАН, Россия, г. Владивосток

² Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий РАН, Россия, п. Краснообск

³ Китайский горно-технологический университет, Китайская Народная Республика, г. Сяйчжоу

✉ alex.holodov@gmail.com

Аннотация. Актуальность. В последние годы экспорт российского угля непрерывно растет, причем на работу с углем перешли дальневосточные порты, изначально не приспособленные для отгрузки пылящих грузов. Перевалка угля открытым способом приводит к увеличению содержания твердых частиц в воздухе и различным экологическим проблемам. **Цель:** изучение и анализ содержания микроразмерных частиц в атмосферном воздухе и в смыве с

хвои в поселке Посыет (Приморский край), где работает крупный угольный терминал. **Методы.** Химический состав атмосферных взвесей был изучен непосредственно на поверхности хвои методом рентгенофлуоресцентного анализа и в смыве с проб хвои с помощью рамановской спектроскопии и энергодисперсионного анализа. Концентрации $PM_{2.5}$ и PM_{10} измеряли с помощью автоматических метеостанций. **Результаты и выводы.** Исследование показало, что в химическом составе преобладают частицы минералов (кальцит, силикаты и др.), но также отмечается наличие углеродсодержащих частиц (до 8,3 %) и частиц металлов. Усредненные данные по концентрации частиц $PM_{2.5}$ и PM_{10} находятся в пределах российских и зарубежных санитарных норм и правил, но подбираются к их верхним границам. Концентрации обеих измеренных фракций взвешенных частиц были наиболее высоки в зимние месяцы (а также в марте, который на Дальнем Востоке традиционно является холодным), затем наблюдалось их постепенное снижение. В исследовании получены новые данные о годовом ходе концентраций взвешенных в воздухе частиц $PM_{2.5}$ и PM_{10} , а также об основном составе частиц взвеси с поверхности древесной растительности (хвои) как индикаторе состояния загрязнения атмосферы в данном населенном пункте.

Ключевые слова: твердые частицы в атмосфере, загрязнение атмосферы, $PM_{2.5}$, PM_{10} , угольная пыль, тяжелые металлы

Для цитирования: Комплексная оценка содержания твердых частиц в атмосферном воздухе поселка, в порту которого ведется перевалка угля / А.С. Холодов, К.Ю. Кириченко, И.А. Вахнюк, П. Дуань, К.С. Голохваст // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 10. – С. 19–31. DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4491

Introduction

Russian coal exports to the Asia-Pacific region have grown steadily in recent years. Far Eastern ports, which were not originally equipped to handle dusty cargoes, have switched to coal. Coal handling operations cause air, water and soil pollution in areas adjacent to coal terminals. Large coal handling sites have a significant impact on the environment of urban areas as a whole, mainly on the composition of ambient particulate matter (PM) [1, 2].

Coal dust is one of the most potent air pollutants [3, 4]. Coal can contain more than 20 toxic and potentially toxic elements (Hg, As, Sb, Cd, Pb, etc.) [5, 6]. Coal dust can cause a number of chronic respiratory diseases, including pneumoconiosis, bronchitis, etc. [7, 8].

In general, the contribution of air pollution to the frequency and severity of the most common diseases of the respiratory system, digestive system, skin, allergic reactions, etc. is up to 30% of the total sum of factors affecting health [9, 10]. According to the World Health Organization (WHO), in 2016, 24% of all stroke deaths, 25% of coronary heart disease cases and deaths, 28% of lung cancer cases and deaths, and 43% of chronic obstructive pulmonary disease cases and deaths were related to air pollution [11, 12].

In addition, there is a statistically recognized relationship between airborne PM and morbidity and mortality [13]. PM (including coal particles) can be transported by wind far beyond the sanitary zones of industrial and storage areas [14]. Particles with diameters of 2.5 and 10 μm ($PM_{2.5}$ and PM_{10} , respectively) are often reported to pose a health risk [15–17].

These factors emphasize the important social and environmental role of continuous monitoring of air pollution for timely action to reduce the negative impact of coal dust on the environment.

This paper continues a series of works aimed at studying PM in the air and in other media (snow, surface of conifer needles) in cities and settlements of the Far Eastern region of Russia with the aim to single out the influence of various production processes on the environment and to work out a complex approach to the assessment of the content and concentration of PM, including further toxicological assessment on test objects and modeling the distribution of particles.

The site under study in this paper is the settlement of Posyet (Primorsky Krai), which has a large seaborne coal terminal. The settlement is located in a natural pristine environment, and the port infrastructure is not fully suitable for handling dusty bulk cargo, which contributes to the airborne migration of anthropogenic PM.

Using a combination of methods, we aimed to estimate PM concentration in the ambient air of the settlement and PM composition on the surface of conifer needles and in the dried washout from these needles. Conifer needle samples were chosen as the objects of study because they are available for sampling in any season and they accumulate a considerable amount of dust on their surface, which serves as a reliable medium for assessing air pollution [18–20]. The chemical composition was studied using Raman spectroscopy, X-ray fluorescence, and energy dispersion analysis. Concentrations of $PM_{2.5}$ and PM_{10} were measured using automatic monitoring stations.

Materials and Methods

Study area

The urban-type settlement Posyet is located in the Khasansky District of Primorsky Krai on the Novgorodsky Peninsula in the Posyet Gulf. Posyet has a monsoon climate with moderately cold winters and

humid summers. The bays Novgorodskaya, Ekspeditsii and Raid Pallada in the Posyet Gulf have a special nature protection status and scientific value. At the same time, the port of Posyet is the site of a large enterprise with an impact on the environment (a coal terminal). In 2016, the port capacity allowed for the handling of up to 12 million tonnes of coal per year [21], and the turnover is growing every year.

The port of Posyet was not originally designed to handle bulk cargo (including coal), and residential houses were built directly in front of the port (Fig. 1). Despite ongoing modernization of the port facilities, there are frequent reports in the public media of coal spillage and coal dust entering the bay. Due to the monsoon climate, humidity is very low in winter,

around 20–30%. The coal piles dry out and the wind spreads the dust, especially in winter, which we have previously observed during snow sampling and analysis in the settlement in 2018 [22].

The population of the settlement was about 1,650 people in 2021. AO Trade Port Posyet is the main employer in the area. According to the official data, 350 residents of the settlement work for the company.

Conifer needle samples

To study the ambient air pollution regardless of the season, we analyzed the washout from conifer tree needles. Due to their structure, conifer needles capture particulate matter on their surface and can be used as an indicator of ambient air quality [23, 24].

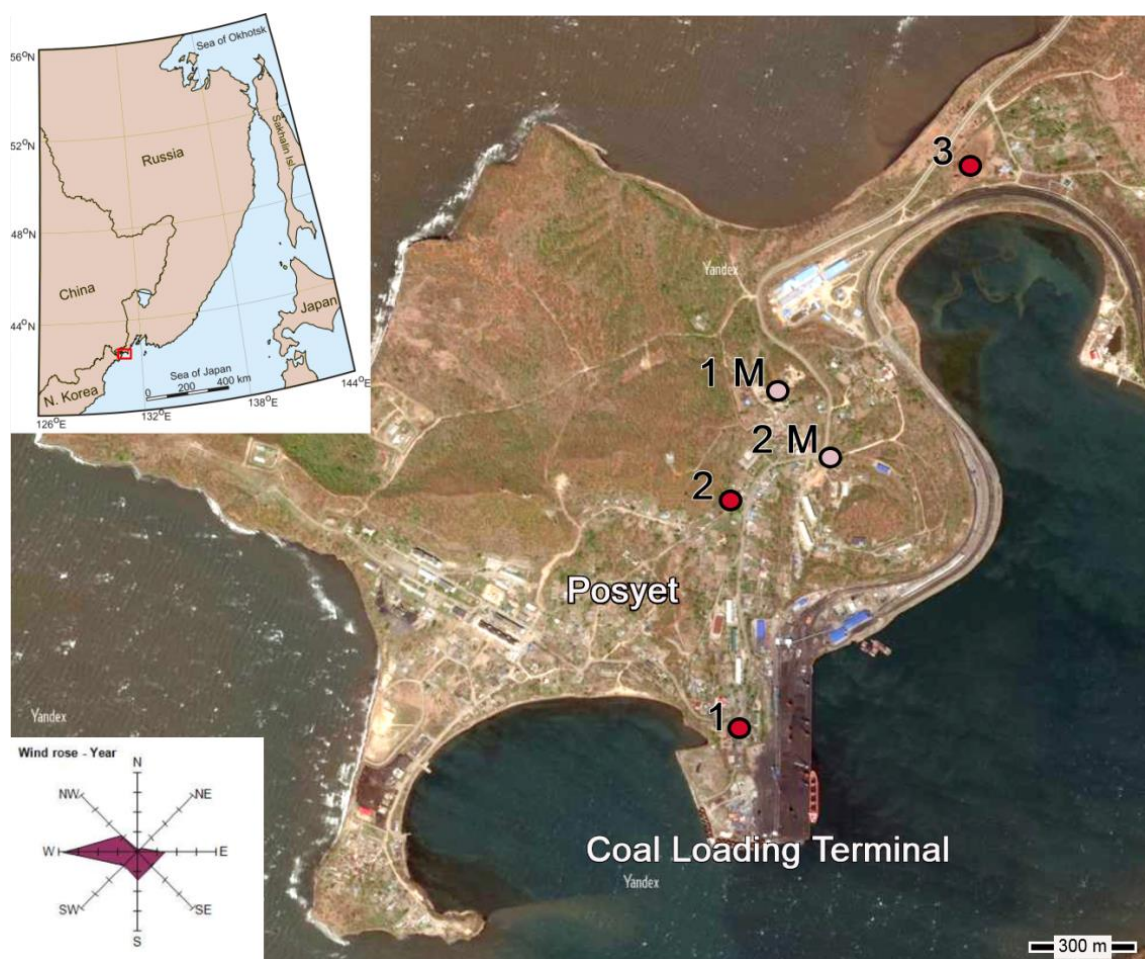


Fig. 1. Sampling area in Posyet settlement. Numbers 1–3 – conifer needle sampling sites: 1 – near the coal terminal (distance from the port 100 m); 2 – in the yard of a private house (distance from the port 400 m); 3 – along the road to the settlement, not far from the railway. Numbers 1 M and 2 M are the locations of automatic monitoring stations: 1 M – private house on a hill ($42^{\circ}39'31.5''\text{N}$ $130^{\circ}48'25.8''\text{E}$, distance from the port 680 m); 2 M – on top of a one-storey building at an intersection ($42^{\circ}39'24.6''\text{N}$ $130^{\circ}48'31.2''\text{E}$, distance from the port 500 m). Map data (c) Yandex

Рис. 1. Район отбора проб в п. Посыет. Номера 1–3 – точки отбора проб хвои: 1 – возле угольного терминала (расстояние до порта 100 м); 2 – во дворе частного жилого дома (расстояние до порта 400 м); 3 – вдоль автодороги к поселку, недалеко от железной дороги. Номера 1 М и 2 М – места размещения автоматических метеостанций: 1 М – частный жилой дом на возвышенности ($42^{\circ}39'31.5''\text{N}$ $130^{\circ}48'25.8''\text{E}$, расстояние до порта 680 м); 2 М – крыша одноэтажного строения на перекрестке ($42^{\circ}39'24.6''\text{N}$ $130^{\circ}48'31.2''\text{E}$, расстояние до порта 500 м). Картографические данные (с) Яндекс

Needles were collected from trees at a height of 1–1.5 m, placed in PET containers prewashed with distilled water, and transported to the laboratory. Samples 1 and 2 are from Manchurian fir (*Abies holophylla*) and Sample 3 is from Scots pine (*Pinus silvestris*). Conifer needle sampling points were chosen near the coal terminal (south), in the center of the settlement and near the railroad (north) to reflect all types of air pollution common for the settlement (Fig. 1).

To prepare the washout, we treated the needles with ultrasound using a method that has been previously tested in ambient PM analysis [24, 25]. The containers with sample needles were filled with double-distilled water and cleaned with ultrasound using a Sonopulse 3100 HD ultrasonic homogenizer (Bandelin electronic GmbH & Co. KG, Berlin, Germany) at 22 kHz, 100 watts, and a 5-min exposure time to remove the dust particles from the needles. The resulting liquid was filtered through a 0.22 μm Millipore filter, and then the filter was dried in an oven to obtain dry PM suitable for analysis.

Raman spectroscopy

The chemical composition of the dried sample material was determined by Raman spectroscopy using the Morphologi G3-ID instrument (Malvern Instruments Ltd., UK) at the Nanotechnology Laboratory of the Far Eastern Federal University (FEFU), Vladivostok. In this method, a beam of a specific wavelength passes through a sample of the studied material and scatters on contact with the sample. The resulting beams are focused into a single beam by a lens and then passed through a filter, which separates the weak Raman beams from the more intense ones. The 'pure' beams are amplified and sent to a detector which records their frequency.

The advantages of this method include the ability to determine the size and basic chemical composition of each individual particle in the sample by comparing its spectra with reference spectra from databases [26, 27]. For example, Raman spectroscopy can be used to identify different mineral phases in ordinary Portland cement without special sample preparation [28]. The content of reference substances in the collected PM samples was determined using chemical correlation analysis software (supplied with the instrument).

A total of 100,000 particles were scanned in each sample. Spectra of 200 particles of 5–10 μm diameter were then analyzed in manual mode and 400 particles of 20–25 μm diameter were analyzed in automatic mode. Statistical processing of the results was performed automatically in the software supplied with the instrument.

X-ray fluorescence analysis of the surface of conifer needles

The analysis of needle samples required a non-destructive method, so a portable X-ray fluorescence spectrometer Innov-X SyStemS (USA) was used. The XRF method collects and analyzes the spectrum produced when the material is irradiated with X-rays. The analysis was conducted at the Interdepartmental center for analytical control of the environment, FEFU, Vladivostok.

Imaging and microanalysis of particles

The elemental composition of the particles was also studied using an electron probe microanalyzer JXA 8100 (JEOL, Japan) equipped with three wave spectrometers and energy dispersive spectrometer INKA-sight (Oxford Instruments, UK). The studies were carried out in the secondary electrode (SE) mode to image the morphology of the particles in the samples and their surface topography, and in the reflected electron mode (BE COMPO), which has a different contrast depending on the average atomic number of the element. The study was carried out by Point and ID method. Metal-containing and coal particles were analyzed first of all, as the main task of this study was to detect coal. The choice of substances for the study was based on the results of X-ray fluorescence analysis of the samples. Quantitative and semi-quantitative analysis was carried out using the PhyRoZ method. The analytical studies were carried out in the Laboratory of Micro- and Nanoresearch, Far East Geological Institute, Far East Branch of the Russian Academy of Sciences (Vladivostok).

Measurement of $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} concentrations with automatic monitoring stations

Measurements were made using two automatic monitoring stations deployed in Posyet settlement, one in the yard of a private house surrounded by trees, and the other one at a road intersection, in a location presumably subject to higher air pollution levels (Fig. 1, 2). The locations were chosen to reflect both supposedly polluted and background areas. The monitoring stations measure air temperature, relative humidity, wind speed and direction, and concentrations of ambient $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} . Data from the automatic monitoring stations (averaged over 10 min) are transmitted via GSM/GPRS/EDGE/2G/3G communication channels to a remote FTP/HTML server with a frequency of 1–2 times per day. The stations of this design were previously used in a similar study in a larger port city that also handles coal [29].

In this work, the data received on the server from automatic monitoring stations from 20 January 2021 to 31 July 2021 were analyzed. The daily volume of data from each station was 144 records. Statistical analyses were performed using the STATISTICA 10 software package (StatSoft, Inc., USA). Mean and standard deviation were calculated for each set of values.



Fig. 2. Automatic monitoring station for the measurement of ambient air parameters, deployed at point 1 M
Рис. 2. Автоматическая метеостанция, установленная в точке 1 М

Results

Raman spectroscopy of particles in the dried washout from conifer needle samples

To compare the chemical composition of the samples, we took Raman spectra of the most common group of particles in the samples. The spectra were then compared to a library of common minerals and coals consisting of 347 spectra. The library included spectra of coal, calcite, silicates, apatite, alumina (corundum), fayalite, chrysoberyl, hydroxyapatite, zircon, enstatite, fluorite, lazurite, quartz, zeolite, azurite, carnelian, hedenbergite, galena, andradite etc.

Table 1. Chemical analysis of particles by Raman spectroscopy

Таблица 1. Химический анализ частиц по данным рамановской спектроскопии

Material Вещество	Material content in samples, % Содержание вещества в пробах, %		
	Sample/Проба		
	1	2	3
Calcite/Кальцит	87	82.1	89.1
Coal/Уголь	8.3	4.3	6
Silicate particles Силикатные частицы	3.6	9.3	4.1
Galena/Галенит (PbS)	0.8	2.7	0.7
Sphalerite Сфалерит (ZnS)	N/D не обнаруж.	0.9	N/D не обнаруж.

Chemical analysis of a selection of 200 particles for each sample showed the following correlation of the main minerals and coal particles (Table 1). The highest proportion of coal-containing particles (8.3%) was observed in the sample collected close to the port infrastructure.

X-ray fluorescence analysis of the surface of conifer needles

Samples from sampling points 2 and 3 were analyzed on an Innov-X SyStemS X-ray fluorescence spectrometer. Unfortunately, the sample from point 1 could not be analyzed by this method due to the fact that it was collected from a small stunted tree in the port area and there was only enough material for Raman analysis. The results are summarized in Table 2. The highest concentrations were found for Fe, Zn and Pb.

Studies on the Electron Probe Microanalyzer

Based on the results of the X-ray fluorescence analysis, it was decided to further analyze the 2nd and 3rd samples on an electron probe microanalyser, in search of particles of metal compounds and coal. The composition of both samples was visually similar under the microscope. Fig. 3 shows a typical section of the suspension from sample 2, including the energy dispersive composition of several metal-containing and coal particles. The chemical composition is summarized in Table 3.

Table 2. Composition of metals on the surface of needle samples from X-ray fluorescence analysis

Таблица 2. Состав металлов на поверхности проб хвои по данным рентгенофлуоресцентного анализа

Sample Проба	Element, mg/kg/Элемент, мг/кг															
	Ti	Cr	Mn	Fe	Zn	As	Pb	Sr	Cd	Sb	Ba	Co	Ni	Cu	Mo	Sn
2	2426	58.5	1882	32393	15110	1058	6974.6	413.6	25.6	77	434.5	105.4	131	1177	4.01	27.3
3	5866	153.8	1214	63550	1317.7	244.3	284.7	454.7	10.9	68.6	322.3	126.6	420.1	2715	8.03	30.8

Table 3. Chemical composition of the particles marked in Fig. 3, according to energy dispersive analysis, wt %

Таблица 3. Химический состав частиц, отмеченных на рис. 3, по данным энергодисперсионного анализа, вес. %

Element Элемент	Spectra/Спектр						
	12	13	14	15	16	17	19
O	3.6	17.07	14.81	19.51	1.89	4.15	15.56
Na	–	0.94	–	–	–	–	–
Mg	–	0.31	–	–	–	–	–
Al	0.18	3.54	0.6	0.55	0.26	0.3	0.79
Si	0.31	9.3	3.87	3.99	0.65	0.5	1.07
P	–	–	0.41	0.31	–	–	–
S	0.27	0.91	0.36	0.41	3.83	13.02	29.66
Cl	–	0.54	–	–	–	–	–
K	–	1.73	–	–	–	–	0.24
Ca	–	1.33	1.46	1.45	0.3	0.36	0.37
Ti	–	–	–	–	–	–	–
Mn	–	–	–	–	–	–	–
Fe	–	0.79	33.4	35.34	–	0.55	9.73
Cu	–	–	3.15	3	0.9	–	–
Zn	–	–	2.66	2.67	–	–	37.2
As	–	–	0.61	0.93	–	–	–
Pb	–	–	7.57	9.69	24.62	83.71	–
Bi	–	–	–	–	5.29	–	–

Concentrations of $PM_{2.5}$ and PM_{10}

Data on $PM_{2.5}$ and PM_{10} concentrations were averaged over months. According to the observations, the concentrations of both particulate matter fractions measured were highest in the winter months (as well as in March, which is traditionally cold in the Russian Far East), and then a gradual decrease was observed (Fig. 4).

Concentrations of $PM_{2.5}$ were within the range of $17.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ at both sites, with a mean of $12.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ at site 1 and $10.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ at site 2 for the whole period. The mean monthly values at the first site were slightly higher than those at the second site.

The mean concentration of PM_{10} was $36.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ at site 1 and $32 \mu\text{g}/\text{m}^3$ at site 2. The peak of PM_{10} was observed in March 2021, when the concentrations increased to $53.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (site 1) and $44.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (site 2).

Discussion

According to the results of the correlation analysis of Raman spectra (Table 1), most of the studied particles in the samples of dried washout from the surface of conifer needles in Posyet settlement (more than 80% in all samples) were calcite. Some amount of coal particles was present in all samples (from 4.3 to 8.3%). The remaining particles were silicates, particles containing Pb and Zn (probably as part of galena and sphalerite) and other impurities in small amounts.

These observations are confirmed by the results of the electron probe microanalysis study. In addition to calcite, there were many silicates, pieces of organic matter and irregularly shaped particles containing metals. Coal particles were found, but in small numbers. The small amount of coal in the samples could be related to the prevailing westerly winds, which carry coal dust from the terminal into the Posyet Gulf, polluting the water area. In addition, the dust suppression equipment used in the port washes some of the coal dust into the gulf.

This composition of the solid component of the ambient PM is typical for the cities and towns of the Primorsky Krai. However, the component of PM of natural origin varies from area to area, while the anthropogenic component is common to all areas of human activity and depends directly on the nature of this activity. The main stationary sources of ambient air pollution are heat and power facilities.

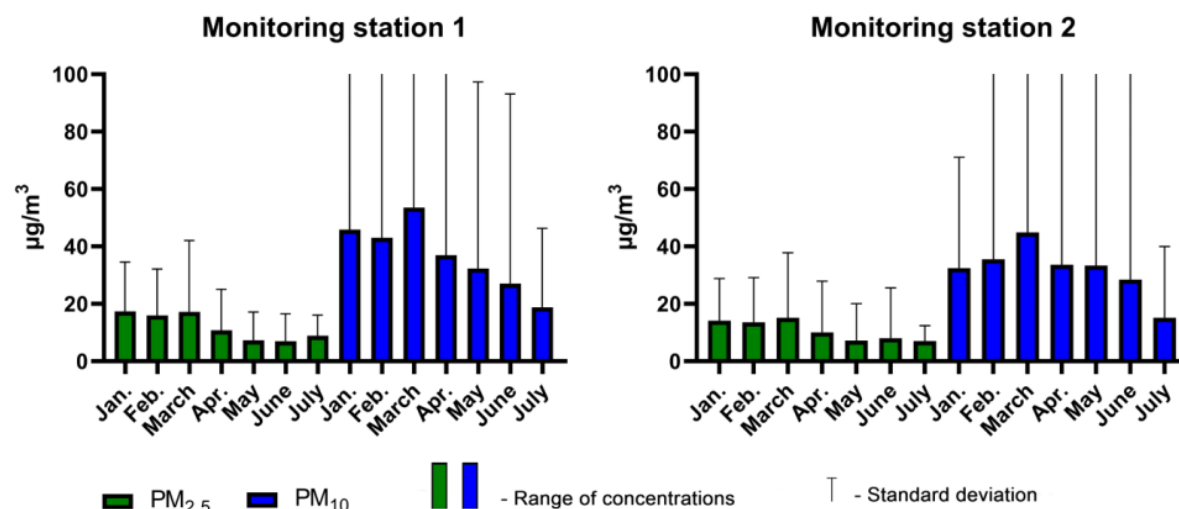


Fig. 4. Mean concentrations of $PM_{2.5}$ and PM_{10} in Posyet from January to July 2021 measured by the monitoring stations

Рис. 4. Средние концентрации частиц $PM_{2.5}$ и PM_{10} в п. Посьет за период с января по июль 2021 г. по данным измерений метеостанциями

The entire thermal energy production chain, from extraction to transport, processing of raw materials and energy production, is a source of polluting emissions that affect the population of both small settlements and large cities. Finding a correlation between particle composition and wind direction helps to link the origin of particles, their trajectories and their chemical composition. Aerosols that have travelled for a long time over rural areas are characterized by a high content of mineral particles. When airflows pass over densely populated areas, the amount of particles containing coal and soot and particles associated with exhaust gases increases [30].

In this case, the content of coal-containing particles in the samples is relatively low (up to 8.3%), which indicates that coal dust spreads beyond the sanitary protection zone but does not have a significant impact on PM in the ambient air of the settlement, except for the area adjacent to the port facilities. It is worth noting that winter snow samples collected near the port contained visible traces of coal dust contamination [22]. Other obvious sources of coal particles are boiler houses and stove heating. Due to the low number of cars in the settlement, motor traffic does not have a significant impact on ambient PM, in contrast to cities

and more developed settlements [31]. Calcite particles are most likely of natural origin (including waste shells from seashore) [32], while silicate particles include both natural and anthropogenic sources (round silicate particles may be the result of high temperature burning of all kinds of fuel) [33]. The mineral particles described above are most likely of natural origin, while other metal-containing particles (Cu, Fe, As) may originate from road traffic and also from fuel combustion.

In addition to the chemical composition of particulate matter, the second most important characteristic is its concentration in ambient air. We compared the mean concentrations of PM_{2.5} and PM₁₀ with the maximum 24-hour and annual concentration standards specified in the Russian and US (NAAQS) documents (Table 4) [34, 35].

The mean concentrations for the whole observation period can be compared with the annual concentration standards from the relevant documents. The mean PM_{2.5} concentrations from January to July 2021 (12.1 µg/m³ at station 1 and 10.7 µg/m³ at station 2) are well within the Russian standards (annual concentration), but at the upper end of the US NAAQS range (12 µg/m³).

Table 4. Comparison of PM_{2.5} and PM₁₀ concentrations in Posyet in January–July 2021 with the US and Russian standards

Таблица 4. Сопоставление концентраций взвешенных частиц PM_{2.5} и PM₁₀ в п. Посыет за период январь–июль 2021 г. С нормативами СанПиН 1.2.3685-21 и NAAQS (США)

Title Наименование	PM _{2.5} concentration (µg/m³) Концентрация взвешенных частиц PM _{2.5} (мкг/м³)		Title Наименование	PM ₁₀ concentration (µg/m³) Концентрация взвешен- ных частиц PM ₁₀ (мкг/м³)	
	Site 1	Site 2		Site 1	Site 2
	Точка № 1	Точка № 2		Точка № 1	Точка № 2
January/январь	17.4	14.1	January/январь	46.0	32.5
February/февраль	16.0	13.5	February/февраль	43.0	35.6
March/март	17.2	15.1	March/март	53.6	44.9
April/апрель	10.8	10.0	April/апрель	37.0	33.7
May/май	7.3	7.2	May/май	32.2	33.3
June/июнь	7.0	8.1	June/июнь	27.1	28.4
July/июль	8.9	7.0	July/июль	18.8	15.2
Mean concentration of PM _{2.5} in January– July 2021 Средняя концентрация частиц PM _{2.5} за период январь–июль 2021 г.	12.1	10.7	Mean concentration of PM ₁₀ in January–July 2021 Средняя концентрация частиц PM ₁₀ за период ян- варь–июль 2021 г.	36.8	32.0
Russian 24-hour concentration standard [21] Среднесуточная концентрация PM _{2.5} (СанПиН) [21]	35		Russian 24-hour concentration standard [21] Среднесуточная концен- трация PM ₁₀ (СанПиН) [21]	60	
Russian annual concentration standard [21] Среднегодовая концентрация PM _{2.5} (СанПиН) [21]	25		Russian annual concentration standard [21] Среднегодовая concentra- ция PM ₁₀ (СанПиН) [21]	40	
US 24-hour concentration standard [22] Среднесуточная концентрация PM _{2.5} по NAAQS (США) [22]	35		US 24-hour concentration standard [22] Среднесуточная концен- трация PM ₁₀ по NAAQS (США) [22]	150	
US annual concentration standard [22] Среднегодовая концентрация PM _{2.5} по NAAQS (США) [22]	12		N/A Отсутствует		

The mean PM_{10} concentrations over the whole period of observation ($36.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ at station 1 and $32.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ at station 2) were within the Russian standards (annual mean $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$). However, during the cold months PM_{10} content exceeded these values and reached $53 \mu\text{g}/\text{m}^3$, probably indicating the influence of boiler houses and stove heating.

These data correlate with our previous study (analysis of fresh snow cover), which showed that the area of Posyet settlement is under the influence of a major source of air pollution. The proportion of PM_{10} measured in thawed fresh snow, according to the results of this study, ranged from 15.4 to 45.3% (average 32.5%) [22].

It is known that there is a correlation between time of day and particle concentrations [36]. In this study, we did not find this correlation, but there were individual overshoots of particle concentrations at different times of day.

These data can also be compared with the results of a similar study carried out by the authors in the city of Nakhodka, which also has a coal handling facility in its port and is much larger than Posyet settlement [29]. There, too, a gradual decrease in PM concentrations was observed as the temperature outside the window increased. The maximum mean $PM_{2.5}$ concentration for the whole observation period (January–May 2021) there reached $17.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, and PM_{10} was $41.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$, which correlates with the data obtained in Posyet.

Conclusion

In this work we studied particulate matter in the air of Posyet settlement using a complex of methods. The chemical composition of particulate matter was studied in a washout of conifer needle samples using Raman spectroscopy and energy dispersive analysis.

Concentrations of $PM_{2.5}$ and PM_{10} were measured using automatic monitoring stations.

According to the ranges of PM content in the air of Posyet, averaged over months, the highest PM_{10} and $PM_{2.5}$ concentrations were observed in winter months, followed by a gradual decrease in concentrations at all monitoring sites. At the same time, the measured concentrations were within Russian and US standards.

In terms of chemical composition, particles of natural origin (calcite, a certain part of silicates) predominated in the samples, but coal particles (up to 8.3%) and metal-containing particles were also found. In addition to the coal handling activities of the port, the industrial component of ambient particulate matter in the settlement (measured in the washout from conifer needles) is affected by fuel combustion (boilers and stove heating).

From a practical point of view, this study has shown that this small settlement has medium to high concentrations of $PM_{2.5}$ – PM_{10} (as shown by instrumental measurements). In terms of health and hygiene, particles in this size range are the most dangerous for human health. However, most of the analyzed particles in the dried washout samples seem to be of natural origin, with the exception of particles near the port. A system for continuous monitoring of coal dust air pollution near the coal terminal in Posyet settlement is needed. It can be a network of sensors that will allow receiving daily accurate data on PM content in the air. With the help of such data, it will be possible to react promptly to the exceeding of the maximum permissible concentration of suspended particles in the air and to take timely decisions to reduce the negative impact on the environment.

REFERENCES

1. Rovira J., Schuhmacher M., Nadal M., Domingo J.L. Contamination by coal dust in the neighborhood of the Tarragona harbor (Catalonia, Spain): a preliminary study. *The Open Atmospheric Science Journal*, 2018, vol. 12, pp. 14–20. DOI: 10.2174/1874282301812010014.
2. Zhao D., Wang T., Han H. Approach towards sustainable and smart coal port development: the case of Huanghua port in China. *Sustainability*, 2020, vol. 12, 3924. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12093924>.
3. Ishtiaq M., Jehan N., Khan S.A., Muhammad S., Saddique U., Iftikhar B., Zahidullah. Potential harmful elements in coal dust and human health risk assessment near the mining areas in Cherat, Pakistan. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, vol. 25 (15), pp. 14666–14673. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1655-5>.
4. Rout T.K., Masto R.E., Padhy P.K., George J., Ram L.C., Maity S. Dust fall and elemental flux in a coalmining area. *Journal of Geochemical Exploration*, 2014, vol. 144, pp. 443–455. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2014.04.003>.
5. U.S. National Committee for Geochemistry. *Trace-Element geochemistry of coal resource development related to environmental quality and health*. Washington, National Academy Press, 1980. 153 p.
6. Zarubina N.V., Blokhin M.G., Ostapenko D.S., Chekryzhov I.Yu., Arbuzov S.I., Sudyko A.F. Analytical approaches to the quantitative determination of the chemical elements content in coals and coal rocks using ICP-MS and INAA methods. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, pp. 99–112. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2021/03/3105.
7. Laney A.S., Weissman D.N. Respiratory diseases caused by coal mine dust. *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 2014, vol. 56, pp. 18–22. DOI: 10.1097/JOM.0000000000000260.

8. Petsonk E.L., Rose C., Cohen R. Coal mine dust lung disease. New lessons from old exposure. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 2013, vol. 187, pp. 1178–1185. DOI: <https://doi.org/10.1164/rccm.201301-0042CI>.
9. Gilmundinov V.M., Kazantseva L.K., Tagayeva T.O., Kugaevskaya K.S. Environmental pollution and population health in Russian regions. *Region: Economics and Sociology*, 2013, vol. 1, pp. 209–228. (In Russ.)
10. Kiku P.F., Beniova S.N., Geltser B.I. *Habitat and ecologically dependent human diseases*. Vladivostok, Far Eastern Federal University, 2017. 390 p. (In Russ.)
11. *Noncommunicable diseases and air pollution*. WHO European high-level conference on noncommunicable diseases. World Health Organization. Ashgabat, 9–10 April 2019. 12 p. (In Russ.) Available at: <https://www.who.int/europe/publications/i/item/WHO-EURO-2019-3641-43400-60937> (Accessed 4 December 2023).
12. Prüss-Ustün A., van Deventer E., Mudu P., Campbell-Lendrum D., Vickers C., Ivanov I., Forastiere F., Gumy S., Dora C., Adair-Rohani H., Neira M. Environmental risks and non-communicable diseases. *BMJ*, 2019, vol. 364, l265. DOI: <https://doi.org/10.1136/bmj.l265>.
13. Chen J., Hoek G. Long-term exposure to PM and all-cause and cause-specific mortality: A systematic review and meta-analysis. *Environment International*, 2020, vol. 143, 105974. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105974>.
14. Leshukov T., Legoshchin K., Yakovenko O., Bach S., Russakov D., Dimakova D., Vdovina E., Baranova E., Avdeev K., Kolpina E., Oshchepkova K., Larionov A. Fractional composition and toxicity coal-rock of PM10–PM0.1 dust near an opencast coal mining area and coal-fired power station. *Sustainability*, 2022, vol. 14, 16594. DOI: <https://doi.org/10.3390/su142416594>.
15. Cui X., Zhou T., Shen Y., Rong Y., Zhang Z., Liu Y., Xiao L., Zhou Y., Li W., Chen W. Different biological effects of PM2.5 from coal combustion, gasoline exhaust and urban ambient air relate to the PAH/metal compositions. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 2019, vol. 69, pp. 120–128. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.etap.2019.04.006>.
16. Liang C.S., Duan F.K., He K.B., Ma Y.L. Review on recent progress in observations, source identifications and countermeasures of PM2.5. *Environment International*, 2016, vol. 86, pp. 150–170. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.10.016>.
17. Moreno T., Trechera P., Querol X., Lah R., Johnson D., Wrana A., Williamson B. Trace element fractionation between PM10 and PM2.5 in coal mine dust: implications for occupational respiratory health. *International Journal of Coal Geology*, 2019, vol. 203, pp. 52–59. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coal.2019.01.006>.
18. Sæbø A., Popek R., Nawrot B., Hanslin H.M., Gawronska H., Gawronski S.W. Plant species differences in particulate matter accumulation on leaf surfaces. *Science of the Total Environment*, 2012, vol. 427–428, pp. 347–354. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2012.03.084](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.03.084).
19. Zhang W., Wang B., Niu X. Relationship between leaf surface characteristics and particle capturing capacities of different tree species in Beijing. *Forests*, 2017, vol. 8, no. 3, Article 92. DOI: [10.3390/f8030092](https://doi.org/10.3390/f8030092).
20. Kholodov A., Tretyakova M., Golokhvast K. Using ultrasound-treated washout from conifer needles and fresh snow samples in air pollution monitoring. *The Scientific World Journal*, 2020, 3529437. DOI: <https://doi.org/10.1155/2020/3529437>.
21. Ermachenkov I. Muddy water, dusty sky. *Ecology and Law*, 2016, vol. 1 (61), pp. 28–31. (In Russ.)
22. Kholodov A., Lebedev A., Drozd V., Ugay S., Golokhvast K. Coal terminal in urban settlement Posyet (Primorsky Krai, Russia) causes micro-sized pollution of the atmosphere. *E3S Web Conf: IIIrd International Innovative Mining Symposium*, 2018, vol. 41, 02014. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184102014>.
23. Freer-Smith P.H., Beckett K.P., Taylor G. Deposition velocities to Sorbus aria, Acer campestre, Populus deltoides X trichocarpa 'Beaupré', Pinus nigra and X Cupressocyparis leylandii for coarse, fine and ultra-fine particles in the urban environment. *Environmental Pollution*, 2005, vol. 133, pp. 157–167. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2004.03.031>.
24. Kholodov A., Zakharenko A., Drozd V., Chernyshev V., Kirichenko K., Seryodkin I., Karabtsov A., Olesik S., Khvost E., Vakhnyuk I., Chaika V., Stratidakis A., Vinceti M., Sarigiannis D., Hayes A.W., Tsatsakis A., Golokhvast K. Identification of cement in atmospheric particulate matter using the hybrid method of laser diffraction analysis and Raman spectroscopy. *Heliyon*, 2020, vol. 6 (2), e03299. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03299>.
25. Kholodov A.S., Tarasenko I.A., Zinkova E.A., Teodoro M., Docea A.O., Calina D., Tsatsakis A., Golokhvast K.S. The study of airborne particulate matter in Dalnegorsk town. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, vol. 18, 9234. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph18179234>.
26. Ault A.P., Axson J.L. Atmospheric aerosol chemistry: spectroscopic and microscopic advances. *Analytical Chemistry*, 2017, vol. 89 (1), pp. 430–452. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.6b04670>.
27. Kholodov A.S., Golokhvast K.S. Complex research of the particles which cause air pollution by laser granulometry, Raman-spectrometry and IR-spectrometry. *Proc. SPIE*, 2016, 101760N. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2268229>.
28. Potgieter-Vermaak S.S., Potgieter J.H., Belleil M., DeWeerd F., Van Grieken R. The application of Raman spectrometry to the investigation of cement. Part II: A micro-Raman study of OPC, slag and fly ash. *Cement and Concrete Research*, 2006, vol. 36, pp. 663–670. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.09.010>.

29. Kholodov A., Kirichenko K., Vakhniuk I., Fatkulin A., Tretyakova M., Alekseiko L., Petukhov V., Golokhvast K. Measurement of PM_{2.5} and PM₁₀ concentrations in Nakhodka city with a network of automatic monitoring stations. *Aerosol and Air Quality Research*, 2022, vol. 22, 220040. DOI: <https://doi.org/10.4209/aaqr.220040>.
30. Tiwari S., Hopke P.K., Pipal A.S., Srivastava A.K., Bisht D.S., Tiwari S., Singh A.K., Soni V.K., Attri S.D. Intra-urban variability of particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀) and its relationship with optical properties of aerosols over Delhi, India. *Atmospheric Research*, 2015, vol. 166, pp. 223–232. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.07.007>.
31. Pant P., Harrison R.M. Estimation of the contribution of road traffic emissions to particulate matter concentrations from field measurements: A review. *Atmospheric Environment*, 2013, vol. 77, pp. 78–97. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.04.028>.
32. Hossein A.M., Wimonlak S. Biogenic calcium carbonate derived from waste shells for advanced material applications: a review. *Frontiers in Materials*, 2022, vol. 9. DOI: 10.3389/fmats.2022.1024977.
33. Grebennikov A.V. Endogene spherules of Cretaceous-Paleogene ignimbrite complexes of Yakutinskaya volcano-tectonic structure (Primorye). *Proceedings of the Russian Mineralogical Society*, 2011, vol. 140, no. 3, pp. 56–68. (In Russ.)
34. SanPiN 1.2.3685-21. *Hygienic standards and requirements for the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans*. Moscow, 2021. 469 p. (In Russ.)
35. *National Ambient Air Quality Standards (NAAQS) for PM*. Washington, Environmental Protection Agency, 2020. Available at: <https://www.epa.gov/pm-pollution/national-ambient-air-quality-standards-naaqs-pm> (accessed 4 December 2023).
36. Brzezina J., Kőbölővá K., Adamec V. Nanoparticle number concentration in the air in relation to the time of the year and time of the day. *Atmosphere*, 2020, vol. 11 (5), 523. DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos11050523>.

Information about the authors

Aleksei S. Kholodov, Cand. Sc., Senior Researcher, Far East Geological Institute FEB RAS, 159, 100-letiya Vladivostoka avenue, Vladivostok, 690022, Russian Federation. alex.holodov@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-6916-0596>

Konstantin Yu. Kirichenko, Cand. Sc., Senior Researcher, Siberian Federal Scientific Center of Agrobiotechnology RAS, 2b, Tsentralnaya street, Krasnoobsk, 630501, Russian Federation. kirichenko@sfsca.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2715-3758>

Igor A. Vakhniuk, Junior Researcher, Siberian Federal Scientific Center of Agrobiotechnology RAS, 2b, Tsentralnaya street, Krasnoobsk, 630501, Russian Federation. vakhniuk@sfsca.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4530-2577>

Piaopiao Duan, PhD, Associate Professor, China University of Mining and Technology, 1, Daxue Road, Xuzhou, Jiangsu, 221116, China. duanpiaopiao@163.com

Kirill S. Golokhvast, Dr. Sc., Professor, Director, Siberian Federal Scientific Center of Agrobiotechnology RAS, 2b, Tsentralnaya street, Krasnoobsk, 630501, Russian Federation. golokhvast@sfsca.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4873-2281>

Received: 04.12.2023

Revised: 19.02.2024

Accepted: 09.09.2024

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Contamination by coal dust in the neighborhood of the Tarragona harbor (Catalonia, Spain): a preliminary study / J. Rovira, M. Schuhmacher, M. Nadal, J.L. Domingo // *The Open Atmospheric Science Journal*. – 2018. – Vol. 12. – P. 14–20. DOI: 10.2174/1874282301812010014.
2. Zhao D., Wang T., Han H. Approach towards sustainable and smart coal port development: the case of Huanghua port in China // *Sustainability*. – 2020. – Vol. 12. – 3924. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12093924>.
3. Potential harmful elements in coal dust and human health risk assessment near the mining areas in Cherat, Pakistan / M. Ishtiaq, N. Jehan, S.A. Khan, S. Muhammad, U. Saddique, B. Iftikhar, Zahidullah // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2018. – Vol. 25. – № 15. – P. 14666–14673. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1655-5>.
4. Dust fall and elemental flux in a coalmining area / T.K. Rout, R.E. Mastro, P.K. Padhy, J. George, L.C. Ram, S. Maity // *Journal of Geochemical Exploration*. – 2014. – Vol. 144. – P. 443–455. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2014.04.003>.
5. U.S. National Committee for Geochemistry. Trace-Element geochemistry of coal resource development related to environmental quality and health. – Washington: National Academy Press, 1980. – 153 p.
6. Аналитические подходы к количественному определению содержаний химических элементов в углях и углистых породах с использованием методов ИСП-МС и ИНАА / Н.В. Зарубина, М.Г. Блохин, Д.С. Остапенко, И.Ю. Чекрызов, С.И. Арбузов, А.Ф. Судыко // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2021. – Т. 332. – № 3. – С. 99–112 DOI: 10.18799/24131830/2021/03/3105.

7. Laney A.S., Weissman D.N. Respiratory diseases caused by coal mine dust // *Journal of Occupational and Environmental Medicine*. – 2014. – Vol. 56. – P. 18–22. DOI: 10.1097/JOM.0000000000000260.
8. Petsonk E.L., Rose C., Cohen R. Coal mine dust lung disease. New lessons from old exposure // *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*. – 2013. – Vol. 187. – P. 1178–1185. DOI: <https://doi.org/10.1164/rccm.201301-0042CI>.
9. Влияние загрязнения окружающей среды на здоровье населения регионов России / В.М. Гильмуллин, Л.К. Казанцева, Т.О. Тагаева, К.С. Кугаевская // *Регион: экономика и социология*. – 2013. – № 1. – С. 209–228.
10. Кику П.Ф., Бениова С.Н., Гельцер Б.И. Среда обитания и экологозависимые заболевания человека: монография. – Владивосток: Дальневост. федерал. ун-т, 2017. – 390 с.
11. Неинфекционные заболевания и загрязнение атмосферного воздуха: Европейская конференция ВОЗ высокого уровня по неинфекционным заболеваниям. Всемирная организация здравоохранения. – Ашхабад, Туркменистан, 9–10 апреля 2019. – 12 с. URL: <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/346418/WHO-EURO-2019-3641-43400-60938-rus.pdf?sequence=1> (дата обращения 4.12.2023).
12. Environmental risks and non-communicable diseases / A. Prüss-Ustün, E. van Deventer, P. Mudu, D. Campbell-Lendrum, C. Vickers, I. Ivanov, F. Forastiere, S. Gumy, C. Dora, H. Adair-Rohani, M. Neira // *BMJ*. – 2019. – Vol. 364. – l265. DOI: <https://doi.org/10.1136/bmj.l265>.
13. Chen J., Hoek G. Long-term exposure to PM and all-cause and cause-specific mortality: a systematic review and meta-analysis // *Environment International*. – 2020. – Vol. 143. – 105974. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105974>.
14. Fractional composition and toxicity coal-rock of PM10–PM0.1 dust near an opencast coal mining area and coal-fired power station / T. Leshukov, K. Legoshchin, O. Yakovenko, S. Bach, D. Russakov, D. Dimakova, E. Vdovina, E. Baranova, K. Avdeev, E. Kolpina, K. Oshchepkova, A. Larionov // *Sustainability*. – 2022. – Vol. 14. – 16594. DOI: <https://doi.org/10.3390/su142416594>.
15. Different biological effects of PM2.5 from coal combustion, gasoline exhaust and urban ambient air relate to the PAH/metal compositions / X. Cui, T. Zhou, Y. Shen, Y. Rong, Z. Zhang, Y. Liu, L. Xiao, Y. Zhou, W. Li, W. Chen // *Environmental Toxicology and Pharmacology*. – 2019. – Vol. 69. – P. 120–128. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.etap.2019.04.006>.
16. Review on recent progress in observations, source identifications and countermeasures of PM2.5 / C.S. Liang, F.K. Duan, K.B. He, Y.L. Ma // *Environment International*. – 2016. – Vol. 86. – P. 150–170. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.10.016>.
17. Trace element fractionation between PM10 and PM2.5 in coal mine dust: implications for occupational respiratory health / T. Moreno, P. Trechera, X. Querol, R. Lah, D. Johnson, A. Wrana, B. Williamson // *International Journal of Coal Geology*. – 2019. – Vol. 203. – P. 52–59. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coal.2019.01.006>.
18. Plant species differences in particulate matter accumulation on leaf surfaces / A. Sæbø, R. Popek, B. Nawrot, H.M. Hanslin, H. Gawronska, S.W. Gawronski // *Science of the Total Environment*. – 2012. – Vol. 427–428. – P. 347–354. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2012.03.084.
19. Zhang W., Wang B., Niu X. Relationship between leaf surface characteristics and particle capturing capacities of different tree species in Beijing // *Forests*. – 2017. – Vol. 8. – № 3. – Article 92. DOI: 10.3390/f8030092.
20. Kholodov A., Tretyakova M., Golokhvast K. Using ultrasound-treated washout from conifer needles and fresh snow samples in air pollution monitoring // *The Scientific World Journal*. – 2020. – Article 3529437. DOI: <https://doi.org/10.1155/2020/3529437>.
21. Ермаченков И. Мутная вода, пыльное небо // *Экология и право*. – 2016. – № 1 (61). – С. 28–31.
22. Coal terminal in urban settlement Posyet (Primorsky Krai, Russia) causes micro-sized pollution of the atmosphere / A. Kholodov, A. Lebedev, V. Drozd, S. Ugay, K. Golokhvast // *E3S Web Conf: IIIrd International Innovative Mining Symposium*. – 2018. – Vol. 41. – 02014. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184102014>.
23. Freer-Smith P.H., Beckett K.P., Taylor G. Deposition velocities to Sorbus aria, Acer campestre, Populus deltoides X trichocarpa 'Beaupré', Pinus nigra and X Cupressocyparis leylandii for coarse, fine and ultra-fine particles in the urban environment // *Environmental Pollution*. – 2005. – Vol. 133. – P. 157–167. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2004.03.031>.
24. Identification of cement in atmospheric particulate matter using the hybrid method of laser diffraction analysis and Raman spectroscopy / A. Kholodov, A. Zakharenko, V. Drozd, V. Chernyshev, K. Kirichenko, I. Seryodkin, A. Karabtsov, S. Olesik, E. Khvost, I. Vakhnyuk, V. Chaika, A. Stratidakis, M. Vinceti, D. Sarigiannis, A.W. Hayes, A. Tsatsakis, K. Golokhvast // *Heliyon*. – 2020. – Vol. 6. – № 2. – e03299. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03299>.
25. The study of airborne particulate matter in Dalnegorsk town / A.S. Kholodov, I.A. Tarasenko, E.A. Zinkova, M. Teodoro, A.O. Docea, D. Calina, A. Tsatsakis, K.S. Golokhvast // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. – 2021. – Vol. 18. – 9234. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph18179234>.
26. Ault A.P., Axson J.L. Atmospheric aerosol chemistry: spectroscopic and microscopic advances // *Analytical Chemistry*. – 2017. – Vol. 89. – № 1. – P. 430–452. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.6b04670>.
27. Kholodov A.S., Golokhvast K.S. Complex research of the particles which cause air pollution by laser granulometry, Raman-spectrometry and IR-spectrometry // *Proc. SPIE*. – 2016. – 101760N. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2268229>.
28. The application of Raman spectrometry to the investigation of cement. Part II: A micro-Raman study of OPC, slag and fly ash / S.S. Potgieter-Vermaak, J.H. Potgieter, M. Belleil, F. DeWeerd, R. van Grieken // *Cement and Concrete Research*. – 2006. – Vol. 36. – P. 663–670. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.09.010>.
29. Measurement of PM2.5 and PM10 concentrations in Nakhodka city with a network of automatic monitoring stations / A. Kholodov, K. Kirichenko, I. Vakhniuk, A. Fatkulin, M. Tretyakova, L. Alekseiko, V. Petukhov, K. Golokhvast // *Aerosol and Air Quality Research*. – 2022. – Vol. 22. – 220040. DOI: <https://doi.org/10.4209/aaqr.220040>.
30. Intra-urban variability of particulate matter (PM2.5 and PM10) and its relationship with optical properties of aerosols over Delhi, India / S. Tiwari, P.K. Hopke, A.S. Pipal, A.K. Srivastava, D.S. Bisht, S. Tiwari, A.K. Singh, V.K. Soni, S.D. Attri // *Atmospheric Research*. – 2015. – Vol. 166. – P. 223–232. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.07.007>.

31. Pant P., Harrison R.M. Estimation of the contribution of road traffic emissions to particulate matter concentrations from field measurements: a review // *Atmospheric Environment*. – 2013. – Vol. 77. – P. 78–97. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.04.028>.
32. Hossein A.M., Wimonlak S. Biogenic calcium carbonate derived from waste shells for advanced material applications: a review // *Frontiers in Materials*. – 2022. – Vol. 9. DOI: 10.3389/fmats.2022.1024977.
33. Гребенников А.В. Эндогенные сферулы мел-палеогеновых игнимбритовых комплексов Якутинской вулканотектонической структуры (Приморье) // *Записки Российского минералогического общества*. – 2011. – Т. 140. – №. 3. – С. 56–68.
34. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. – М., 2021. – 469 с.
35. National Ambient Air Quality Standards (NAAQS) for PM. – Washington: Environmental Protection Agency, 2020. URL: <https://www.epa.gov/pm-pollution/national-ambient-air-quality-standards-naaqs-pm> (дата обращения 04.12.2023).
36. Brzezina J., Köbölóvá K., Adamec V. Nanoparticle number concentration in the air in relation to the time of the year and time of the day // *Atmosphere*. – 2020. – Vol. 11. – № 5. – 523. DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos11050523>.

Информация об авторах

Алексей Сергеевич Холодов, кандидат географических наук, старший научный сотрудник, Дальневосточный геологический институт Дальневосточного отделения РАН, Россия, 690022, г. Владивосток, пр. 100-летия Владивостока, 159. alex.holodov@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-6916-0596>

Константин Юрьевич Кириченко, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий РАН, Россия, 630501, п. Краснообск, ул. Центральная, 26. kirichenko@sfsc.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2715-3758>

Игорь Анатольевич Вахнюк, младший научный сотрудник, Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий РАН, Россия, 630501, п. Краснообск, ул. Центральная, 26. vakhniuk@sfsc.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4530-2577>

Пяопяо Дуань, PhD, доцент, Китайский горно-технологический университет, Китайская Народная Республика, 221116, г. Сюйчжоу, Цзянсу, Дасюэ Роуд, 1. duanpiaoriao@163.com

Кирилл Сергеевич Голохваст, доктор биологических наук, профессор, директор, Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий РАН, Россия, 630501, п. Краснообск, ул. Центральная, 26. golokhvast@sfsc.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4873-2281>

Поступила в редакцию: 04.12.2023

Поступила после рецензирования: 19.02.2024

Принята к публикации: 09.09.2024

УДК 621.181
DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4778
Шифр специальности ВАК: 1.3.14

Влияние изменения нагрузки котельного агрегата на топочные процессы

А.В. Гиль¹✉, К.И. Мальцев¹, Н.В. Абрамов¹, А.С. Заворин¹, А.В. Старченко²

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

² Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия, г. Томск

✉ Angil@tpu.ru

Аннотация. *Актуальность* исследования обусловлена необходимостью оценки стабильности горения, теплового напряжения и эмиссии оксидов азота (NO_x) при снижении нагрузки парового котла. Поскольку в перспективе большее внимание будет уделяться возобновляемым источникам энергии и АЭС, то угольные ТЭС будут работать на пониженных нагрузках, поэтому важно исследовать надежность эксплуатации и экологические параметры котельного агрегата при регулировании нагрузки. *Цель:* исследование выгорания пылеугольного топлива, температурных параметров и эмиссии NO_x при снижении нагрузки котельного агрегата до 50 % в базовой компоновке и с учетом наличия сопел третичного дутья. *Объекты:* топочная камера котельного агрегата с естественной циркуляцией паропроизводительностью 220 т/час в базовой компоновке и с соплами третичного дутья. *Методы.* Применен пакет прикладных программ FIRE-3D для численного исследования. Горение пылеугольного топлива является сложным физико-химическим процессом, поэтому взаимодействие газового потока и твердых частиц моделировалось с использованием эйлеровой и лагранжевой схем соответственно. В газовой фазе моделируется выгорание летучих веществ и СО с дальнейшим догоранием углеродного остатка. Прогноз эмиссии NO_x моделировался с помощью моделей постобработки, включающих образование быстрых, топливных и термических оксидов азота. *Результаты.* Получены поля температур, характеристики потока, выбросов NO_x для различных нагрузок топочной камеры котельного агрегата паропроизводительностью 220 т/час на основе численного моделирования. Получены количественные оценки параметров топочной среды, соответствующие нескольким уровням снижения нагрузки котла вплоть до 50 % от номинальной. Установка четырех сопел третичного дутья позволяет снизить выбросы NO_x на 12,75 % при теоретически необходимом количестве воздуха в горелочных устройствах ($\alpha=1,0$).

Ключевые слова: топочная камера, пылеугольное топливо, вихревые горелки, численное моделирование, нагрузка

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00274, <https://rscf.ru/project/23-29-00274>.

Для цитирования: Влияние изменения нагрузки котельного агрегата на топочные процессы / А.В. Гиль, К.И. Мальцев, Н.В. Абрамов, А.С. Заворин, А.В. Старченко // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 10. – С. 32–42. DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4778

UDC 621.181
DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4778

Impact of boiler unit load changes on furnace processes

A.V. Gil¹✉, K.I. Maltsev¹, N.V. Abramov¹, A.S. Zavorin¹, A.V. Starchenko²

¹ National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

² National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

✉ andgil@tpu.ru

Abstract. Relevance. The need to assess the stability of combustion, thermal stress and nitrogen oxides (NO_x) emission during load reduction of a steam boiler. Since renewable energy sources and nuclear power plants will receive great attention in the future, coal-fired thermal power plants are to operate at reduced loads, so it is important to investigate the reliability of operation and environmental parameters of the boiler unit in case of load adjustment. **Aim.** To investigate pulverized coal fuel burnout, temperature parameters and NO_x emission at 50% reduction of boiler unit load in the base configuration and taking into account installation of tertiary blast nozzles. **Objects.** Furnace chamber of a natural circulation boiler unit with steam capacity of 220 t/h in the baseline layout and with tertiary air nozzles. **Methods.** The package of application programs FIRE-3D for numerical study was applied. Combustion of pulverized coal fuel is a complex physical and chemical process, therefore the interaction of gas flow and solid particles was modeled using Eulerian and Lagrangian schemes, respectively. In the gas phase, the combustion of volatiles and CO with further combustion of carbon residue are modeled. NO_x emission is modeled using post-treatment models including formation of fast, fuel and thermal nitrogen oxides. **Results.** Temperature fields, flow characteristics, NO_x emissions for different loads of the furnace chamber of the boiler unit with steam capacity of 220 t/hour are obtained on the basis of numerical modeling. The authors have obtained quantitative estimations of furnace environment parameters corresponding to several levels of boiler load reduction up to 50% of the nominal one. Installation of four tertiary blast nozzles allows reducing NO_x emissions by 12.75% at theoretically required amount of air in burner devices ($\alpha=1.0$).

Keywords: furnace chamber, pulverized coal fuel, vortex burners, numerical modeling, load

Acknowledgements: The research was carried out under the support of the grant of the Russian Science Foundation (Project no. 23-29-00274, <https://rscf.ru/project/23-29-00274>).

For citation: Gil A.V., Maltsev K.I., Abramov N.V., Zavorin A.S., Starchenko A.V. Impact of boiler unit load changes on furnace processes. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 10, pp. 32–42. DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4778

Введение

Угольные электростанции генерируют около 25 % мирового производства электроэнергии [1], а в странах СНГ этот показатель составляет от 20 до 70 % [2]. Пылеугольные котлы с факельным сжиганием широко распространены и используются на большинстве угольных электростанций благодаря своей высокой эффективности и хорошей технологической организации сгорания топлива. На протяжении всей своей истории данные установки подвергались постоянному совершенствованию и по мере эволюции повышались параметры эффективности, а также экологические составляющие работы.

Развитие топливно-энергетического комплекса ставит новые задачи перед угольной энергетикой, в частности, развитие возобновляемой энергетики вынуждает угольные электростанции сталкиваться с несвойственными ранее функциями и принимать меры по регулированию нагрузок в сети [3]. Существующие электростанции спроектированы для работы в базовом графике нагрузки и не могут эффективно работать с быстрыми темпами повышения или понижения мощности, а также в условиях нагрузки ниже минимального порога. Длительное отклонение от проектных условий порождает ряд проблем для пылеугольных котлов. Кроме наиболее распространенных проблем при работе с малой мощностью, таких как затруднения в обеспечении перегрева пара и шлакование поверхностей нагрева, данные агрегаты сталкиваются также со снижением эффективности сгорания и увеличением выбросов NO_x . При этом отсутствуют теоретические рекомендации и технологическая поддержка для

работы с переменной нагрузкой. А разработанные режимные карты не всегда соответствуют возможности долговременного эффективного несения пониженной нагрузки.

Для исследования процессов, происходящих в пылеугольных котлах при работе в различных режимах, как альтернативу натурным экспериментам возможно применение вычислительной гидродинамики, поскольку данный метод позволяет исследовать все необходимые аспекты работы наименее ресурсоемким способом.

Численное моделирование успешно применяется для исследований пылеугольных котлов с факельным сжиганием, охватывая различные аспекты, такие как взаимодействие газовой фазы и твердых частиц [4, 5], отклонение температуры [6–9], а также полнота сгорания и выбросы NO_x [10–12]. Однако стоит отметить, что относительно небольшое количество исследований посвящено изучению сжигания угля и снижению выбросов NO_x при работе на низкой или переменной нагрузке.

К примеру, в статье [13] рассматривается влияние режимов воздушораспределения и несения нагрузки на процесс сжигания топлива в котле. Для экспериментального и имитационного анализа в исследовании использован котел мощностью 200 МВт, в котором изучалась регулировка подачи третичного и вторичного воздуха для снижения выбросов оксидов азота. Методы включают испытания в холодном состоянии и моделирование для анализа воздушного потока и эффективности сгорания, при этом результаты показывают значительное снижение концентрации NO_x при различных

условиях нагрузки и распределения воздуха. Исследование подчеркивает важность оптимизации распределения воздуха при изменении нагрузки для повышения тепловой эффективности и снижения выбросов в угольных котлах.

В работе [14] разработана трехмерная модель для прогнозирования сложного процесса в двухфазных турбулентных потоках в котле с тангенциальным расположением горелок. В результате правильно предсказано влияние различных рабочих условий (выключение горелок и изменение нагрузки котла) на процессы горения.

Исследование [11] сосредоточено на анализе работы котла на низкой нагрузке, по мнению авторов этого исследования, использование численных методов в котлах, работающих на пылеугольном топливе, позволяет достичь высокого понимания сложных газодинамических процессов, обоснованно прогнозировать различные макроскопические явления и рассмотреть большое количество вариантов для оптимизации работы систем преобразования энергии.

В исследованиях [15, 16] изучена стабильность горения и характеристики выбросов NO_x для условий работы с различной нагрузкой в пылеугольных котлах разной мощности. При использовании математических моделей построена численная модель, удовлетворяющая характеристикам реального прототипа, проведены сравнения и оценка ключевых параметров, таких как поле скоростей, температура, состав газа в топке и выбросы NO_x на выходе из котла. Основываясь на оптимальном расположении горелки и соотношении подачи воздуха, авторы сопоставили влияние характеристик сгорания при различных значениях избытка воздуха. Установлено, что высокий избыток воздуха увеличивал количество NO_x , в то время как температура горения в камере сгорания значительно снижалась.

Также особое внимание уделяется перераспределению воздуха как в основных горелочных устройствах [17], так и между основными горелочными устройствами и соплами третичного дутья, устанавливаемыми выше горелок, с целью выявления изменений в топочных процессах при изменении нагрузки для обеспечения надежной, энергоэффективной и экологичной работы котлов [18, 19].

В соответствии с вышеизложенным и тенденциями публикуемых исследований в данной работе рассмотрены изменения гидродинамики, выгорания полифракционного пылеугольного топлива, концентраций составляющих веществ газовой фазы в объеме топочной камеры парового котла при изменении нагрузки от 100 до 50 %. Наряду с этим проведен анализ топочных процессов при наличии сопел третичного дутья.

Объект исследования

Рассмотрен котельный агрегат П-образной компоновки, работающий на каменном кузнецком угле марки Д, с номинальными параметрами: паропроизводительность 220 т/час, давление пара 9,8 МПа, температура перегретого пара 540 °С. Топочная камера имеет форму прямоугольной призмы с размерами в сечении 9536×6656 мм, высотой 22800 мм (рис. 1), сформирована вертикальными трубными экранными поверхностями с естественной циркуляцией. В нижней части топки располагается холодная воронка для выхода твердого шлака, в верхней части на тыльном экране выполнен аэродинамический выступ для улучшения аэродинамики газового потока на выходе из топки и для частичного затенения ширмового пароперегревателя.

Вихревые горелочные устройства располагаются на боковых стенах, по три на каждой стене. Горелки установлены по углам треугольника вершиной вниз (рис. 1, а). С целью уменьшения присосов горелочные устройства приварены к экранным поверхностям и при тепловых расширениях перемещаются вместе с ними.

Пылеугольное топливо подается в горелочные устройства пылепитателями из бункера пыли и далее транспортируется первичным воздухом, поступающим в центральный кольцевой канал и образуя на выходе закрученный пылевоздушный поток. Вторичный воздух проходит через периферийный кольцевой канал с лопаточным завихрителем.

С целью снижения генерации NO_x рассматривается модифицированный вариант топочной камеры с учетом сопел третичного дутья, установленных над основными горелками (рис. 1, б). На высотной отметке 10900 мм установлены четыре сопла, по два на каждой из боковых стен. Размеры выходного сечения каждого из сопел составляют 500×242 мм.

Кузнецкий уголь марки Д широко распространен на ТЭС отечественного энергетического комплекса, поскольку имеет умеренную зольность и влажность при высоком выходе летучих веществ, что обеспечивает устойчивое воспламенение на номинальной нагрузке. Теплотехнические характеристики кузнецкого угля на рабочую массу представлены в таблице.

Таблица. Теплотехнические характеристики угля

Table. Thermotechnical specifications of coal

Параметр/Parameter	Значение/Value
Зольность/Ash content, %	10,2
Влажность/Moisture content, %	17,6
Содержание углерода/Carbon content, %	56
Содержание водорода/Hydrogen content, %	4
Содержание кислорода/Oxygen content, %	10
Содержание серы/Sulfur content, %	0,3
Содержание азота/Nitrogen content, %	1,9
Теплота сгорания, МДж/кг/Calorific value, MJ/kg	20,72

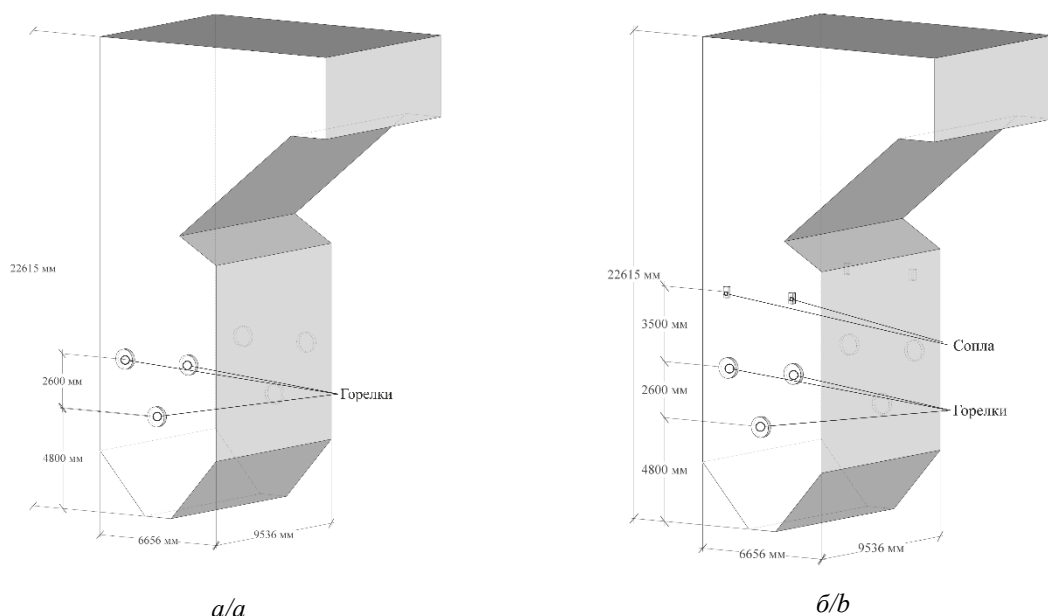


Рис. 1. Геометрическая модель топочной камеры: а) базовая компоновка; б) с соплами третичного дутья
Fig. 1. Geometric model of the furnace chamber: a) base layout; b) with tertiary air nozzles

Математическая модель

В представленной работе для анализа газовой фазы и горения твердых частиц на основе численного моделирования используется эйлерово-лагранжев подход, а взаимодействие между фазами прогнозируется с использованием метода двусторонней связи. Для газовой фазы это описывается усредненными по времени уравнениями Навье–Стокса для глобальной массы, импульса, энтальпии и массовой доли частиц в эйлеровой системе координат [20]. Для связи скорости и давления в уравнениях Навье–Стокса используется SIMPLE-алгоритм [21], а для описания этих уравнений используется стандартная k - ϵ турбулентная модель.

Эти методы включают как классический подход усреднения по времени уравнений Навье–Стокса, так и более современный подход условного усреднения. При использовании методов замыкания момента модель турбулентности используется для обеспечения замыкания напряжений Рейнольдса в уравнениях количества движения, а модель горения – для получения усредненных по времени скоростей реакции в уравнениях непрерывности для частиц и энергии. Модель турбулентности k - ϵ является наиболее широко используемой моделью для получения напряжений Рейнольдса [22, 23]. В этой модели решаются два уравнения переноса, аналогичные другим уравнениям движения: одно для турбулентной кинетической энергии (k), а другое для скорости диссипации (ϵ) кинетической энергии. Значения k и ϵ используются с несколькими константами пропорциональности для расчета локальных значений вихревой вязкости.

Фазовое движение частиц рассчитывается по второму закону Ньютона в лагранжевой схеме [24],

а метод стохастического слежения Лагранжа используется для расчета индивидуальных траекторий дисперсных частиц пылевидного угля [25].

В качестве механизма деволатилизации принята односкоростная модель типа Аррениуса. Горение угля моделируется с учетом как кинетического, так и диффузионного механизмов. Модель, ограниченная кинетикой/диффузией, предполагает, что два механизма действуют одновременно, и их эффект взвешивается для определения скорости горения.

Моделирование генерации NO_x выполнено на основе модели постобработки, в которой учитываются химические реакции образования быстрых, топливных и термических оксидов азота [26]. В основе модели положен кинетический механизм генерации NO_x с учетом конвективно-диффузионного переноса. Суммарные реакции, описывающие генерацию NO_x при выгорании пылеугольного топлива, учитывают пиролиз угольных частиц, гетерогенное горение углеродного остатка и образование оксидов азота.

Расчетная область моделирования состоит из объема топочной камеры, горелочных устройств и сопел третичного дутья. При этом для снижения вычислительной мощности и пульсаций значений расчетных параметров горелочные устройства представлены в виде колец на стенах топочной камеры. Расчетная сетка в районах расположения горелок и сопел третичного дутья постепенно сгущается с учетом градиентного изменения параметров.

Коэффициент избытка воздуха при проведении численных экспериментов на различных нагрузках составлял 1,2, хотя в реальности при снижении нагрузки коэффициент избытка воздуха увеличива-

ется. В вариантах с установкой сопел доля третичного воздуха составляла 0,2 во всех случаях.

Расход топлива при 100 % нагрузке 7,8 кг/с, скорость первичного воздуха 20,0 м/с, а вторичного воздуха 25,5 м/с. Температура первичного воздуха 70 °С, вторичного и третичного 380 °С.

Для оценки сеточно-независимого решения были рассмотрены варианты с 104760, 271760 и 516344 ячейками. Из результатов сравнительного анализа среднеинтегральных температур по высоте топочной камеры определено, что наибольшая разность температур между первым и вторым вариантами составляет 100 °С, а между вторым и третьим – 30 °С. Таким образом, для моделирования была выбрана сеточная система с 104760 ячейками, обеспечивающая баланс между числовой точностью и вычислительными затратами.

Результаты исследования

Уделяя основное внимание влиянию различных нагрузок на процессы горения пылеугольного топлива и эмиссию NO_x , численное моделирование проведено для диапазона нагрузок от 100–50 % с шагом в 10 %. В качестве основных численных экспериментов к рассмотрению приняты варианты 100, 80 и 50 %. При нагрузке в 50 % нижний ярус горелок отключался. В вариациях с установкой сопел третичного дутья коэффициент расхода воздуха в основных горелках оставался постоянным со значением 1,0.

На рис. 2 представлены результаты моделирования интенсивности скоростного потока и векторное поле в продольном сечении топочной камеры, из которых видно, что с увеличением нагрузки наблюдается возрастание скорости потока. В частности, при нагрузке в 50 % скорость составляет от 2 до 5 м/с (рис. 2, а), соответственно, это препят-

ствует эффективному перемешиванию топлива с воздухом и снижает теплообмен. Возрастание нагрузки приводит к большему заполнению восходящим потоком сечения топочной камеры, положительно влияя на снижение неравномерности потоков в целом по объему топочной камеры. При 100 % нагрузке скорость высокотемпературных продуктов сгорания составляет от 4 до 13 м/с (рис. 2, в), что усиливает теплообмен и способствует выгоранию пылеугольного топлива.

Установка сопел третичного дутья приводит к снижению скорости потока в нижней части топочного объема до уровня их расположения, что в совокупности со снижением доли окислителя в зоне горелочных устройств еще более интенсивно влияет на снижение выгорания топлива и теплообмен (рис. 3). Также стоит отметить, что при наличии сопел третичного дутья вблизи аэродинамического выступа не обеспечивается более полное омывание продуктами сгорания и, соответственно, эффективный теплообмен поверхностей нагрева, расположенных в верхнем углу топочной камеры. Таким образом, наличие сопел третичного дутья увеличивает неравномерность тепловосприятия по стенам топочной камеры и в дальнейшем по ступеням пароперегревателя.

Распространение струй из сопел третичного дутья, представленное на рис. 4, показывает достаточно полное их проникновение в топочный объем по ширине топки, что способствует обеспечению окисления продуктов неполного горения и коксового остатка. С ростом нагрузки интенсивность проникновения струй третичного воздуха возрастает так, что при номинальной нагрузке происходит столкновение встречно-направленных потоков (рис. 4, в).

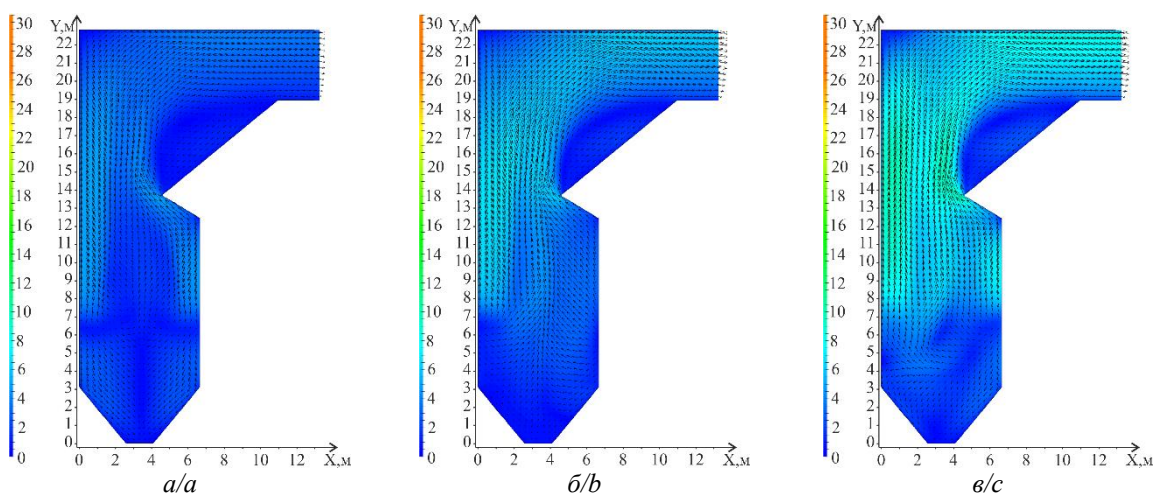


Рис. 2. Распределение скоростей (м/с) в продольном сечении топочной камеры: а) нагрузка 50 %; б) нагрузка 80 %; в) нагрузка 100 %

Fig. 2. Velocity distribution (m/s) in the longitudinal section of the furnace chamber: а) 50% load; б) 80% load; в) 100% load

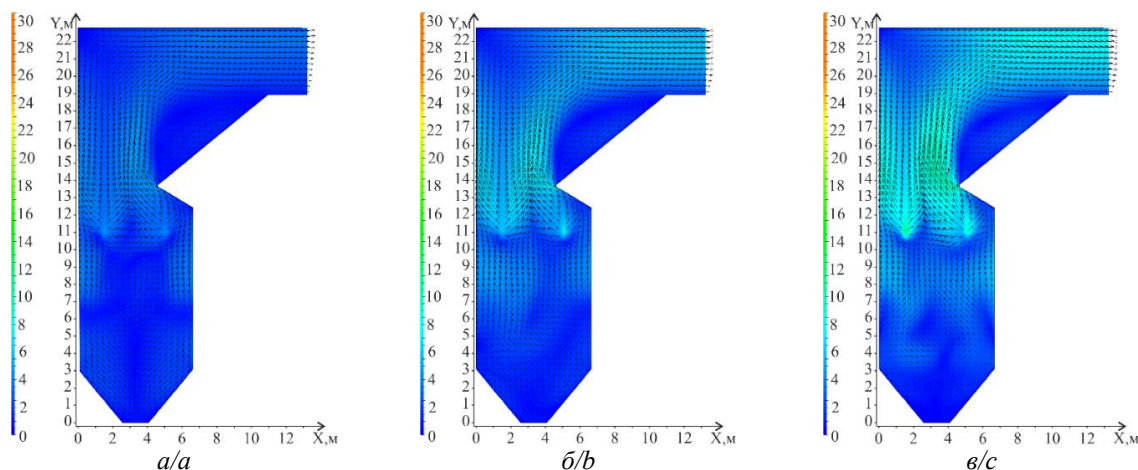


Рис. 3. Распределение скоростей (м/с) в продольном сечении топочной камеры с соплами третичного дутья: а) нагрузка 50 %; б) нагрузка 80 %; в) нагрузка 100 %

Fig. 3. Velocity distribution (m/s) in the longitudinal section of the furnace chamber with tertiary air nozzles: a) 50% load; b) 80% load; c) 100% load

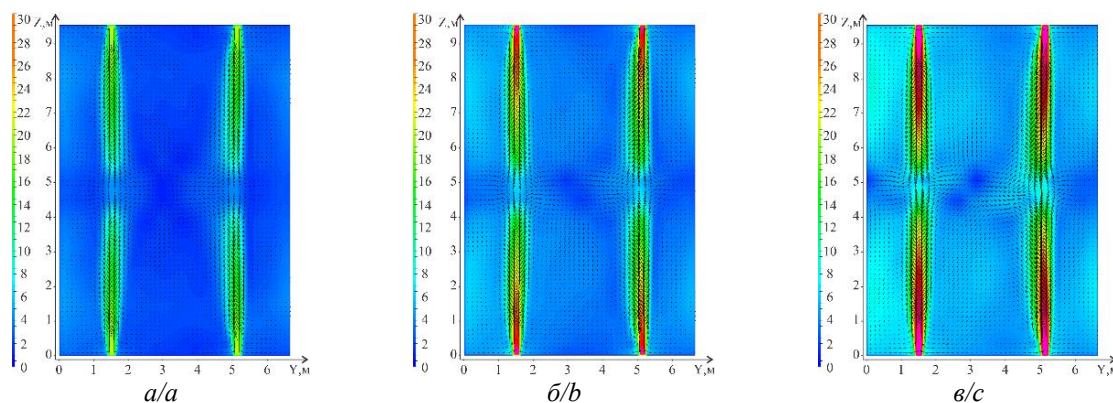


Рис. 4. Распределение скоростей (м/с) в горизонтальном сечении топочной камеры на уровне сопел третичного дутья: а) нагрузка 50 %; б) нагрузка 80 %; в) нагрузка 100 %

Fig. 4. Distribution of velocities (m/s) in the horizontal section of the furnace chamber at the level of tertiary air nozzles: a) 50% load; b) 80% load; c) 100% load

Контуры температур в топочном объеме представлены на рис. 5, 6. В целом при различной нагрузке и в вариантах с соплами третичного дутья (рис. 6) и без сопел (рис. 5) в зоне холодной воронки температура имеет более низкое значение, а в области расположения горелочных устройств при окислении топлива выделяется большое количество тепла и температура достигает максимальных значений. В дальнейшем вследствие теплообмена между высокотемпературными продуктами сгорания и экранами топочной камеры температура постепенно снижается.

При нагрузке 50 % зона активного горения имеет незначительные размеры, а с ростом нагрузки ядро горения с однородной температурой заполняет больший объем топочной камеры. Влияние различных по нагрузке режимов работы на температуру в основном отражается в большем отличии температуры дымовых газов вблизи выхода из горелок.

По мере увеличения нагрузки температура возле выхода из горелок заметно возрастает из-за большего количества пылевидного угля и соответствующего увеличения объема воздуха, что приводит к увеличению объемного теплонапряжения. Кроме того, увеличение нагрузки приводит к соответствующему увеличению температуры дымовых газов на выходе из топочной камеры.

При нагрузке 80 % в численном эксперименте без сопел третичного дутья наблюдается неравномерный уровень температур относительно поперечной оси топки на уровне горелок второго яруса (рис. 5, б). Это вызвано интенсивным вовлечением топочной среды в зону эжекции горелочных устройств, расположенных справа от поперечной оси топки. Таким образом, уровень температур с правой стороны выше непосредственно на выходе из горелочных устройств и снижается по мере приближения к сечению по продольной оси, а с левой стороны картина обратная.

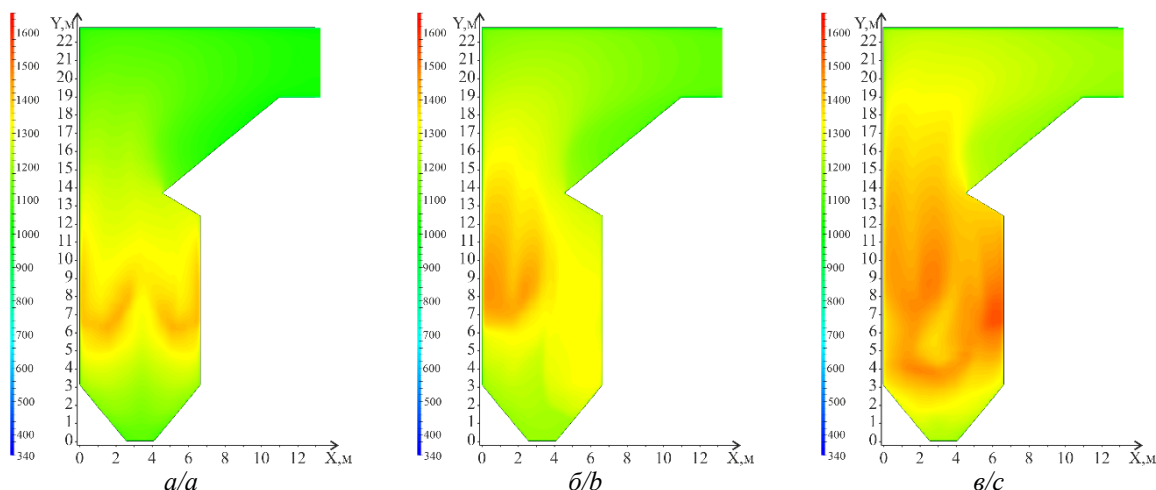


Рис. 5. Распределение температуры (K) в продольном сечении топочной камеры: а) нагрузка 50 %; б) нагрузка 80 %; в) нагрузка 100 %

Fig. 5. Temperature distribution (K) in the longitudinal section of the furnace chamber: a) 50% load; b) 80% load; c) 100% load

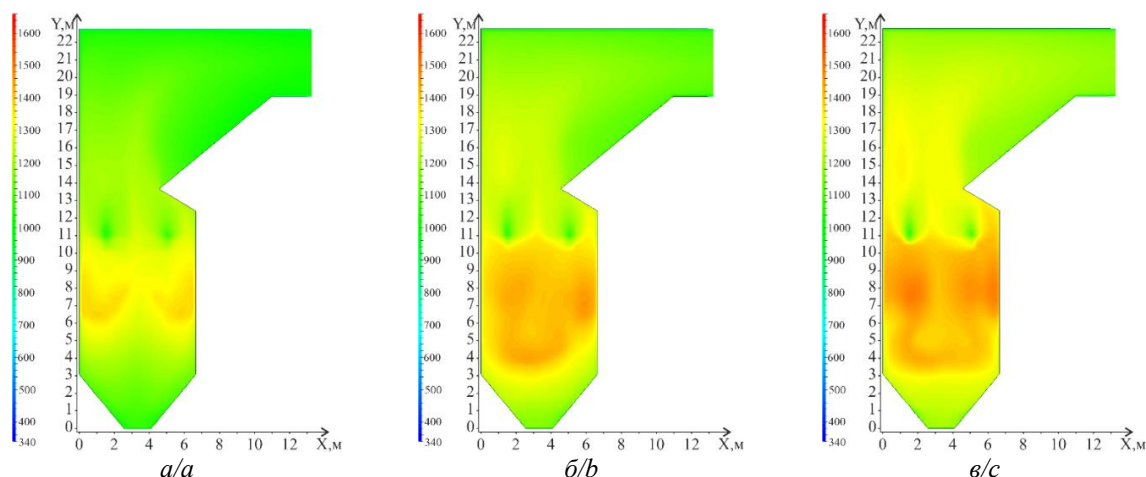


Рис. 6. Распределение температуры (K) в продольном сечении топочной камеры с соплами третичного дутья: а) нагрузка 50 %; б) нагрузка 80 %; в) нагрузка 100 %

Fig. 6. Temperature distribution (K) in the longitudinal section of the furnace chamber with tertiary air nozzles: a) 50% load; b) 80% load; c) 100% load

Действие сопел третичного дутья приводит к снижению интенсивности окисления и выгорания пылеугольного топлива на выходе из горелочных устройств, поскольку помимо снижения доли кислорода, подаваемого в горелочные устройства, уменьшается и параметр крутки. Соответственно уменьшается как само ядро горения, так и уровень температур в его объеме. Стоит отметить, что при нагрузке в 80 % (рис. 6, б) неравномерность температурного уровня снизилась по сравнению с базовым вариантом (рис. 5, б). Температура на выходе из топочной камеры с соплами третичного дутья снижается вследствие значительного количества относительно холодного воздуха на выходе из сопел.

На рис. 7 представлены моделируемые температуры и концентрации NO_x , усредненные по сечени-

ям на различных высотах и при различных нагрузках котельного агрегата. В целом при рассмотрении профилей температур по высоте топочной камеры в базовом варианте и с установкой сопел третичного дутья можно отметить следующее: в нижней части топочной камеры наблюдается низкий уровень температур, который в дальнейшем с ростом высотной отметки увеличивается (рис. 7, а, б). На отметках расположения горелочных устройств и сопел третичного дутья наблюдается снижение температур вследствие поступления относительно холодных больших объемов топливно-воздушной смеси и воздуха. После аэродинамического выступа температуры снижаются вследствие теплообмена с ограждающими поверхностями.

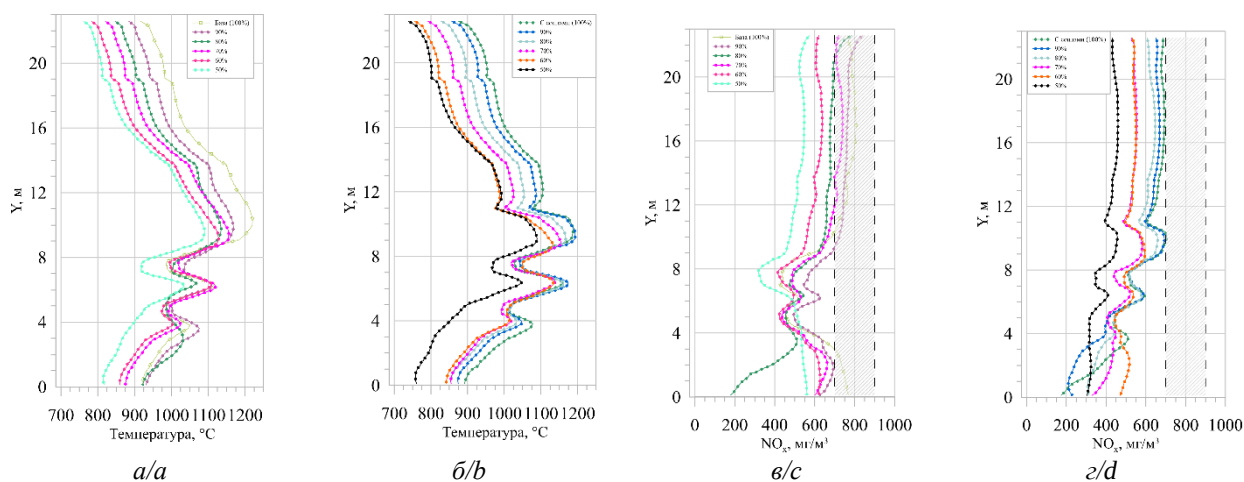


Рис. 7. Распределение среднеинтегральной величины в горизонтальных сечениях по высоте топки: а) температуры в базовом варианте; б) температуры с соплами третичного дутья; в) NO_x в базовом варианте; г) NO_x с соплами третичного дутья

Fig. 7. Distribution of the average integral value in horizontal sections along the height of the furnace: а) temperature in the base design; б) temperature with tertiary air nozzles; в) NO_x in the base design; г) NO_x with tertiary air nozzles

При нагрузке 50 % температура по высоте топки имеет минимальные значения, при этом на уровне середины холодной воронки она составляет 833 °С, на высоте порядка 10 м достигается максимальное значение 1090 °С, а на выходе из топки составляет 840 °С (рис. 7, а). При наличии сопел третичного дутья на данной нагрузке температура еще более снижается (рис. 7, б): на уровне середины холодной воронки наблюдается наибольший градиент (56 °С), в дальнейшем по высоте топочной камеры снижение температуры составляет (10–15 °С).

Максимальное значение среднеинтегральной температуры 1220 °С наблюдается при номинальной нагрузке на высоте 10,5 м, а максимальные значения температуры при 100 % нагрузке достигают 1518 °С для базовой компоновки горелок в топочной камере. Установка сопел третичного дутья приводит к снижению среднеинтегральной температуры на данном уровне до 1200 °С (рис. 7, б), а максимального значения до 1500 °С. Таким образом, при 100 % нагрузке с установкой сопел температура по высоте топочной камеры снижается примерно на 20 °С.

Профили температурных кривых по высоте топки при других исследованных нагрузках с постепенным снижением их значений укладываются между 100 и 50 %. Незначительно выбиваются значения температур в холодной воронке при 90 и 80 % нагрузке в связи с перераспределением потоков от нижнего яруса горелок.

В зоне активного горения азотосодержащие продукты подвергаются окислению, что приводит к образованию NO_x и увеличению их концентрации выше уровня расположения горелочных устройств (рис. 7, в, г). При базовой компоновке эмиссия NO_x снижается после высотной отметки 10 м во всех исследованных вариантах. Аналогично, как и с

температурным уровнем по высоте топочной камеры, наибольшая концентрация NO_x наблюдается при 100 % нагрузке, а наименьшая – при 50 %, и на выходе из топки имеет значение 800 и 544 мг/м³ соответственно при приведении к коэффициенту избытка воздуха 1,4.

Наличие сопел третичного дутья позволяет снизить содержание оксидов азота в топочном объеме (рис. 7, г). В частности, после высотной отметки 8 м наблюдается рост содержания NO_x , но на уровне расположения сопел концентрация скачкообразно снижается, и эмиссия оксидов азота затухает. При 100 % нагрузке концентрация NO_x составляет 698 мг/м³.

Заштрихованная область в диапазоне 703–992 мг/м³, показанная на рисунке 7, в, г, отражает диапазон данных с испытаний котельного агрегата БКЗ-220-100 при номинальной нагрузке и сжигании исследуемого угля. Измерение концентрации NO_x проводилось за пароперегревателем. Соответственно, можно констатировать, что полученные численные данные хорошо согласуются с натурными испытаниями, а установка сопел третичного дутья по принятой схеме позволит довести выбросы NO_x до нижнего уровня, фиксированного на станции.

Заключение

Проведено численное исследование характеристик потока, температуры и концентрации компонентов при различных нагрузках в топке котельного агрегата паропроизводительностью 220 т/час, а также при установке сопел третичного дутья с одинаковым коэффициентом расхода воздуха в зоне горелочных устройств (1,0). На основании полученных результатов сделаны следующие выводы.

При снижении нагрузки происходит уменьшение скорости потоков, размера ядра горения и температуры продуктов сгорания. Несмотря на данное изменение параметров топочного процесса, стабильность горения сохраняется даже при перераспределении части вторичного воздуха на третичное дутье.

При этом выявлено, что при снижении нагрузки возможно неравномерное распределение потоков в области второго яруса горелок, исходящее от нижних горелочных устройств, и интенсивное их вовлечение в область эжекции горелок с существенным увеличением угла раскрытия факела горелоч-

ных устройств второго яруса. Впоследствии это приводит к неравномерности распределения температурных полей в топочном объеме. Данный эффект наблюдался на нагрузках 80 и 90 % в базовой компоновке.

Наличие сопел третичного дутья приводит к незначительному снижению температурного уровня в топочном объеме и на выходе из топки, это позволяет снизить выбросы оксидов азота, согласно предложенной компоновке сопел, на 12,75 %.

Полученные результаты численного моделирования имеют хорошее согласование с натурными испытаниями котельного агрегата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прогноз и развитие энергетики мира и России 2019 / под ред. А.А. Макарова, Т.А. Митровой, В.А. Кулагина. – М.: ИНЭИ РАН-Московская школа управления СКОЛКОВО, 2019. – 210 с.
2. Тумановский А.Г. Перспективы развития угольных ТЭС России // Теплоэнергетика. – 2017. – № 6. – С. 3–13.
3. Overall review of peak shaving for coal-fired power units in China / Y.J. Gu, J.X. Dong, C. Chen, Z. Wang, Q.Q. Li // Renewable & Sustainable Energy Reviews. – 2016. – Vol. 54. – P. 723–731.
4. Sun W., Zhong W., Echehki T. Large eddy simulation of the interactions between gas and particles in a turbulent corner-injected flow // Advanced Powder Technology. – 2019. – Vol. 30. – № 10. – P. 2139–2149.
5. Sun W., Zhong W., Yu A. Gas-particle turbulent flow of foursquare tangential jets in a simplified pulverized-coal firing boiler // Advanced Powder Technology. – 2018. – Vol. 29. – № 6. – P. 1463–1473.
6. Numerical and experimental investigations on the gas temperature deviation in a large scale, advanced low NO_x, tangentially fired pulverized coal boiler / H. Park, S. Baek, Y. Kim, T.H. Kim, D. Kang, D. Kim // Fuel. – 2013. – Vol. 104. – P. 641–646.
7. Numerical investigation of low NO_x combustion strategies in tangentially-fired coal boilers / X. Zhang, J. Zhou, S. Sun, R. Sun, M. Qin // Fuel. – 2015. – Vol. 142. – P. 215–221.
8. A compatible configuration strategy for burner streams in a 200 MWe tangentially fired oxy-fuel combustion boiler / J. Guo, Z. Liu, F. Hu, P. Li, W. Luo, X. Huang // Appl Energy. – 2018. – Vol. 220. – P. 59–69.
9. Numerical simulation research on the unique thermal deviation in a 1000 MW tower type boiler / X. Wu, W. Fan, Y. Liu, B. Bian // Energy. – 2019. – Vol. 173. – P. 1006–1020.
10. Combustion optimization and NO_x reduction of a 600 MWe down-fired boiler by rearrangement of swirl burner and introduction of separated over-fire air / W. Yang, B. Wang, S. Lei, K. Wang, T. Chen, Z. Song, C. Ma, Y. Zhou, L. Sun // J Clean Prod. – 2019. – Vol. 210. – P. 1120–1130.
11. CFD modeling of hydrodynamics, combustion and NO_x emission in a tangentially fired pulverized-coal boiler at low load operating conditions / J. Chang, X. Wang, Z. Zhou, H. Chen, Y. Niu // Advanced Powder Technology. – 2021. – Vol. 32. – № 2. – P. 290–303.
12. CFD modeling of flow, combustion and NO_x emission in a wall-fired boiler at different low-load operating conditions / H. Wang, H. Wang, H. Jin, Z. Yang, S. Deng, X. Wu, J. An, R. Sheng, S. Ti // Appl Therm Eng. – 2024. – Vol. 236. – P. 121824.
13. The Effect of Air Distribution Modes and Load Operations on Boiler Combustion / Y. Jin, C. Tian, Y. Xing, M. Quan, J. Cheng, Y. Yan, J. Guo // Advances in Heat Transfer and Thermal Engineering. – Singapore: Springer, 2021. – P. 827–831.
14. Achievement in ultra-low-load combustion stability for an anthracite- and down-fired boiler after applying novel swirl burners: from laboratory experiments to industrial applications / Q. Wang, Z. Chen, L. Li, L. Zeng, Z. Li // Energy. – 2020. – Vol. 192. – P. 116623.
15. A numerical study of a utility boiler tangentially-fired furnace under different operating conditions / S. Belosevic, M. Sijercic, D. Tucakovic, N. Crnomarković // Fuel. – 2008. – Vol. 87. – № 15–16. – P. 3331–3338.
16. Optimization of operating conditions to achieve combustion stability and reduce NO_x emission at half-load for a 550-MW tangentially fired pulverized coal boiler / Y. Jiang, B. Lee, D.H. Oh, C.H. Jeon // Fuel. – 2021. – Vol. 306. – P. 121727.
17. Численное исследование влияния избытка первичного воздуха на процессы горения в топочной камере энергетического котла с многоканальными вихревыми горелками / А.В. Гиль, А.С. Заворин, О.М. Кокшарев, Е.С. Воронцова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 9. – С. 18–27.
18. Numerical study on the effects of primary air ratio on ultra-low-load combustion characteristics of a 1050 MW coal-fired boiler considering high-temperature corrosion / W. Jin, F. Si, S. Kheirkhah, C. Yu, H. Li, Y. Wang // Appl Therm Eng. – 2023. – Vol. 221. – P. 119811.
19. Insights into the causes and controlling strategies of gas temperature deviation in a 660 MW tangentially fired tower-type boiler / L. Ma, X. Chen, J. Liu, Q. Fang, C. Zhang, Y. Li, R. Mao, L. Ren, P. Zhang, G. Chen // Applied Thermal Engineering. – 2021. – Vol. 196. – P. 117297.
20. Rawlins B.T., Laubscher R., Rousseau P. A fast thermal non-equilibrium eulerian-eulerian numerical simulation methodology of a pulverised fuel combustor // Thermal Science and Engineering Progress. – 2023. – Vol. 41. – P. 101842.
21. Numerical study and design strategy for a low emission coke oven system using oxy-fuel combustion of coke oven gas / Z. Li, Q. Yi, Y. Zhang, H. Zhou, Y. Zhao, H. Yi, D. Gao, Y. Hao // Journal of Cleaner Production. – 2020. – Vol. 252. – P. 119656.

22. Evaluation of numerical modeling and combustion characteristics of hydrogen oxy-fuel combustion in a semi-industrial furnace / G. Daurer, S. Schwarz, M. Demuth, C. Gaber, C. Hochenauer // *Fuel*. – 2024. – Vol. 369. – P. 131690.
23. Jingwen L., Yifan Z., Hao Z. Numerical simulation study on combustion characteristics and NOx emission of COREX gas swirl burner and boiler // *Fuel*. – 2023. – Vol. 352. – P. 129128.
24. Validation of a Eulerian–Lagrangian numerical algorithm for simulating ultra-coarse particles transported in horizontal and vertical hydraulic pipes / R. Zhao, Y. Zhang, X. Zhang, X. Wang // *Computers and Fluids*. – 2024. – Vol. 276. – P. 106263.
25. A coupled smoothed finite element method and Lagrangian particle tracking model for three-dimensional dilute particle-laden flows / G. Zhou, T. Wang, C. Jiang, F. Shi, L. Zhang, Y. Wang, B. Yang // *Applied Mathematics and Computation*. – 2024. – Vol. 475. – P. 128726.
26. The processes of formation of nitrogen oxides in the boiler furnace BKZ 320-140 / N.V. Vizgavljush, A.V. Gil, T.S. Taylasheva, A.V. Starchenko // *EPJ Web of Conferences*. – 2015. – P. 01040.

Информация об авторах

Андрей Владимирович Гиль, кандидат технических наук, доцент научно-образовательного центра И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; angil@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6816-7876>

Кирилл Иванович Мальцев, аспирант научно-образовательного центра И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; kim3@tpu.ru

Никита Валерьевич Абрамов, аспирант научно-образовательного центра И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; nva12@tpu.ru

Александр Сергеевич Заворин, доктор технических наук, профессор, руководитель научно-образовательного центра И.Н. Бутакова, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; zavorin@tpu.ru

Александр Васильевич Старченко, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой вычислительной математики и компьютерного моделирования, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36; starch@math.tsu.ru

Поступила в редакцию: 17.07.2024

Поступила после рецензирования: 19.08.2024

Принята к публикации: 10.09.2024

REFERENCES

1. *Prognosis and development of World and Russian Energy 2019* Eds. A.A. Makarov, T.A. Mitrova, V.A. Kulagin. Moscow, INEI RAN-Moscow School of Management SKOLKOVO Publ., 2019. 210 p. (In Russ.)
2. Tumanovsky A.G. Prospects for the development of coal-fired power plants in Russia. *Thermal Engineering*. 2017, vol. 6, pp. 3–13. (In Russ.)
3. Gu Y.J., Dong J.X., Chen C., Wang Z., Li Q.Q. Overall review of peak shaving for coal-fired power units in China. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2016, vol. 54, pp. 723–731.
4. Sun W., Zhong W., Echekeki T. Large eddy simulation of the interactions between gas and particles in a turbulent corner-injected flow. *Advanced Powder Technology*, 2019, vol. 30 (10), pp. 2139–2149.
5. Sun W., Zhong W., Yu A. Gas-particle turbulent flow of foursquare tangential jets in a simplified pulverized-coal firing boiler. *Advanced Powder Technology*, 2018, vol. 29 (6), pp. 1463–1473.
6. Park H., Baek S., Kim Y., Kim T.H., Kang D., Kim D. Numerical and experimental investigation on the gas temperature deviation in a large scale, advanced low NOx, tangentially fired pulverised coal boiler. *Fuel*, 2013, vol. 104, pp. 641–646.
7. Zhang X., Zhou J., Sun S., Sun R., Qin M. Numerical investigation of low NOx combustion strategies in tangentially-fired coal boilers. *Fuel*, 2015, vol. 142, pp. 215–221.
8. Guo J., Liu Z., Hu F., Li P., Luo W., Huang X. A compatible configuration strategy for burner streams in a 200 MWe tangentially fired oxy-fuel combustion boiler. *Appl Energy*, 2018, vol. 220, pp. 59–69.
9. Wu X., Fan W., Liu Y., Bian B. Numerical simulation research on the unique thermal deviation in a 1000 MW tower type boiler. *Energy*, 2019, vol. 173, pp. 1006–1020.
10. Yang W., Wang B., Lei S., Wang K., Chen T., Song Z., Ma C., Zhou Y., Sun L. Combustion optimization and inhibition of NOx of a 600 MWe down-fired boiler by rearrangement of swirl burner and introduction of separated over-fire air. *J Clean Prod.*, 2018, vol. 210, pp. 1120–1130.
11. Chang J., Wang X., Zhou Z., Chen H., Niu Y. CFD modeling of hydrodynamics, combustion and NOx emission in a tangentially fired pulverized-coal boiler at low load operating conditions. *Adv Powder Technol.*, 2020, vol. 32, pp. 290–303.
12. Wang H., Jin H., Yang Z., Deng S., Wu X., An J., Sheng R., Ti S. CFD modeling of flow, combustion and NOx emission in a wall-fired boiler at different low-load operating conditions. *Appl Therm Eng.*, 2024, vol. 236, p. 121824.
13. Jin Y., Tian C., Xing Y., Quan M., Cheng J., Yan Y., Guo J. The effect of air distribution modes and load operations on boiler combustion. *Advances in Heat Transfer and Thermal Engineering*. Singapore, Springer, 2021. pp. 827–831.

14. Wang Q., Chen Z., Li L., Zeng L., Li Z. Achievement in ultra-low-load combustion stability for an anthracite- and down-fired boiler after applying novel swirl burners: From laboratory experiments to industrial applications. *Energy*, 2020, vol. 192, pp. 116623.
15. Belosevic S., Sijercic M., Tucakovic D., Crnomarković N. A numerical study of a utility boiler tangentially-fired furnace under different operating conditions. *Fuel*, 2008, vol. 87, pp. 3331–3338.
16. Jiang Y., Lee B., Oh D.H., Jeon C.H. Optimization of operating conditions to achieve combustion stability and reduce NO_x emission at half-load for a 550-MW tangentially fired pulverized coal boiler. *Fuel*, 2021, vol. 306, pp. 121727.
17. Gil A.V., Zavorin A.S., Koksharev O.M., Vorontsova E.S. Numerical study of the effect of excess primary air on combustion processes in the furnace of an energy boiler with multi-channel swirl burners. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 9, pp. 18–27. (In Russ.)
18. Jin W., Si F., Kheirkhah S., Yu C., Li H., Wang Y. Numerical study on the effects of primary air ratio on ultra-low-load combustion characteristics of a 1050 MW coal-fired boiler considering high-temperature corrosion. *Appl Therm Eng.*, 2022, vol. 221, pp. 119811.
19. Ma L., Chen X., Liu J., Fang Q., Zhang C., Li Y., Mao R., Ren L., Zhang P., Chen G. Insights into the causes and controlling strategies of gas temperature deviation in a 660 MW tangentially fired tower-type boiler. *Appl Therm Eng.*, 2021, vol. 196, pp. 117297.
20. Rawlins B.T., Laubscher R., Rousseau P. A fast thermal non-equilibrium Eulerian-Eulerian numerical simulation methodology of a pulverised fuel combustor. *Therm Sci Eng Prog.*, 2023, vol. 41, pp. 101842.
21. Li Z., Yi Q., Zhang Y., Zhou H., Zhao Y., Yi H., Gao D., Hao Y. Numerical study and design strategy for a low emission coke oven system using oxy-fuel combustion of coke oven gas. *J Clean Prod.*, 2019, vol. 252, pp. 119656.
22. Daurer G., Schwarz S., Demuth M., Gaber C., Hochenauer C. Evaluation of numerical modeling and combustion characteristics of hydrogen oxy-fuel combustion in a semi-industrial furnace. *Fuel*, 2024, vol. 369, pp. 131690.
23. Liu J., Zhu Y., Zhou H. Numerical simulation study on combustion characteristics and NO_x emission of COREX gas swirl burner and boiler. *Fuel*, 2023, vol. 352, pp. 129128.
24. Zhao R., Zhang Y., Zhang X., Wang X. Validation of a Eulerian–Lagrangian numerical algorithm for simulating ultra-coarse particles transported in horizontal and vertical hydraulic pipes. *Comput Fluids*, 2024, vol. 276, pp. 106263.
25. Zhou G., Wang T., Jiang C., Shi F., Zhang L., Wang Y., Yang B. A coupled smoothed finite element method and Lagrangian particle tracking model for three-dimensional dilute particle-laden flows. *Appl Math Comput.*, 2024, vol. 475, pp. 128726.
26. Vizgavljut N.V., Starchenko A.V., Gil A.V., Taylasheva T.S. The processes of formation of nitrogen oxides in the boiler furnace BKZ 320-140. *EPJ Web Conf.*, 2015, vol. 82, pp. 01040.

Information about the authors

Andrey V. Gil, Cand. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0001-6816-7876>; angil@tpu.ru

Kirill I. Maltsev, Postgraduate Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; kim3@tpu.ru

Nikita V. Abramov, Postgraduate Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; nva12@tpu.ru

Alexander S. Zavorin, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; zavorin@tpu.ru

Alexander V. Starchenko, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk State University, 36, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; starch@math.tsu.ru

Received: 17.07.2024

Revised: 19.08.2024

Accepted: 10.09.2024

UDC 551.583.7

DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4460

Magnetic properties of lake Kandrykul sediments (Republic of Bashkortostan, Russian Federation)

D.M. Kuzina[✉], A.R. Yusupova, N.G. Nurgalieva,
D.K. Nurgaliev, P.S. Krylov, D.I. Mulikova

Kazan Federal University, Kazan, Russian Federation

[✉]di.kuzina@gmail.com

Abstract. Relevance. It is known that sedimentary deposits in modern lakes with high sedimentation rates contain detailed paleoclimatic, paleobiological, paleoecological and magnetic records. The study of these parameters allow creation of paleoreconstructions and prediction of future climate behavior. **Aim.** To identify ecological and climatic events and trends during the Late Quaternary, based on magnetic properties of rocks. Some climate-dependent parameters are not properly used, we are showing that magnetic parameters are sensitive indicators of climate change. **Object.** Sediments of the Lake Kandrykul (Republic of Bashkortostan). **Materials and methods.** A set of petromagnetic studies was carried out, including measurements of magnetic susceptibility, normal remanent magnetization in external magnetic field of up to 1.5 T, as well as differential thermomagnetic analysis on induced magnetization and scanning electron microscopy on selected samples. Normal magnetization curves were used to set apart dia-/paramagnetic, ferromagnetic and superparamagnetic components. **Results.** Seismoacoustic studies showed that the lake bed is smooth, without sharp changes. The maximum water depth is about 16 m, the thickness of sediments reaches 7.5 m. Magnetic susceptibility was measured for three core columns, and the results show good correlation of this parameter between all the cores. Thermomagnetic analysis was used to determine magnetic minerals composition. The Day–Dunlop plot showed the presence of single, pseudo-single and multidomain grains. The authors determined the contribution of dia/para-, ferro-, and superparamagnetic components to the overall magnetic susceptibility. The paper considers the variations in magnetic susceptibility, para-, ferromagnetic components in the context of the Holocene climate changes. **Conclusions.** Variations in magnetic properties reflect climate changes (i.e. deposition environment). Six zones with different depositional conditions were distinguished based on magnetic susceptibility and its component changes. Additionally, zones with single-domain particles were highlighted based on hysteresis parameters variations. These zones most likely are associated with the remains of magnetotactic bacteria. Joint analysis of paramagnetic, ferromagnetic susceptibility and hysteresis parameters produced information on the effect of total humidity on the bioproductivity of the lake.

Keywords: lake sediments, magnetic properties, hysteresis parameters, biogenic magnetic grains, paleoclimate, paleoenvironment reconstruction

Acknowledgements: This work was funded by the Russian Science Foundation grant No. 22-47-08001.

For citation: Kuzina D.M., Yusupova A.R., Nurgalieva N.G., Nurgaliev D.K., Krylov P.S., Mulikova D.I. Magnetic properties of lake Kandrykul sediments (Republic of Bashkortostan, Russian Federation). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 10, pp. 43–55. DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4460

УДК 551.583.7

DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4460

Шифр специальности ВАК: 1.6.5

Магнитные свойства донных отложений озера Кандрыкуль (Республика Башкортостан, Россия)

Д.М. Кузина[✉], А.Р. Юсупова, Н.Г. Нурғалиева,
Д.К. Нурғалиев, П.С. Крылов, Д.И. Муликова

Казанский федеральный университет, Россия, г. Казань

[✉]di.kuzina@gmail.com

Аннотация. Актуальность. Известно, что осадочные отложения в современных озерах с высокой скоростью седиментации содержат детальные палеоклиматические, палеобиологические, палеоэкологические и магнитные записи. Изучение этих данных позволяет создавать палеореконструкции и прогнозировать поведение климата в будущем.

Цель: выявление экологических и климатических событий и тенденций в позднечетвертичное время на основе магнитных свойств горных пород. Некоторые климатозависимые параметры не используются должным образом, в данной работе показано, что магнитные параметры являются чувствительным индикатором изменения климата.

Объект: озерные отложения из керна озера Кандрыкуль, Республика Башкортостан. **Методы.** Проведен комплекс петромагнитных исследований, включающий: измерение магнитной восприимчивости образцов трех керновых колонок; получение кривых нормального остаточного намагничивания при непрерывном росте внешнего магнитного поля до 1,5 Тл для одной колонки; дифференциальный терромагнитный анализ по индуцированной намагниченности и сканирующую электронную микроскопию по выборочным образцам. По кривым нормального намагничивания было проведено разделение магнитной составляющей на диа-/парамагнитную, ферромагнитную и суперпарамагнитную компоненты. **Результаты.** Сейсмоакустические исследования показали, что дно озера ровное, без резких перепадов. Максимальная глубина озера составляет около 16 м, мощность осадочных отложений достигает 7,5 м. Магнитная восприимчивость измерялась по трем кернам, результаты показали хорошие вариации этого параметра по всем кернам. Это позволяет коррелировать керны между собой. Терромагнитный анализ позволил определить состав магнитных минералов. По данным коэрцитивной спектрометрии построена диаграмма Дзя–Данлопа, которая показывает наличие в осадках однодоменных, псевдооднодоменных и многодоменных зерен. Определена роль диа-/пара-, ферро- и суперпарамагнитных компонентов в общей магнитной восприимчивости. Вариации магнитной восприимчивости, пара- и ферромагнитной составляющих рассмотрены в контексте голоценовых климатических изменений. **Выводы.** Изменения магнитных свойств могут быть использованы для описания изменений климата (экологических и седиментационных условий). На основе вариаций магнитной восприимчивости и ее составляющих выделено шесть зон с различными условиями осадконакопления. Кроме того, по изменениям параметров гистерезиса выделены зоны с однодоменными частицами, которые, вероятнее всего, связаны с наличием в осадке остатков магнитотактических бактерий. Совместный анализ парамагнитной, ферромагнитной восприимчивости и параметров гистерезиса позволил получить информацию о влиянии влажности на биопродуктивность озера.

Ключевые слова: озерные отложения, магнитные свойства, гистерезисные параметры, биогенные магнитные зерна, палеоклимат, реконструкция палеосреды

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ 22-47-08001.

Для цитирования: Магнитные свойства донных отложений озера Кандрыкуль (Республика Башкортостан, Россия) / Д.М. Кузина, А.Р. Юсупова, Н.Г. Нурғалиева, Д.К. Нурғалиев, П.С. Крылов, М.Д. Илхомовна // Известия томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 10. – С. 43–55. DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4460

Introduction

It is known that sedimentary deposits in modern lakes with high sedimentation rates contain detailed paleoclimatic, paleobiological, paleoecological, and magnetic records [1]. The diversity of lake types and

numerous factors that determine sedimentation ensure unique qualitative and quantitative composition of the sediment in each individual lake. The study of these processes allow creation of paleoreconstructions and prediction of future climate behavior [2–4].

There are many indirect data types that can be used for paleoreconstructions, such as geochemical, isotopic, and paleobiological indicators. Magnetic properties of sediments, on the other hand, are not so widely used for this task. Nevertheless, changes in magnetic properties that reflect the supply of sedimentary material into the lake can be used to reconstruct the climate history and the environment in the Quaternary.

Magnetic properties reflect concentration, mineralogy and grain size of the magnetic components in sediments, which are often affected by physical, chemical and biological processes [5–7]. Thus, deep understanding of the processes that affect magnetic properties is crucial to reliable interpretation of results of any paleoenvironmental and paleoclimatic studies [1, 6, 7].

The aforementioned magnetic properties can be studied through measurements of magnetic susceptibility (MS), coercive spectrometry, and differential thermomagnetic analysis (DTMA). MS reflects changes in the supply of clastic material from water or eolian sources [8].

MS of rocks and sediments depends on the mineral composition and structure of magnetic domains. Therefore, different rocks and sediments show different MS, and many environmental studies note lithology impact on magnetic properties [9–12].

Normal magnetization curves can be used to determine hysteresis parameters, the domain structure and the size of ferrimagnetic grains [13], and the contribution of para-, ferro- and superparamagnetic components to the induced magnetization and MS [5]. The paramagnetic component reflects the inflow of allothigenic material into the sedimentation basin, which, in its turn, correlates with humidity and water levels. The ferromagnetic component is often represented by single domain (SD) biogenic (authigenic) grains, as well as multidomain (MD) clastic material of allothigenic nature.

The results of previous petro- and paleomagnetic studies of Lake Kandrykul sediments were published in [14, 15].

This paper focuses on the 5.4 m long core column extracted from Lake Kandrykul in 2021. To study the climate changes within the research area, thermomagnetic analysis was carried out, accompanied by measurements of MS and evaluation of hysteresis parameters. A review of already performed regional studies shows that detailed magnetic studies of lake sediments can supplement and expand the paleoclimatic data in the study area.

Materials and methods

The main aim of this work is to use magnetic properties of lake sediments in the study of ecological and climatic events and trends during the Late Quaternary. To achieve the aim, magnetic

measurements were performed, and the results were processed and interpreted.

The object of investigations, Lake Kandrykul, is located in the Republic of Bashkortostan (54°30'10" N, 54°03'50" E; the Tuymazinsky district, Russia) in the forest-steppe zone of the Volga-Kama basin [16]. It lies within the territory of the Nature Park of the same name and belongs to the basin of the Ik River. The size of the lake is 6.55×2.38 km (15.6 km²), the maximum depth is 16.5 m, and the average depth is 7.2 m [17]. The lake is of karst origin [16, 18]. The water is mildly alkaline (pH~8.7) and has hydrocarbonate-sulfate sodium-magnesium composition, type II [16, 19].

High-resolution seismic reflection survey of the lake area was conducted using 1.5 kHz Boomer source along six profiles (Fig. 1).

Based on seismoacoustic studies and lithologic description, three core columns with a length of 378–524 cm were extracted. The total number of core samples was 659 with a sampling step of 2 cm along the core. Core column #3 was chosen for a detailed analysis.

The analysis included MS measurements, coercive spectrometry, DTMA, determination of mineral and chemical composition.

MS was measured using the Multifunction Kappabridge MFK1-FA (AGICO). The measurements were carried out at a standard frequency of 976 Hz [20].

A coercive spectrometer (*J_meter*) was used to study the lake sediment in terms of hysteresis parameters [21, 22]. The hysteresis parameters made it possible to separate measured remanent and induced magnetization in magnetic fields of up to 1.5 T at room temperature.

In this way, remanent saturation magnetization (*M_{rs}*), saturation magnetization without the paramagnetic component (*M_s*), coercive force without the paramagnetic component (*B_c*), and remanent coercive force (*B_{cr}*) were evaluated. These parameters were used to determine the state of magnetic domains, as well as the grain size of ferromagnetic minerals. The magnetic hysteresis parameters reflect the contribution of the paramagnetic (*k_{para}*), ferromagnetic (*k_{ferro}*), and superparamagnetic (*k_{super}*) components to the total MS [23, 24]. The primary source of *k_{para}* is most probably allothigenic material, while *k_{ferro}* and *k_{super}* components can be of a mixed (allothigenic and/or authigenic) nature [23, 24].

Thermomagnetic analysis is often used for studying the ferromagnetic fraction in rock samples [21, 25]. DTMA of the samples uniformly distributed along the studied section was carried out using a Curie balance. Each sample taken from core column #3 was heated twice in a magnetic field of 0.4 T at a heating rate of 100°C/min. The result was the temperature dependences of the induced magnetization *J_i(T)* obtained during the first and second heating.

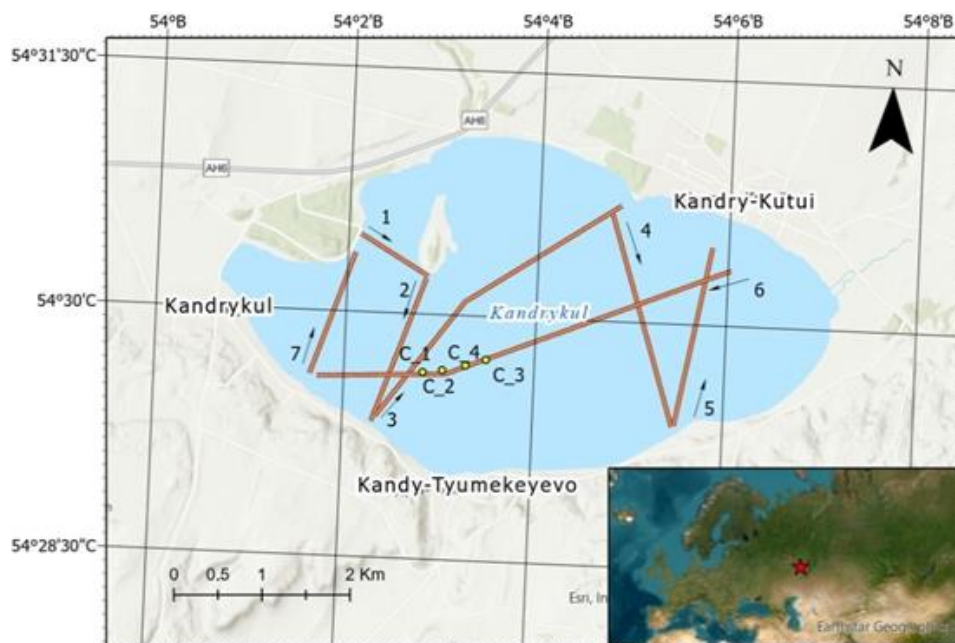


Fig. 1. Location of Lake Kandrykul. Red lines indicate seismoacoustic profiles, red dots mark positions of core sampling places
Рис. 1. Расположение озера Кандрыкуль. Красной линией показаны сейсмоакустические профили, красными точками отмечены места отбора керна

Electron microscopy was carried out for several samples. Measurements are made at the Interdisciplinary Center for Analytical Microscopy (Kazan Federal University) on Carl Zeiss “Merlin” field emission scanning electron microscope equipped with the Aztec X-MAX (for elemental analysis) detector. The resolution was 127 eV. Sample preparation for measurements consisted of grinding and etching organic matter.

Results

Seismoacoustic studies showed that the lake bed is smooth, without any sharp changes in its terrain (at least along the profiles). The maximum water depth in the lake is about 16 m, and the thickness of sedimentary deposits reaches 7.5 m. Based on the results of preliminary studies along the sixth profile (Fig. 2), four core columns were taken from the place with no gas and undisturbed stratification.

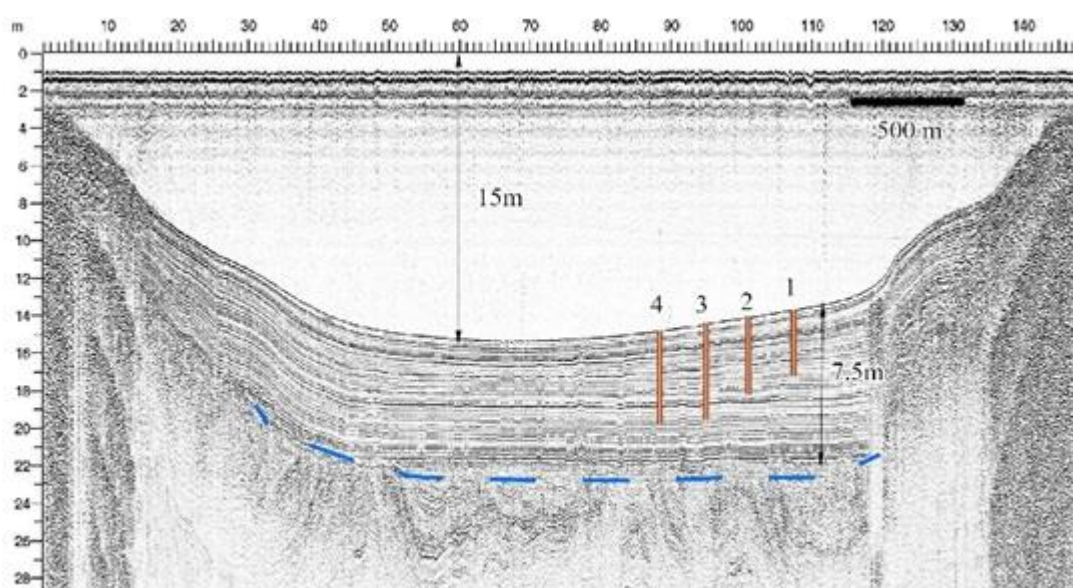


Fig. 2. Seismic profile #6. Blue dotted line marks the time of the lake basin formation. Red lines depict core columns
Рис. 2. Сейсмоакустический профиль #6. Синей пунктирной линией отмечено время образования озерного бассейна. Красной линией изображены керновые колонки

Fig. 3 presents the results of MS measurements. MS values vary in the ranges of $(0.56\text{--}21.94) \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$, $(0.54\text{--}16.98) \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$, and $(0.58\text{--}16.94) \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$ for core columns #1, #2, and #3, respectively.

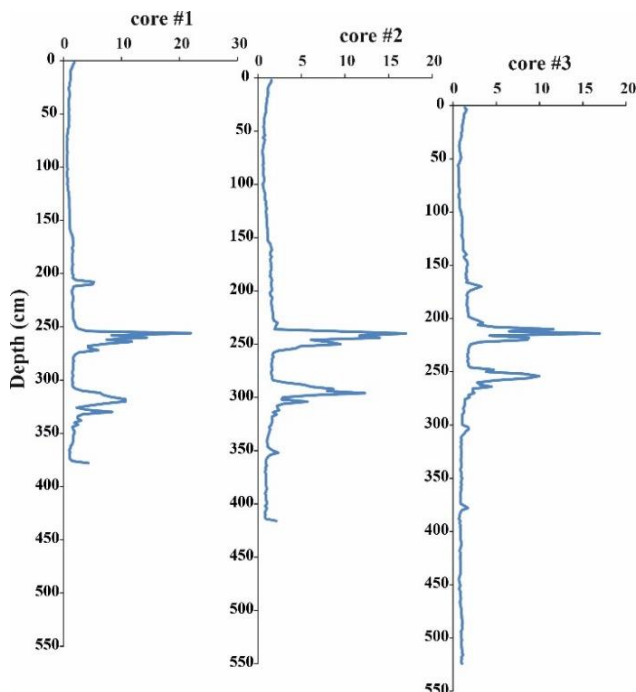


Fig. 3. Variation of MS ($\cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$) with depth

Рис. 3. Вариации магнитной восприимчивости по глубине ($\cdot 10^{-7} \text{ м}^3/\text{кг}$)

Based on the hysteresis parameters (M_{rs}/M_s and B_{cr}/B_c), the samples can be divided into two groups. Group #1 includes samples, in which the magnetic component is represented by a mixture of SD and MD or pseudo-single domain grains (PSD) [13]. The larger the M_{rs}/M_s ratio and the smaller the B_{cr}/B_c ratio, the more SD grains are contained in the sample. The presence of SD grains in the sediments of modern lakes means the presence of biogenic magnetic grains [15]; therefore, it can be concluded that the magnetic component of Group #1 samples is represented by a mixture of SD biogenic (authigenic) grains and MD magnetic grains, most likely brought into the sedimentation basin. Samples of Group #2 have a more complex composition: they contain few SD grains (of biogenic origin); most of the magnetic grains are represented by MD and superparamagnetic (SP) grains. These two groups of sediments should have formed under different environmental conditions. The samples of the first group represent sediments formed under conditions of high bioproductivity, probably in a warm and humid climate. The samples of the second group were formed under conditions of low bioproductivity. These data are very useful for paleoenvironmental reconstructions, which are discussed below.

The MS components identified while studying core column #3 samples change insignificantly with depth (Fig. 5). It can be seen from k_{full} that the values change in the range of $(5.24\text{--}166.02) \cdot 10^{-5}$; k_{para} varies from $3.31 \cdot 10^{-5}$ to $7.72 \cdot 10^{-5}$; k_{ferro} values range from $1.59 \cdot 10^{-5}$ to $156.93 \cdot 10^{-5}$; k_{super} values vary from $0.03 \cdot 10^{-5}$ to $2.45 \cdot 10^{-5}$.

The Day–Dunlop plot [10, 13] (Fig. 4) obtained with the J_{meter} spectrometer shows the magnetic hysteresis parameters for core column #3.

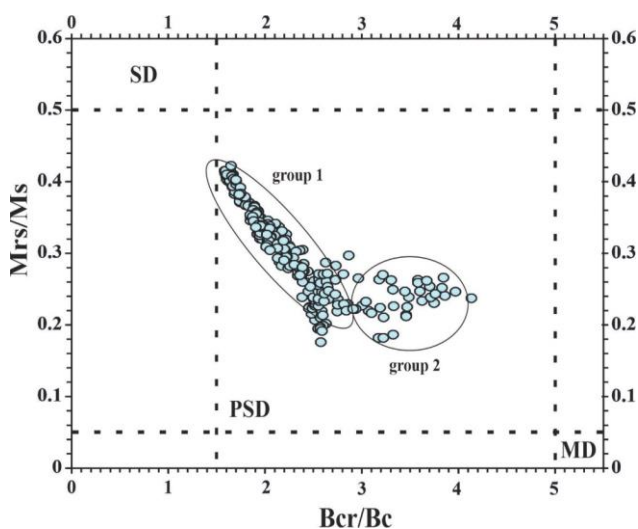


Fig. 4. Day–Dunlop plot [13, 26] for samples taken from core column #3

Рис. 4. Диаграмма Дзя–Данлопа [13, 26] для образцов керновой колонки #3

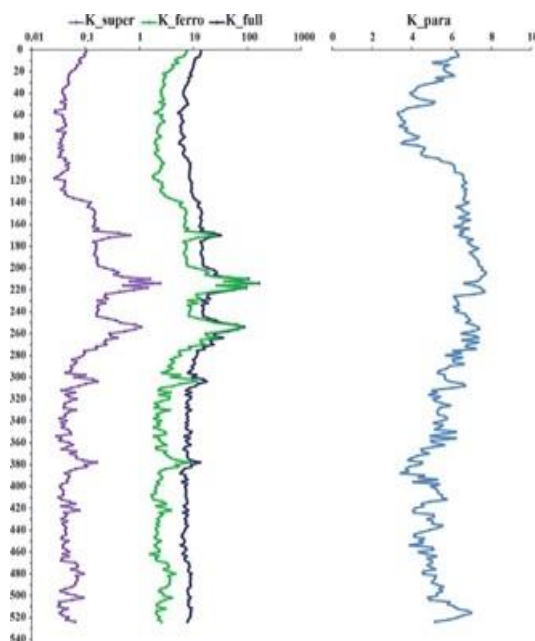


Fig. 5. Variations of magnetic parameters obtained for core sample #3

Рис. 5. Вариации магнитных параметров образцов керновой колонки #3

Differential thermomagnetic analysis showed that magnetic minerals in the sediment are represented by magnetite (Fig. 6, a) and iron sulfides (Fig. 6, b).

There is a difference between the top and bottom halves of the core. Magnetite is present in the first half of the core; it can be seen on the first heating curve, with the Curie temperature around 580°C (Fig. 6, a). Reducing conditions occur due to the combustion of organic material, which contributes to the formation of new magnetic minerals. It leads to the increase in magnetization after the first heating. The second half of the core contains iron sulfides (an

increase in the magnetization around 450°C), which, when heated, transform into a more magnetic mineral, magnetite (Fig. 6, b).

Results of electron microscopy shows the presence of different minerals in sediments. Magnetic minerals are presented mostly by iron oxides and silicates, also there are a few iron sulfides. These results correspond with DTMA results. The rest of material presented by different silicates, gypsum (in a big amount), dolomites, calcites, diatoms etc. (Fig. 7). Magnetic minerals are a bit etched, it can be because of organic matter etching.

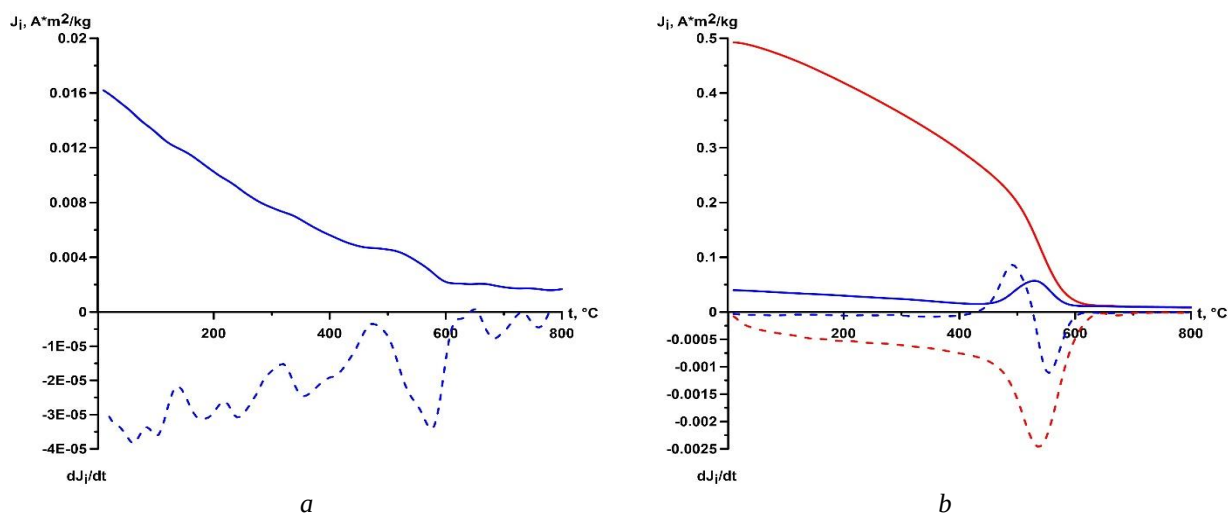


Fig. 6. DTMA results for the samples taken from core column #3: a) #541 (82 cm); b) #651 (302 cm). Blue line represents the first heating, red line is for the second heating; solid lines are integral curves, dotted lines are differential curves

Рис. 6. Результаты дифференциального термомангнитного анализа для образца керновой колонки #3: а) #541 (82 см); б) #651 (302 см). Сплошная синяя линия – первый нагрев, сплошная красная – второй нагрев; пунктирная синяя линия – дифференциал первого нагрева, пунктирная красная – дифференциал второго нагрева

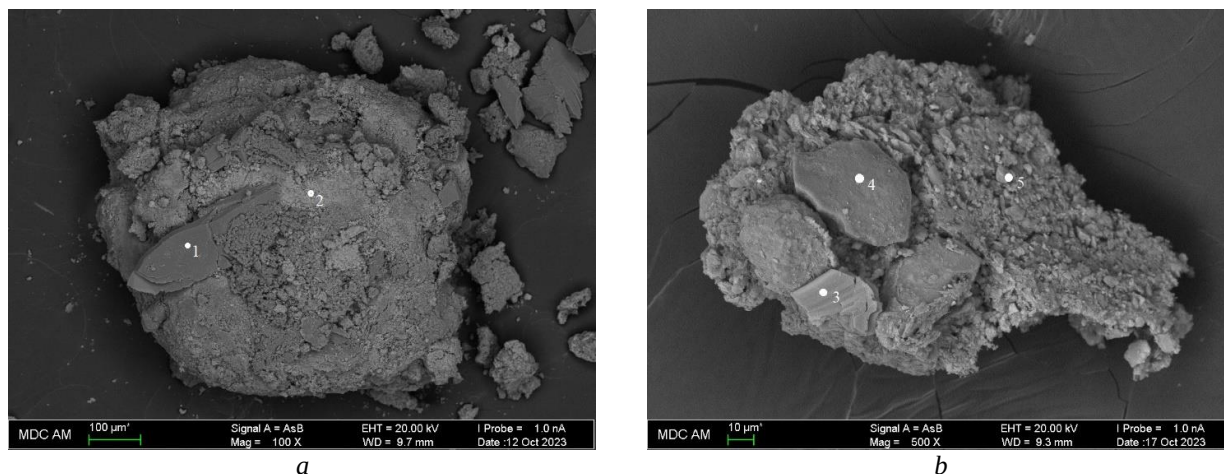


Fig. 7. Electron microscopy images of samples 607 (a) and 632 (b) in depths 114 and 164 cm respectively. All numbers in atom % and given only for elements with more than 1%. 1) O – 69.21; Ca – 26.88; S – 15.66; 2) O – 55.16; C – 23.61; Fe – 17.39; S – 2.56; 3) O – 57.57; C – 21.21; S – 8.80; Ca – 7.99; Si – 2.97; 4) C – 60.36; Si – 17.91; O – 16.39; Fe – 2.06; 5) O – 52.02; C – 20.71; Si – 14.32; Al – 5.37; Na – 3.53; Ca – 2.02

Рис. 7. Электронно-микроскопические снимки образцов 607 (а) и 632 (б) на глубинах 114 и 164 см соответственно. Числа даны в атом. % для элементов, содержание которых превышает 1 %. 1) O – 69,21; Ca – 26,88; S – 15,66; 2) O – 55,16; C – 23,61; Fe – 17,39; S – 2,56; 3) O – 57,57; C – 21,21; S – 8,80; Ca – 7,99; Si – 2,97; 4) C – 60,36; Si – 17,91; O – 16,39; Fe – 2,06; 5) O – 52,02; C – 20,71; Si – 14,32; Al – 5,37; Na – 3,53; Ca – 2,02

Discussion

Magnetic properties of sediments can be used to keep track of lithogenic input into the sedimentation basin, and can therefore serve as records of past environmental changes [27]. Variations in the concentration of magnetic minerals provide information on export of terrigenous sediments from land [11, 28, 29]. MS and hysteresis parameters (M_{rs}/M_s , B_{cr}/B_c) are quite informative and complement each other when being analyzed together in a study of modern lake sediments [30]. MS is useful for correlation of core samples taken from a single lake [1], as shown in Fig. 3. Since the core columns were taken from different parts of the lake bed, they have different length and features associated with different sedimentation rates and erosion caused by currents in different parts of the lake.

In our case, the analysis was based on k_{para} and k_{ferro} , which carry information about various components of the magnetic fraction. These components have different origin, and variations in their content in the sediment carry information about various factors that define the sedimentary environment [23, 24]. An increase in the paramagnetic component indicates an increase in the input of terrigenous material, which means more humid climate [1, 23, 24].

Variations in the composition of magnetic mineral assemblages can also be used for detecting changes in terrestrial climatic conditions, e. g., weathering and soil formation [29, 31–33]. Ferromagnetic susceptibility (k_{ferro}) depends on the content of ferromagnetic (ferrimagnetic) minerals in the sediment [1, 23, 24]. These minerals may be transported into the sedimentation basin from the surrounding catchment area, but may also be of biogenic nature [27, 34]. Magnetotactic bacteria living in the oxic/anoxic transition zone in the topmost part of the sediment utilize magnetic minerals, and can produce either magnetite or greigite intracellularly [34–37]. Furthermore, iron-reducing bacteria may induce the authigenic precipitation of magnetite [35, 38]. Most of the ferrimagnetic minerals (magnetite and sulfides) in the sediments of Lake Kandykul are of biogenic nature. Hysteresis parameters (M_{rs}/M_s , B_{cr}/B_c) allow estimation of magnetic grain size through determination of their domain structure. SD grains have a very narrow size range of about 50–100 nm, and their presence in the sediments of modern lakes mean that they are most probably of biogenic nature [23]. Magnetotactic bacteria (MTB) that produce SD magnetic grains live at the border of the oxic/anoxic transition zone (OATZ) [34–36, 39]. The higher this zone located in the water column, the higher the bioproductivity of the lake. With low bioproductivity, OATZ goes deeper into the sediment, and the production of biogenic magnetic grains decreases or stops. It was assumed that the epochs of high

bioproductivity and high content of biogenic magnetic grains in the sediment are associated with climatic optima (elevated average air temperatures) against the background of a very high rate of water inflow into the sedimentation basin.

Fig. 8 shows the parameters required for the analysis. Superparamagnetic susceptibility was not included, since it correlates very strongly with k_{ferro} , which is due to the presence of superparamagnetic grains smaller than SD, also of biological origin.

First of all, it should be noted that the samples in groups #1 and #2 (Fig. 4) are confined to different parts of the sediment. Samples of group #2 were taken from the upper part of the sediment (0–164 cm), and also appear in two more intervals of the section: (176–198 cm) and (234–244 cm). It can be said that the bioproductivity of the lake sharply decreased in these intervals. The sections of the core, in which the content of biogenic magnetic grains sharply increases, are marked with gray colored zones (*a–g*) in Fig. 8. In these zones, the M_{rs}/M_s ratio increases, while the B_{cr}/B_c ratio decreases, which indicates an increase in the number of SD grains of biogenic nature [40]. These zones are also reflected in the k_{para} variation curve. Zones *a*, *e*, *f*, in which the content of biogenic magnetic grains is not the highest, are marked by a decrease in k_{para} , which indicates a decrease in water supply to the sedimentation basin and the beginning of eutrophication of the lake with climate warming. Zones *b*, *c*, *d* are marked by some increase in k_{para} , which may indicate an increase in water inflow and an increase in the bioproductivity of the lake. Zones *b*, *c* are anomalous in terms of the content of biogenic magnetic grains. Between zones *b* and *c* there is a deposit section, in which the content of SD grains sharply decreases and this correlates with a sharp decrease in k_{para} . At different moments in time, the lake reacts differently to an increase in humidity and changes in water inflow into the basin. It depends on the average temperature.

Six zones (I–VI) with different sedimentation conditions can be distinguished based on magnetic susceptibility and its components.

Zone I (0–28 cm) is characterized by an increase in the ferrimagnetic component. The hysteresis parameters imply that this increase is due to MD and SP grains. The paramagnetic component of MS increases as well, which indicates an increase in terrigenous input and water inflow into the basin.

Zone II (28–114 cm) is characterized by a major drop of k_{para} . It is possible that the water level dropped at that time, and the lake was fed by groundwater. Gypsum and anhydrite of Permian age are widespread in the study area [41], which perhaps led to the inflow of sulfates into the basin, and MB began to produce magnetic iron sulfides (greigite?) (Fig. 6).

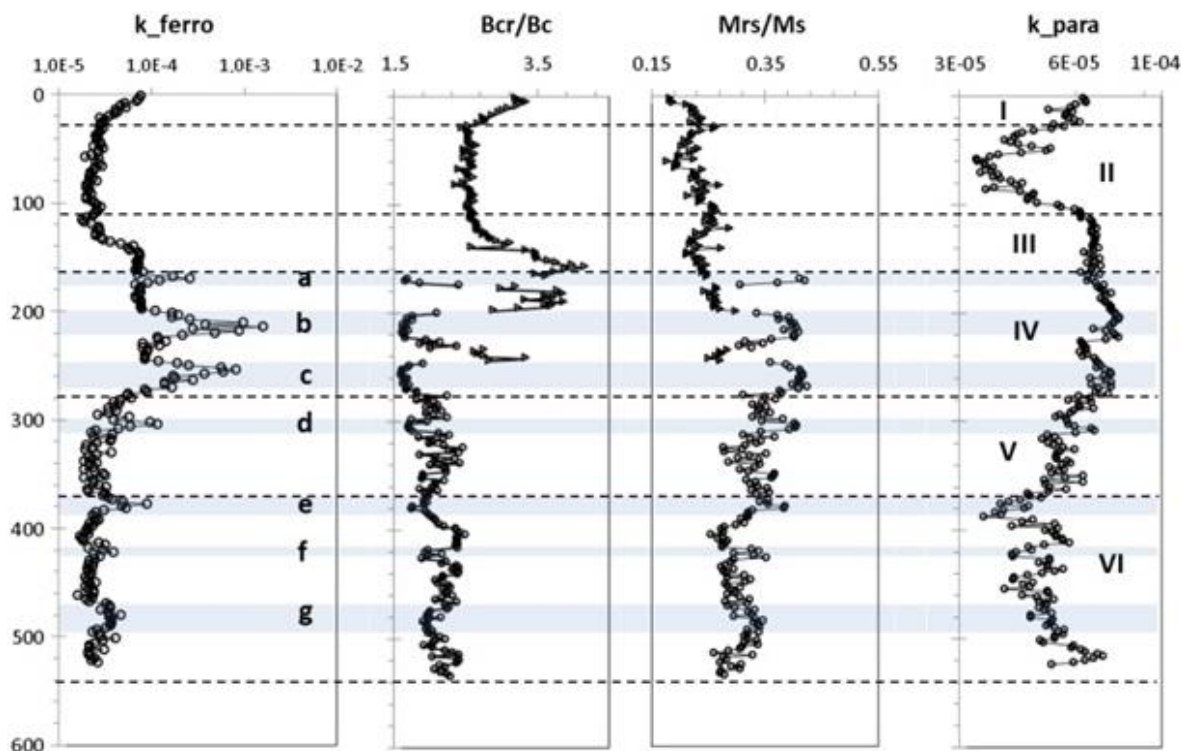


Fig. 8. Variation of k_{ferro} and k_{para} components of MS and B_{cr}/B_c , M_{rs}/M_s in core #3. Dashed lines indicate zones (I–IX) identified by changes in paramagnetic susceptibility. The colored areas correspond to zones (a–g), in which SD (biogenic) magnetic grains appear

Рис. 8. Вариации ферромагнитной, парамагнитной компонент MB, B_{cr}/B_c , M_{rs}/M_s в керновой колонке #3. Пунктирная линия указывает зоны (I–IX), определенные по изменениям парамагнитной восприимчивости. Цветные области соответствуют зонам (a–g), в которых появляются СД (биогенные) магнитные зерна

Zone III (114–164 cm) is characterized by steady values of k_{para} . In this case, a decrease in k_{ferro} occurs due to a decrease in the number of SP grains. The increase in the content of SP grains in sediments is observed within the interval of (144–164 cm). This may be due to a drop in lake bioproductivity, displacement of OATZ to sediment, and generation of biogenic SP grains.

Zone IV (164–276 cm) is characterized by high values of k_{para} . Three events leading to an increase in lake bioproductivity (a, b, c) and two events leading to a decrease can be distinguished.

Zone V (276–370 cm) is characterized by an increase in k_{para} , with a trend towards an increase in the relative content of MD grains.

Zone VI (370–534 cm) is characterized by a decrease in k_{para} , which is due to a decrease in the total humidity. Moreover, the peaks of the local increase in k_{para} correlate with an increase in the content of the MD component. This may indicate the final pulses of glacial deposits.

To sum up, such a detailed analysis of lake sediments allowed identification of stages indicating increases and decreases in climate humidity.

Conclusion

MS and hysteresis parameters (M_{rs}/M_s , B_{cr}/B_c) are quite informative and complement each other when being analyzed together in a study of modern lake sediments. Coercive spectrometry data allowed disintegration of the total MS into the paramagnetic and ferromagnetic component, which lead to new information about the nature of environmental changes. The hysteresis parameters (M_{rs}/M_s , B_{cr}/B_c) were used for studying the domain structure of grains and identification of biogenic magnetic grains in the sediment. Six zones were distinguished, differing in humidity and average air temperature, based on variations in the paramagnetic component. Data on the bioproductivity of the lake were derived from SD grain content in the sediment, which also provided information on the nature of climate changes. Joint analysis of paramagnetic and ferromagnetic susceptibility and hysteresis parameters produced information on the effect of total humidity on the bioproductivity of the lake. The next stage of this research will include 1) refinement of the borders separating climate stages based on geochemical studies and 2) correlation with global climate changes based on radiocarbon data.

REFERENCES

1. Evans M., Heller F. Environmental magnetism. *Principles and Applications of Enviromagnetism*, 2003. 299 p.
2. Pu Y., Nace T., Meyers P.A., Zhang H., Wang Y., Zhang C.L., Shao X. Paleoclimate changes of the last 1000 yr on the eastern Qinghai-Tibetan Plateau recorded by elemental, isotopic, and molecular organic matter proxies in sediment from glacial Lake Ximencuo. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2013, vol. 379–380, pp. 39–53. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2013.03.023>
3. Solotchina E.P., Sklyarov E.V., Solotchin P.A., Vologina E.G., Sklyarova O.A. Mineralogy and crystal chemistry of carbonates from the Holocene sediments of Lake Kiran (western Transbaikalia). *Connection with paleoclimate. Russian Geology and Geophysics*, 2014, vol. 55, no. 4, pp. 472–482. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2014.03.005>
4. Zhang C., Kong X., Xue B., Zhao C., McGowan S., Lin Q., Zhang K., Shen J. Double-edged effects of anthropogenic activities on lake ecological dynamics in northern China. *Evidence from palaeolimnology and ecosystem modelling*, 2023, vol. 68, no. 6, pp. 940–955. DOI: <https://doi.org/10.1111/fwb.14077>
5. Clemens S.C., Prell W.L. A 350,000 year summer-monsoon multi-proxy stack from the Owen Ridge, Northern Arabian sea. *Marine Geology*, 2003, vol. 201, pp. 35–51. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(03\)00207-X](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(03)00207-X)
6. Liu Q.S., Roberts A.P., Larrasoña J.C., Banerjee S.K., Guyodo Y., Tauxe L., Oldfield F. Rock and environmental magnetism: principles and applications. *Reviews Geophysics*, 2012, vol. 50, pp. RG4002. DOI: <https://doi.org/10.1029/2012RG000393>
7. Roberts A.P. Magnetic mineral diagenesis. *Earth-Science Reviews*, 2015, vol. 151, pp. 1–47. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.09.010>
8. Becker R.T., Marshall J.E.A., Da Silva A.-C. The Devonian Period. *The Geologic Time Scale 2020*. Eds. F.M. Gradstein, J.G. Ogg, M.D. Schmitz, G.M. Ogg. Elsevier, 2020. Vol. 2, pp. 733–810. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824360-2.00022-X>
9. Ding Z.L., Yang S.L., Sun J.M., Liu T.S. Iron geochemistry of loess and red clay deposits in the Chinese Loess Plateau and implications for long-term Asian monsoon evolution in the last 7.0 Ma. *Earth and Planetary Science Letters*, 2001, vol. 185, pp. 99–109. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(00\)00366-6](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(00)00366-6)
10. Casanova-Arenillas S., Martínez-Ruiz F., Rodríguez-Tovar F.J., Pérez-Asensio J.N., Monedero-Contreras R., Villasante-Marcos V. *Reconstructing deep-sea palaeoenvironments in the Western Alboran sea basin over the end of the Last Glacial Period and the Holocene: insights from a Multiproxy Approach*. Available at: <https://ssrn.com/abstract=4516647> (accessed 1 November 2023).
11. Rasooli N., Farpoor M.H., Mahmoodabadi M., Boroujeni I.E. Pedoenvironmental variations assessment using magnetic susceptibility in Lut Watershed, Central Iran. *Journal of Applied Geophysics*, 2022, vol. 198, pp. 104582. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926985122000532> (accessed 1 November 2023).
12. Bradák B., Seto Y., Stevens T., Újvári G., Fehér K., Költringer C. Magnetic susceptibility in the European Loess Belt: New and existing models of magnetic enhancement in loess. *Palaeogeography. Palaeoclimatology. Palaeoecology*, 2021, vol. 569, pp. 110329. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0031018221001140> (accessed 1 November 2023).
13. Dunlop D. Theory and application of the Day plot (M-rs/M-s versus H-cr/H-c). *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 2002, vol. 107, pp. 2046–2067. DOI: <https://doi.org/10.1029/2001JB000487>
14. Borisov A.S. *System of technological support for paleomagnetic studies of sediments of modern lakes*. Dr. Diss. Abstract. Kazan, 2004. 46 p. (In Russ.)
15. Nurgaliev D.K., Utemov E.V., Yassonov P.G., Nurgalieva N.G., Kosareva L.R. Remains of magnetotactic bacteria in modern lake sediments as a new tool of paleogeophysics. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Gosudarstvennogo Universiteta Series Natural Sciences*, 2009, vol. 151, no. 4, pp. 180–191. (In Russ.) Available at: https://dspace.kpfu.ru/xmlui/bitstream/handle/net/26706/151_4_est_17.pdf?sequence=1 (accessed 1 November 2023).
16. Abdrakhmanov R.F. *Fresh groundwater and mineral medicinal water reserves of Bashkortostan*. Ufa, Gilem Publ., 2014. 416 p. (In Russ.)
17. Bykova S.V. Planktonic ciliates communities of hydrological natural monuments of the Southern Urals, the Lake Kandrykul and the Lake Aslykul, Russia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, vol. 607, no. 1, pp. 012018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/607/1/012018>
18. Shkundina F.B., Gulamanova G.A. Biological diversity of autotrophic plankton in the lakes of the Republic of Bashkortostan (Russia). *Algologia*, 2011, vol. 21, no. 3, pp. 329–345. Available at: <https://old.algologia.co.ua/pdf/21/3/alg-2011-21-3-329.pdf> (accessed 1 November 2023).
19. Gorbunov M.Yu., Umanskaya M.V. Current status and trends in changes in the trophic status of Lake Kandry-Kul. *Voda: Khimia i Ekologia*, 2015, vol. 6, pp. 3–9. (In Russ.) Available at: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_25020606_64674508.pdf (accessed 1 November 2023).
20. Pokorný J., Pokorný P., Suza P., Hrouda F. A multi-function Kappabridge for high precision measurement of the AMS and the variations of magnetic susceptibility with field, temperature and frequency. *The Earth's Magnetic Interior*, 2011, vol. 1, pp. 292–301. DOI: http://dx.doi.org/10.1007/978-94-007-0323-0_20
21. Burov B.V., Nurgaliev D.K., Yasonov P.G. *Paleomagnetic analysis*. Kazan, Kazan State University Press, 1986. 167 p. (In Russ.)
22. Nurgaliev D.K., Yasonov P.G. *Coercive spectrometer*. Patent RF, no. 81805, 2009. (In Russ.)
23. Kosareva L., Nourgaliev D., Kuzina D., Spassov S., Fattakhov A. Ferromagnetic, dia-/paramagnetic and superparamagnetic components of Aral sea sediments: Significance for paleoenvironmental reconstruction. *ARN. Journal of Earth Sciences*, 2015, vol. 4, no. 1, pp. 1–6. https://www.researchgate.net/publication/282646704_FERROMAGNETIC_DIA-PARAMAGNETIC_AND_SUPERPARAMAGNETIC_COMPONENTS_OF_ARAL_SEA_SEDIMENTS_SIGNIFICANCE_FOR_PALEOENVIRONMENTAL_RECONSTRUCTION_Lina_R_Kosareva_Danis_K_Nourgaliev_Dilyara_M_Kuzina_Simo_Spasso (accessed 1 November 2023).
24. Kosareva L., Shcherbakov V., Nurgaliev D., Nurgalieva N.G., Sycheva N.K., Antonenko V.V., Kuzina D.M., Evtyugin V.G. Periodization of Holocene climatic cycles based on synchronous variations in the magnetic and geochemical parameters of the

- sediments of lake Bolshoe Yarovoe (Southwestern Siberia). *Russian Geology and Geophysics*, 2020, vol. 61, no. 7, pp. 889–907. (In Russ.) DOI: <http://dx.doi.org/10.15372/GiG2019148>
25. Burov B.V., Yasonov P.G. *Introduction to differential thermomagnetic analysis of rocks*. Kazan, KSU Publ., 1981. 168 p. (In Russ.)
26. Day R., Fuller M., Schmidt V. Hysteresis properties of titanomagnetites: grain-size and compositional dependence. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1977, vol. 13, pp. 260–267. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0031-9201\(77\)90108-X](http://dx.doi.org/10.1016/0031-9201(77)90108-X)
27. Just J., Nowaczyk N.R., Sagnotti L., Francke A., Vogel H., Lacey J.H., Wagner B. Environmental control on the occurrence of high-coercivity magnetic minerals and formation of iron sulfides in a 640 ka sediment sequence from Lake Ohrid (Balkans). *Biogeosciences*, 2016, vol. 13, no. 7, pp. 2093–2109. DOI: <https://doi.org/10.5194/bg-13-2093-2016>
28. Just J., Heslop D., Von Dobeneck T., Bickert T., Dekkers M.J., Frederichs T., Meyer I., Zabel M. Multiproxy characterization and budgeting of terrigenous end-members at the NW African continental margin. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2012, vol. 13, pp. Q0A001. DOI: <https://doi.org/10.1029/2012GC004148>
29. Maher B.A. The magnetic properties of Quaternary aeolian dusts and sediments, and their palaeoclimatic significance. *Aeolian Research*, 2011, vol. 3, pp. 87–144. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2011.01.005>
30. Minyuk P., Subbotnikova T. Rock magnetic properties of Grand Lake sediments as evidence of environmental changes during the last 60 000 years in North-East Russia. *Boreas*, 2021, vol. 50, pp. 1027–1042. DOI: <https://doi.org/10.1111/bor.12546>
31. Hu P., Liu Q., Heslop D., Roberts A.P., Jin C. Soil moisture balance and magnetic enhancement in loess–paleosol sequences from the Tibetan Plateau and Chinese Loess Plateau. *Earth and Planetary Science Letters*, 2015, vol. 409, pp. 120–132. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2014.10.035>
32. Larrasoana J.C., Roberts A.P., Liu Q., Lyons R., Oldfield F., Rohling E.J., Heslop D. Source-to-sink magnetic properties of NE Saharan dust in Eastern Mediterranean marine sediments: A review and paleoenvironmental implications. *Frontiers in Earth Science*, 2015, vol. 3, pp. 00019. DOI: <https://doi.org/10.3389/feart.2015.00019>
33. Lyons R., Oldfield F., Williams E. Mineral magnetic properties of surface soils and sands across four North African transects and links to climatic gradients. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2010, vol. 11, pp. Q08023. DOI: <https://doi.org/10.1029/2010GC003183>
34. Egli R. Characterization of individual rock magnetic components by analysis of remanence curves. Bacterial magnetite and natural processes in lakes. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2004, vol. 29, pp. 869–884. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pce.2004.03.010>
35. Roberts A.P., Chang L., Heslop D., Florindo F., Larrasoana J.C. Searching for single domain magnetite in the “pseudo-single-domain” sedimentary haystack: Implications of biogenic magnetite preservation for sediment magnetism and relative paleointensity determinations. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 2012, vol. 117, pp. B08104. DOI: <https://doi.org/10.1029/2012JB009412>
36. Snowball I., Zillén L., Sandgren P. Bacterial magnetite in Swedish varved lake-sediments: A potential biomarker of environmental change. *Quaternary International*, 2002, vol. 88, pp. 13–19. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S1040-6182\(01\)00069-6](http://dx.doi.org/10.1016/S1040-6182(01)00069-6)
37. Liu T., Da H., Zhang S., Wang W., Pan H., Yan L. Magnetotactic bacteria in vertical sediments of volcanic lakes in NE China appear Alphaproteobacteria dominated distribution regardless of waterbody types. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2022, vol. 38, pp. 76. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11274-022-03262-z>
38. Frankel R.B., Bazylinski D.A. Biologically induced mineralization by bacteria. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2003, vol. 54, pp. 95–114. DOI: <https://doi.org/10.2113/0540095>
39. Gareev K.G., Grouzdev D.S., Kharitonov P.V., Kosterov A., Koziaeva V.V., Sergienko E.S., Shevtsov M.A. Magnetotactic bacteria and magnetosomes: basic properties and applications. *Magnetochemistry*, 2021, vol. 7, no. 6, pp. 86. DOI: <https://doi.org/10.3390/magnetochemistry7060086>
40. Lippert P.C., Zachos J.C. A biogenic origin for anomalous fine-grained magnetic material at the Paleocene-Eocene boundary at Wilson Lake, New Jersey. *Paleoceanography*, 2007, vol. 22, no. 4, pp. PA4104. Available at: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2007PA001471> (accessed 1 November 2023).
41. Knyazev Yu.G., Knyazeva O.Yu., Snachev V.I., Zhdanov A.V., Karimov T.R., Ajdarov E.M., Masagutov R.H., Arslanova E.R. *Geological Map of the Russian Federation. Scale 1:1000000*. Saint Petersburg, Cartographic factory VSEGEI Publ., 2013. (In Russ.) https://webftp.vsegei.ru/GGK1000/N-40/N-40_ObZap.pdf (accessed 1 November 2023).

Information about the authors

Dilyara M. Kuzina, Cand Sc., Senior Researcher, Kazan Federal University, 4/5, Kremlevskaya street, Kazan, 420008, Russian Federation. di.kuzina@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-1626-4636>

Anastasiia R. Yusupova, Junior Researcher, Kazan Federal University, 4/5, Kremlevskaya street, Kazan, 420008, Russian Federation. i@ajusupova.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8732-3053>

Nuriia G. Nurgalieva, Dr. Sc., Professor, Kazan Federal University, 4/5, Kremlevskaya street, Kazan, 420008, Russian Federation. nurgal07@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4372-9777>

Danis K. Nurgaliev, Dr. Sc., Professor, Kazan Federal University, 4/5, Kremlevskaya street, Kazan, 420008, Russian Federation. danis.nourgaliev@kpfu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4269-0962>

Pavel S. Krylov, Cand. Sc., Senior Researcher, Kazan Federal University, 4/5, Kremlevskaya street, Kazan, 420008, Russian Federation. sprintfront@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0892-4940>

Dinara I. Mulikova, Student, Kazan Federal University, 4/5, Kremlevskaya street, Kazan, 420008, Russian Federation. dindirin8642@gmail.com

Received: 07.11.2023

Revised: 22.01.2024

Accepted: 09.09.2024

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Evans M., Heller F. Environmental Magnetism // Principles and Applications of Enviromagnetism. – 2003. – 299 p.
2. Paleoclimate changes of the last 1000 yr on the eastern Qinghai–Tibetan Plateau recorded by elemental, isotopic, and molecular organic matter proxies in sediment from glacial Lake Ximencuo / Y. Pu, T. Nace, P.A. Meyers, H. Zhang, Y. Wang, C.L. Zhang, X. Shao // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. – 2013. – Vol. 379. – № 380. – P. 39–53. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2013.03.023>
3. Mineralogy and crystal chemistry of carbonates from the Holocene sediments of Lake Kiran (western Transbaikalia) / E.P. Solotchina, E.V. Sklyarov, P.A. Solotchin, E.G. Vologina, O.A. Sklyarova // Connection with paleoclimate. Russian Geology and Geophysics. – 2014. – Vol. 55. – P. 472–482. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2014.03.005>
4. Double-edged effects of anthropogenic activities on lake ecological dynamics in northern China / C. Zhang, X. Kong, B. Xue, C. Zhao, S. McGowan, Q. Lin, K. Zhang, J. Shen. // Evidence from palaeolimnology and ecosystem modelling. – 2023. – Vol. 68. – № 6. – P. 940–955. DOI: <https://doi.org/10.1111/fwb.14077>
5. Clemens S.C., Prell W.L. A 350,000 year summer-monsoon multi-proxy stack from the Owen Ridge, Northern Arabian sea. // Marine Geology. – 2003. – Vol. 201. – P. 35–51. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(03\)00207-X](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(03)00207-X)
6. Rock and environmental magnetism: Principles and applications / Q.S., Liu A.P. Roberts, J.C. Larrasoana, S.K. Banerjee, Y. Guyodo, L. Tauxe, F. Oldfield // Reviews Geophysics. – 2012. – Vol. 50. – P. RG4002. DOI: <https://doi.org/10.1029/2012RG000393>
7. Roberts A.P. Magnetic mineral diagenesis // Earth-Science Reviews. – 2015. – Vol. 151. – P. 1–47. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.09.010>
8. Becker R.T., Marshall J.E.A., Da Silva A.-C. The Devonian Period // The Geologic Time Scale 2020 / Eds. F.M. Gradstein, J.G. Ogg, M.D. Schmitz, G.M. Ogg. Elsevier. – 2020. – Vol. 2. – P. 733–810. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824360-2.00022-X>
9. Iron geochemistry of loess and red clay deposits in the Chinese Loess Plateau and implications for long-term Asian monsoon evolution in the last 7.0 Ma / Z.L. Ding, S.L. Yang, J.M. Sun, T.S. Liu // Earth and Planetary Science Letters. – 2001. – Vol. 185. – P. 99–109. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(00\)00366-6](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(00)00366-6)
10. Reconstructing deep-sea palaeoenvironments in the Western Alboran sea basin over the end of the Last Glacial Period and the Holocene: insights from a Multiproxy Approach / S. Casanova-Arenillas, F. Martínez-Ruiz, F.J. Rodríguez-Tovar, J.N. Pérez-Asensio, R. Monedero-Contreras, V. Villasante-Marcos. URL: <https://ssrn.com/abstract=4516647> (дата обращения 01.11.2023).
11. Pedoenvironmental variations assessment using magnetic susceptibility in Lut Watershed, Central Iran / N. Rasooli, M.H. Farpoor, M. Mahmoodabadi, I.E. Boroujeni // Journal of Applied Geophysics. – 2022. – Vol. 198. – P. 104582. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926985122000532> (дата обращения 01.11.2023).
12. Magnetic susceptibility in the European Loess Belt: New and existing models of magnetic enhancement in loess / B. Bradák, Y. Seto, T. Stevens, G. Újvári, K. Fehér, C. Kölringer // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. – 2021. – Vol. 569. – P. 110329. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0031018221001140> (дата обращения 01.11.2023).
13. Dunlop D.J. Theory and application of the Day plot (M_{rs}/M_s versus H_{cr}/H_c) // Journal of Geophysical Research Solid Earth. – 2002. – Vol. 107. – P. 2046–2067. DOI: <https://doi.org/10.1029/2001JB000487>
14. Борисов А.С. Система технологического обеспечения палеомагнитных исследований отложений современных озер: автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. – Казань, 2004. – 46 с.
15. Остатки магнитотактических бактерий в отложениях современных озер – новый инструмент палеогеофизики / Д.К. Нургалиев, Э.В. Утемов, П.Г. Ясонов, Н.Г. Нургалиева, Л.Р. Косарева // Ученые Записки Казанского Государственного Университета Серия Естественные науки. – 2009. – Т. 151. – № 4. – С. 180–191. URL: https://dspace.kpfu.ru/xmlui/bitstream/handle/net/26706/151_4_est_17.pdf?sequence=1 (дата обращения 01.11.2023).
16. Абдрахманов Р.Ф. Пресные подземные и минеральные лечебные воды Башкортостана. – Уфа: Гилем, Башкирская энциклопедия, 2014. – 416 с.
17. Bykova S.V. Planktonic ciliates communities of hydrological natural monuments of the Southern Urals, the Lake Kandrykul and the Lake Aslykul, Russia // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2020. – V. 607. – № 1. – P. 012018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/607/1/012018>
18. Shkundina F.B., Gulamanova G.A. Biological diversity of autotrophic plankton in the lakes of the Republic of Bashkortostan (Russia) // Algologia. – 2011. – Vol. 21. – № 3. – P. 329–345. URL: <https://old.algologia.co.ua/pdf/21/3/alg-2011-21-3-329.pdf> (дата обращения 01.11.2023).
19. Горбунов М.Ю., Уманская М.В. Современное состояние и тенденции изменения трофического статуса озера Кандрыкуль // Вода: Химия и Экология. – 2015. – № 6. – С. 3–9. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_25020606_64674508.pdf (дата обращения 01.11.2023).
20. A multi-function Kappabridge for high precision measurement of the AMS and the variations of magnetic susceptibility with field, temperature and frequency / J. Pokorný, P. Pokorný, P. Suza, F. Hroudá // The Earth's Magnetic Interior. – 2011. – Vol. 1. – P. 292–301. DOI: http://dx.doi.org/10.1007/978-94-007-0323-0_20
21. Буров Б.В., Нургалиев Д.К., Ясонов П.Г. Палеомагнитный анализ. – Казань: Изд-во КГУ, 1986. – 167 с.
22. Коэрцитивный спектрометр: пат. № 81805 Российская Федерация. № 2008125924/22; заявл. 17.06.2008; опубл. 27.03.2009, Бюл. № 9. – 20 с.

23. Ferromagnetic, dia-/paramagnetic and superparamagnetic components of Aral sea sediments: Significance for paleoenvironmental reconstruction / L. Kosareva, D. Nourgaliev, D. Kuzina, S. Spassov, A. Fattakhov // *ARNP. Journal of Earth Sciences*. – 2015. – Vol. 4. – № 1. – P. 1–6. https://www.researchgate.net/publication/282646704_FERROMAGNETIC_DIA-PARAMAGNETIC_AND_SUPERPARAMAGNETIC_COMPONENTS_OF_ARAL_SEA_SEDIMENTS_SIGNIFICANCE_FOR_PALEOENVIRONMENTAL_RECONSTRUCTION_Lina_R_Kosareva_Danis_K_Nourgaliev_Dilyara_M_Kuzina_Simo_Spassov (дата обращения 01.11.2023).
24. Периодизация климатических циклов в голоцене по синхронным вариациям магнитных и геохимических параметров осадков озера Большое Яровое (юго-запад Сибири) / Л.П. Косарева, В.П. Щербаков, Д.К. Нурғалиев, Н.Г. Нурғалиева, Н.К. Сычева, В.В. Антоненко, Д.М. Кузина, В.Г. Евтюгин // *Геология и геофизика*. – 2020. – Т. 61. – № 7. – С. 889–907. DOI: <http://dx.doi.org/10.15372/GiG2019148>
25. Буров Б.В., Ясонов П.Г. Введение в дифференциальный терромагнитный анализ горных пород. – Казань: Изд-во КГУ, 1979. – 159 с.
26. Day R., Fuller M., Schmidt V. Hysteresis properties of titanomagnetites: grain-size and compositional dependence // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. – 1977. – Vol. 13. – P. 260–267. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0031-9201\(77\)90108-X](http://dx.doi.org/10.1016/0031-9201(77)90108-X)
27. Environmental control on the occurrence of high-coercivity magnetic minerals and formation of iron sulfides in a 640 ka sediment sequence from Lake Ohrid (Balkans) / J. Just, N.R. Nowaczyk, L. Sagnotti, A. Francke, H. Vogel, J.H. Lacey, B. Wagner // *Biogeosciences*. – 2016. – Vol. 13. – № 7. – P. 2093–2109. DOI: <https://doi.org/10.5194/bg-13-2093-2016>
28. Multiproxy characterization and budgeting of terrigenous end-members at the NW African continental margin / J. Just, D. Heslop, T. von Dobeneck, T. Bickert, M.J. Dekkers, T. Frederichs, I. Meyer, M. Zabel // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. – 2012. – Vol. 13. – P. Q0A001. DOI: <https://doi.org/10.1029/2012GC004148>
29. Maher B.A. The magnetic properties of Quaternary aeolian dusts and sediments, and their palaeoclimatic significance // *Aeolian Research*. – 2011. – Vol. 3. – P. 87–144. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2011.01.005>
30. Minyuk P., Subbotnikova T. Rock magnetic properties of Grand Lake sediments as evidence of environmental changes during the last 60 000 years in North-East Russia // *Boreas*. – 2021. – Vol. 50. – P. 1027–1042. DOI: <https://doi.org/10.1111/bor.12546>
31. Soil moisture balance and magnetic enhancement in loess–paleosol sequences from the Tibetan Plateau and Chinese Loess Plateau / P. Hu, Q. Liu, D. Heslop, A.P. Roberts, C. Jin // *Earth and Planetary Science Letters*. – 2015. – Vol. 409. – P. 120–132. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2014.10.035>
32. Source-to-sink magnetic properties of NE Saharan dust in Eastern Mediterranean marine sediments: A review and paleoenvironmental implications / J.C. Larrasoana, A.P. Roberts, Q. Liu, R. Lyons, F. Oldfield, E.J. Rohling, D. Heslop // *Frontiers in Earth Science*. – 2015. – Vol. 3. – P. 00019. DOI: <https://doi.org/10.3389/feart.2015.00019>
33. Lyons R., Oldfield F., Williams E. Mineral magnetic properties of surface soils and sands across four North African transects and links to climatic gradients // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. – 2010. – Vol. 11. – P. Q08023. DOI: <https://doi.org/10.1029/2010GC003183>
34. Egli R. Characterization of individual rock magnetic components by analysis of remanence curves. Bacterial magnetite and natural processes in lakes // *Physics and Chemistry of the Earth*. – 2004. – Vol. 29. – P. 869–884. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pce.2004.03.010>
35. Searching for single domain magnetite in the “pseudo-single-domain” sedimentary haystack: Implications of biogenic magnetite preservation for sediment magnetism and relative paleointensity determinations / A.P. Roberts, L. Chang, D. Heslop, F. Florindo, J.C. Larrasoana // *Journal of Geophysical Research Solid Earth*. – 2012. – Vol. 117. – P. B08104. DOI: <https://doi.org/10.1029/2012JB009412>
36. Snowball I., Zillén L., Sandgren P. Bacterial magnetite in Swedish varved lake-sediments: a potential biomarker of environmental change // *Quaternary International*. – 2002. – Vol. 88. – P. 13–19. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S1040-6182\(01\)00069-6](http://dx.doi.org/10.1016/S1040-6182(01)00069-6)
37. Magnetotactic bacteria in vertical sediments of volcanic lakes in NE China appear Alphaproteobacteria dominated distribution regardless of waterbody types / T. Liu, H. Da, S. Zhang, W. Wang, H. Pan, L. Yan // *World Journal of Microbiology and Biotechnology*. – 2022. – Vol. 38. – P. 76. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11274-022-03262-z>
38. Frankel R.B., Bazylinski D.A. Biologically induced mineralization by bacteria // *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. – 2003. – Vol. 54. – P. 95–114. DOI: <https://doi.org/10.2113/0540095>
39. Magnetotactic bacteria and magnetosomes: basic properties and applications / K.G. Gareev, D.S. Grouzdev, P.V. Kharitonskii, A. Kosterov, V.V. Koziaeva, E.S. Sergienko, M.A. Shevtsov // *Magnetochemistry*. – 2021. – Vol. 7. – № 6. – P. 86. DOI: <https://doi.org/10.3390/magnetochemistry7060086>
40. Lippert P.C., Zachos J.C. A biogenic origin for anomalous fine-grained magnetic material at the Paleocene-Eocene boundary at Wilson Lake, New Jersey // *Paleoceanography*. – 2007. – Vol. 22. – № 4. – P. PA4104. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2007PA001471> (дата обращения 01.11.2023).
41. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (третье поколение). Уфа. Объяснительная записка / Ю.Г. Князев, О.Ю. Князева, В.И. Сначев, А.В. Жданов, Т.Р. Каримов, Э.М. Айдаров, Р.Х. Масагутов, Э.Р. Арсланова. – СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2013. – 512 с. URL: https://webftp.vsegei.ru/GGK1000/N-40/N-40_ObZap.pdf (дата обращения 01.11.2023).

Информация об авторах

Диляра Мтыгулловна Кузина, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт геологии и нефтегазовых технологий, Казанский федеральный университет, Россия, 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 4/5. di.kuzina@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-1626-4636>

Анастасия Рафаиловна Юсупова, младший научный сотрудник, Институт геологии и нефтегазовых технологий, Казанский федеральный университет, Россия, 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 4/5. i@ajusupova.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8732-3053>

Нурия Гавазовна Нургалиева, доктор геолого-минералогических наук, доцент, профессор, Институт геологии и нефтегазовых технологий, Казанский федеральный университет, Россия, 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 4/5. nurgal07@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4372-9777>

Данис Карлович Нургалиев, доктор геолого-минералогических наук, профессор, директор, Институт геологии и нефтегазовых технологий, Казанский федеральный университет, Россия, 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 4/5. danis.nourgaliev@kpfu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4269-0962>

Павел Сергеевич Крылов, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт геологии и нефтегазовых технологий, Казанский федеральный университет, Россия, 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 4/5. sprintfront@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0892-4940>

Муликова Динара Илхомовна, студент, Институт геологии и нефтегазовых технологий, Казанский федеральный университет, Россия, 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 4/5. dindirin8642@gmail.com

Поступила в редакцию: 07.11.2023

Поступила после рецензирования: 22.01.2024

Принята к публикации: 09.09.2024

УДК 550.42 (571.55)

DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4452

Шифр специальности ВАК: 1.6.10 (25.00.11)

Амазарканское золоторудное месторождение: условия формирования, источники рудного вещества (Восточное Забайкалье)

Б.Н. Абрамов^{1✉}, Ю.А. Калинин², А.А. Боровиков², В.Ф. Посохов³, В.Н. Реутский²

¹ Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, Россия, г. Чита

² Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Россия, г. Новосибирск

³ Геологический институт им. Н.Л. Добрецова СО РАН, Россия, г. Улан-Удэ

✉ b_abramov@mail.ru

Аннотация. *Актуальность* исследования состоит в необходимости выяснения источников и условий формирования золотого оруденения Амазарканского золоторудного месторождения. Характерной особенностью месторождения является пространственная совмещенность золотого оруденения и малых интрузий среднего и основного состава амуджиканского комплекса. *Целью* исследования является определение физико-химических условий и природы источника рудного вещества Амазарканского месторождения. *Методы.* Для определения элементного состава пород использовался ИСП-МС метод и стандартный химический анализ. Изотопный состав серы сульфидов определен методом газовой масс-спектрометрии, а состав флюидных включений в кварце рудных жил изучен традиционными методами термобарогеохимии и КР-спектроскопии в Центре коллективного пользования многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (г. Новосибирск). Определение изотопного состава кислорода проводилось в Геологическом институте СО РАН (г. Улан-Удэ) с использованием установки MIR 10-30 системы лазерного нагрева с лазером CO₂ мощностью 100 ватт и длиной волны 10,6 мкм в инфракрасной области в присутствии реагента BrF₅. *Результаты.* Установлена пространственная приуроченность рудных зон к мезозойским дайкам амуджиканского комплекса (J₂₋₃). Соотношения Eu/Sm и Eu/Eu* в дайках указывают на фракционирование магматических расплавов в очагах на уровне нижней континентальной коры и низкую степень их дифференциации. Характер распределения РЗЭ в дайках амуджиканского комплекса и в рудах месторождения аналогичен. Eu/Sm–Eu/Eu* фигуративные точки составов рудных жил и гранодиоритов амуджиканского комплекса образуют единый тренд. Дайки амуджиканского комплекса характеризуются повышенным содержанием Au от 0,026 до 1,17 г/т. Эти данные дают основание предполагать наличие парагенетической связи Au-оруденения с породами амуджиканского комплекса. Рудные жилы продуктивных стадий рудообразования образовались при температуре от 125 до 410 °С. Расчетный изотопный состав S и O рудообразующего флюида, находящегося в равновесии с пиритом и кварцем, а также отношение Co/Ni > 1 в рудах указывают на присутствие магматической компоненты в его составе.

Ключевые слова: Амазарканское золоторудное месторождение, рудные ассоциации, изотопы кислорода, изотопы серы, индикаторные отношения элементов, магматические источники, флюидные включения

Благодарности: Работа выполнена по госзаданиям Института природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, Института геологии и минералогии СО РАН (№ 122041400237-8, 122041400171-5), Геологического института СО РАН.

Для цитирования: Амазарканское золоторудное месторождение: условия формирования, источники рудного вещества (Восточное Забайкалье) / Б.Н. Абрамов, Ю.А. Калинин, А.А. Боровиков, В.Ф. Посохов, В.Н. Реутский // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 10. – С. 56–70. DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4452

UDC 550.42 (571.55)

DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4452

Amazarkan gold deposit: conditions of formation, sources of ore substance (Eastern Transbaikalia)

B.N. Abramov¹✉, Yu.A. Kalinin², A.A. Borovikov², V.F. Posokhov³, V.N. Reutsky²

¹ Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology SB RAS, Chita, Russian Federation

² V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

³ Geological Institute SB RAS, Ulan-Ude, Russian Federation

✉ b_abramov@mail.ru

Abstract. Relevance. The need to clarify the sources and conditions of formation of gold mineralisation of the Amazarkan gold deposit. The characteristic feature of the deposit is the spatial combination of gold mineralisation and small intrusions of the middle and basic composition of the Amudzhikan complex. **Aim.** Determination of physico-chemical conditions and nature of the source of the ore substance of the Amazarkan deposit. **Methods.** ICP-MS method and standard chemical analysis were used to determine the elemental composition of rocks. Sulfur isotope composition of sulfides was obtained using gas-source mass-spectrometry and fluid inclusions in quartz of ore veins were studied by traditional methods of thermobarogeochemistry and by FTIR spectroscopy at the Centre for Collective Use of Multi-element and Isotope Studies of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk). The oxygen isotope composition was determined at the Geological Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Ulan-Ude) using the MIR 10-30 laser heating system with a 100-watt CO₂ laser and a wavelength of 10.6 μm in the infrared region in the presence of BrF₅ reagent. **Results.** The authors have established the spatial confinement of ore zones to Mesozoic dikes of the Amudzhikan complex (J₂₋₃). The Eu/Sm and Eu/Eu* ratios in the dikes indicate fractionation of magmatic melts in the sources at the level of the lower continental crust and low degree of their differentiation. The character of REE distribution in the rocks of dikes of the Amudzhikan complex is similar to the distribution of REE in the ores of the deposit. Eu/Sm–Eu/Eu* figurative points of compositions of ore veins and granodiorites of the Amudzhikan complex form a single trend. Dykes of the Amudzhikan complex are characterized by increased Au content from 0.026 to 1.171 g/t. These data suggest a paragenetic link between Au mineralization and rocks of the Amudzhikan complex. Ore veins of productive stages of ore formation were formed at temperatures ranging from 125 to 410°C. The calculated S and O isotopic composition of the ore-forming fluid in equilibrium with pyrite and quartz, as well as the Co/Ni>1 ratio in the ores indicate the presence of a magmatic component in its composition.

Keywords: Amazarkan gold deposit, ore associations, oxygen and sulfur isotopes, indicator ratios of elements, magmatic sources, fluid inclusions

Acknowledgements: The work was carried out according to state assignments of the Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology SB RAS, Institute of Geology and Mineralogy SB RAS (№ 122041400237-8, 122041400171-5), Institute of Geology SB RAS.

For citation: Abramov B.N., Kalinin Yu.A., Borovikov A.A., Posokhov V.F., Reutsky V.N. Amazarkan gold deposit: conditions of formation, sources of ore substance (Eastern Transbaikalia). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 10, pp. 56–70. DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4452

Введение

Забайкалье является крупной ресурсной базой России по рудной и россыпной золотодобыче. Месторождения золота Забайкальского края принадлежат к различным геолого-промышленным типам – собственно золоторудным и комплексным золотосодержащим. Среди них наибольшее количество принадлежит золото-кварцевой, золото-сульфидно-кварцевой и золото-серебряной рудным формациям. В последние годы существенный прирост запасов золота был достигнут за счет разведки и переоценки золото-железо-скарновых (Быстринское) и золото-содержащих Cu-Мо-порфировых (или золото-медно-

скарновых) (Култуминское, Бугдаинское, Лугоканское и др.) месторождений. Вероятно, и дальнейшие перспективы прироста запасов золота будут связаны с выявлением такого типа объектов. В то же время в современных сложных условиях обеспечения импортонезависимости государства [1] «классические» жильные месторождения, отрабатывавшиеся на протяжении длительного времени, пока не утратили своего значения.

Магматические комплексы Восточного Забайкалья, с которыми связана Au- и Cu-Мо-порфировая минерализация региона, представлены плутоническими и вулканоплутоническими произ-

водными шошонит-латитовой и высококалийевой известково-щелочной магм [1–3]. Установленная перемежаемость этих магм во времени и присутствие комбинированных даек сложного строения в рудных полях Мо-порфировых и золоторудных месторождений указывает на одновременное существование магматических очагов разных глубинных уровней (мантийного и корового), с которыми могла быть связана генерация магматических расплавов и магматогенных флюидов, участвовавших в процессах рудообразования на золоторудных и Cu–Мо-порфировых месторождениях. Основными критериями парагенетической связи процессов рудообразования и магматизма служат одновременность их проявления и совмещенность ареалов распространения. Проследить генетические связи рудной минерализации с конкретными магматическими фазами можно путем сопоставления геохимического состава магматических пород и руд, с ними связанных. Одним из таких инструментов является исследование геохимических особенностей и состава магматических пород и рудообразующих флюидов. Идентификация конкретных фаз рудоносных магматических комплексов, как вероятных магматических источников рудообразующих флюидов, может быть использована как критерий генетической связи рудообразования и магматизма и иметь большое значение для создания адекватных генетических моделей рудных месторождений. Амазарканское месторождение подготовлено к промышленному освоению. Ранее при проведении тематических работ был изучен структурный и магматический контроль оруденения, минеральный состав руд, выделены стадии минерализации. Цель настоящей работы авторы видят в обобщении всей накопленной геологической информации и в выяснении на этой основе, с учетом новых геохимических данных, условий рудообразования с оценкой возможных источников рудного вещества.

Фактический материал и методика исследования

В основу публикации положен фактический материал, собранный авторами в процессе полевых исследований, а также материал территориальных геологических фондов (г. Чита). Изучение элементного состава пород и руд проведено в аналитических лабораториях Геологического института СО РАН (г. Улан-Удэ) и в Центре коллективного пользования многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (г. Новосибирск). Содержания элементов определены рентгенофлуоресцентным методом на спектрометре ARL Perform'X 4. Пороги обнаружения V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, As, Se, Br, Rb, Sr Y, Zr, Nb, Mo 1–3 г/т; Hf, Ta, W, Nb, Bi, Th, U – 5–10 г/т. Содержания золота определялось пробирно-атомно-эмиссионным методом с индуктивно

связанной плазмой в ЗАО «SGS Vostok Limited» (г. Чита). Измерения концентраций редкоземельных элементов проведены ИСП-АЭС методом. Определение изотопного состава кислорода проводилось с использованием установки экстракции кислорода с лазерным нагревом, оснащённой лазером MIR 10-30 мощностью 30 ватт и длиной волны 10,6 мкм, в присутствии реагента BrF₅ в ЦКП «Геоспектр» ГИН СО РАН. Результаты анализа представлены относительно стандарта VSMOW. Изотопный состав серы в сульфидах и углерода в графите проанализирован в ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований СО РАН на базе ИГМ СО РАН. Измерения проводили на газовом масс-спектрометре Delta V Advantage в режиме двойного напуска после количественного окисления образцов в вакуумной установке. Методические детали описаны в [4, 5]. Значения $\delta^{34}\text{S}$ и $\delta^{13}\text{C}$ (‰) приведены относительно стандартов VCDT и VPDB, соответственно.

Для исследования флюидных включений (ФВ) применялись методы крио- и термометрии (микротермокамера THMSG-600 фирмы Linkam с диапазоном измерений от –196 до +600 °C). Изучение состава газовой фазы ФВ проводилось методом КР-спектроскопии (спектрометр Ramanor U-1000 фирмы JobinYvon, лазер MillenniaProS2 (532 nm), детектор HORIBA JOBIN YVON, г. Новосибирск). Общая концентрация солей в растворах ФВ и принадлежность их к той или иной водно-солевой системе определялись по данным криометрии [6–11].

Краткая характеристика геологического строения месторождения

Амазарканское месторождение открыто Итакинской партией Читинского геологического управления при поисковых работах масштаба 1:10000, проводимых с 1964 по 1967 гг. Предварительная и детальная разведка месторождения проводились в 1993–1998 гг.

Месторождение расположено в юго-западной части Становой складчатой области в Пришилкинской мобильной зоне, образованной в результате коллизии Сибирского и Монголо-Китайского континентов в юрский период [2].

В Восточном Забайкалье значительная часть золоторудных месторождений образована в среднеюрское и раннемеловое время, соответствующие коллизионным и рифтогенным этапам развития региона [2].

В районе месторождения развиты осадочные и интрузивные образования архейского, палеозойского и мезозойского возрастов. В структурном отношении месторождение локализовано в узле пересечения Урюмо-Амазарканской северо-восточной зоны разломов с нарушениями более высоких порядков субширотного, северо-восточного и субмеридионального направлений (рис. 1).

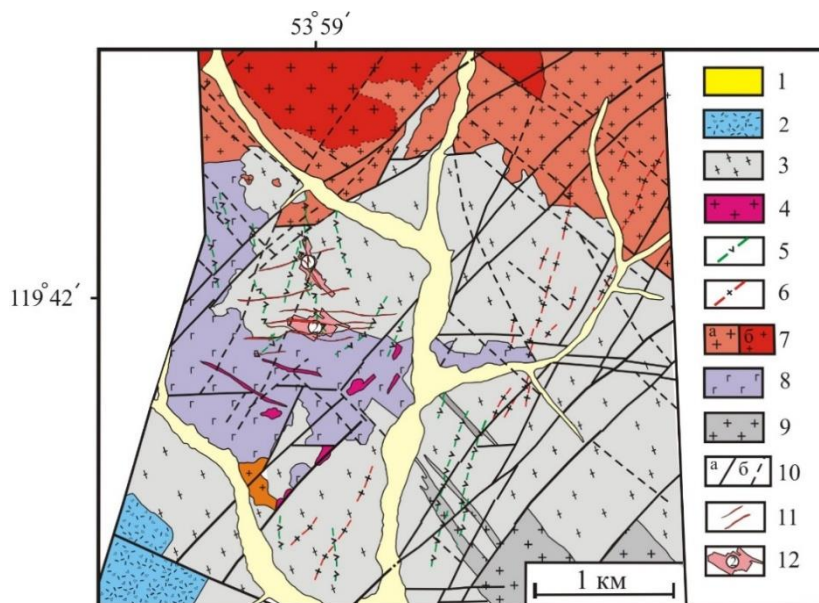


Рис. 1. Схема геологического строения Амазарканского золоторудного месторождения: 1 – четвертичные отложения (Q): аллювиальные песчано-галечные отложения пойм и надпойменных террас; 2 – нюкжинская серия (J₃ nk), фельзитовые и кварцевые порфиры и их туфы, песчаники, алевролиты, туфы, валунно-галечные конгломераты; 3 – амазарская свита (AR am₂), разнозернистые гранатовые гнейсы с прослоями кристаллических сланцев; амуджиканский интрузивный комплекс (J₃a): 4 – штоки гранодиорит-порфиров; 5 – дайки лампрофиров, диоритовых порфиров, габброидов; 6 – амананский комплекс (J₁a), дайки кварцевых порфиров, гранит-порфиров; 7 – олекминский комплекс (PZ₁): а) биотитовые граниты; б) порфировидные граниты; 8 – раннепротерозойские габброиды (PR₁); 9 – архейские гранито-гнейсы (AR); 10 – тектонические нарушения: а) главные; б) второстепенные; 11 – сульфидные кварц-карбонатные жилы; 12 – рудные тела по результатам опробования, в окружности 1 – Северная рудная зона, 2 – Широтная рудная зона

Fig. 1. Schematic geological map of the Amazarcan gold deposit: 1 – Quaternary rocs (Q): alluvial sand and pebble formations of floodplains and above-floodplain terraces; 2 – Nyukzha series (J₃ nk), felsic and quartz porphyries and their tuffs, sandstones, siltstones, tuffs, boulder-pebble conglomerates; 3 – Amazar formation (AR am₂), heterogeneous garnet gneisses with interlayers of crystalline schists; 3–5 – Amudzhikan intrusive complex (J₃a): 4 – granodiorite porphyry stocks; 5 – lamprophyre dikes, diorite porphyrites, gabbroids; 6 – Amanan complex (J₁a), dikes of quartz porphyry, granite porphyry; 7 – Olekma complex (PZ₁): a) biotite granites; b) porphyritic granites; 8 – Early Proterozoic gabbroids (PR₁); 9 – Archean granite-gneisses (AR); 10 – tectonic disturbances: a) main; b) secondary; 11 – sulfide quartz-carbonate veins; 12 – ore bodies based on sampling results, in circle 1 – Northern ore zone, 2 – Latitudinal ore zone

Породы, вмещающие месторождение, представлены отложениями амазарской свиты архея (U-Pb SHRIMP, 1873±3 млн лет) [12], сложенной гранулитам и гнейсами с прослоями кристаллических сланцев, амфиболитов и кальцифиров. В нижней части свиты преобладают гранулиты, в верхней части разреза преобладают гнейсы и кристаллические сланцы, часто с графитом. Общая мощность амазарканской свиты составляет около 3500 м. В минеральном составе графитовых гнейсов присутствуют кварц (50–55 мас. %), турмалин (20–25 мас. %), апатит (2–3 мас. %). Гнейсы и кристаллические сланцы в районе месторождения интенсивно графитизированы. Графит образует тонкочешуйчатые скопления (0,01–0,08 мм) и графитовые прожилки. По содержанию углерода (1,5–26,3 мас. %) графитовые гнейсы соответствуют высокоуглеродистым сланцам (табл. 1).

В пределах месторождения графитовые гнейсы представлены темно-серыми до черных

мелкозернистыми породами со слоисто-плочатой текстурой. Среднее содержание золота в графитовых гнейсах амазарской свиты составляет 0,09 г/т, что почти на два порядка превышает фоновые содержания (табл. 1), и колеблется от 0,05 до 2,54 г/т [13].

Отложения нюкжинской серии (J₃nk) обнажаются в юго-западной части Амазарканского рудного поля. Нижняя часть разреза серии представлена валунно-галечными конгломератами с прослоями и линзами песчаников. Верхняя часть разреза сложена вулканогенно-осадочными породами, залегающими на конгломератах с угловым несогласием. Мощность отложений нюкжинской серии составляет около 150 м.

В северо-западной части района месторождения обнажается габбро-диоритовый массив раннепротерозойского возраста, сложенный в центральной части кварцевыми диоритами, сменяющимися в краевых частях роговообманковыми габбро.

Таблица 1. Содержания золота, изотопный состав, Сорг графитовых гнейсов амазарской свиты

Table 1. Gold content, isotopic composition, Sorg of graphite gneiss of the Amazar formation

№ проб Sample no.	Минерал Mineral	$\delta^{313}\text{C}(\text{‰})$ PDB	$S_{\text{орг}}$ S _{org} (%)	Содержания Au, г/т Au content, g/t
Кварцево-сульфидные жилы с графитом Quartz-sulfide veins with graphite				
655	Графит Graphite	-28,43	-	10,85
655-1		-28,90	-	0,11
655-2		-27,23	-	0,76
Графитовые гнейсы/Graphite gneiss				
901	Графит Graphite	-24,84	8,20	0,06
902		-24,02	26,28	0,06
904		-22,30	1,52	2,54
905		-21,96	4,68	1,70
906		-22,28	3,06	0,21
907		-24,93	5,31	0,56
908		-24,93	11,8	0,42
Виды анализов/Types of analyses				
Спектрозолотометрия Spectrosolotometry (n=33)*			Пробирный анализ Assay (n=16)*	
Графитсодержащие гнейсы Graphite-containing gneiss			Графитовые гнейсы с сульфидной минерализацией Graphite gneiss with sulfide mineralization	
<u>от-до/</u> <u>from-to</u>		<u>0-0.4</u>	<u>от-до/</u> <u>from-to</u>	<u>0.1-11.0</u>
среднее/ <u>average</u>		0.09	среднее/ <u>average</u>	2.90

*– по данным фондовых материалов, n – число анализов.

*– according to stock materials, n is the number of analyses.

В северной части месторождения развиты интрузивные образования олекминского комплекса (PZ₁), представленного крупным массивом гранитоидов. Преобладающие в составе комплекса биотитовые и порфировидные граниты имеют возраст 358 ± 2 млн лет [14].

Амананский комплекс (J_{1a}) представлен редкими дайками гранит-порфиров и кварцевых порфиров возрастом 193–260 млн лет [15].

Амуджиканский комплекс (J_{3a}) представляют дайки гранодиорит-порфиров, диоритовых порфиров и лампрофиров возрастом 145–165 млн лет [15]. Мощность даек достигает 20 м, протяженность – 1,5 км. Простираются даек контролируется трещинными структурами северо-восточного, северо-западного, субширотного направлений, широко развитых в пределах площади. Контакты с вмещающими породами резкие, прямолинейные с зонами закалки, часто тектонические.

Диоритовые порфириты – темные, зеленовато-серые порфировые породы с тонкокристаллической основной массой. Вкрапленники роговой обманки, плагиоклаза (№ 30–34), биотита составляют 15–20 % объема породы. Основная масса гипидиоморфно-зернистой структуры состоит из плагиоклаза (№ 39–40), изредка встречается кварц. Акцессорные минералы – магнетит, апатит, редко титанит и алланит. Диорит-порфириты иногда слагают краевые

части даек гранодиорит-порфиров и имеют с ними постепенные переходы.

Гранодиорит-порфиры – серые или розовато-серые порфировые породы. Вкрапленники зонального плагиоклаза (№ 28–35), биотита, роговой обманки, редко кварца размером 3–4 мм составляют от 20 до 40 % объема породы, при преобладании плагиоклаза (до 60 % состава вкрапленников). Основная масса тонкозернистая, состоит из кварца (30–50 %) и полевых шпатов, из которых обычно преобладает калишпат, редко биотит и роговая обманка. Структура основной массы аплитовая, фельзитовая с элементами микропегматитовой. Акцессорные минералы представлены магнетитом, титанитом, цирконом, апатитом, очень редко алланитом.

Лампрофиры – макроскопически-чёрные с зеленоватым или буроватым оттенком массивные породы с порфиروбластиками водьяно-прозрачного кварца и калишпата размером до 1–5 мм. В порфиروбластиках калишпата часты включения зерен роговой обманки и биотита. Выделения кварца окружены каемкой амфибола, реже биотита (оцеллярная структура). Основная масса сложена плагиоклазом, роговой обманкой и биотитом, в интерстициях между ними встречаются скопления мелкозернистого кварца. Плагиоклаз замещен соссюритом, роговая обманка – актинолитом, хлоритом, порода карбонатизирована. Акцессорные минералы – апатит, магнетит, редко встречается турмалин.

Околорудные метасоматиты представлены турмалинизированными, березитизированными графитовыми гнейсами и сланцами, а также зонами сульфидизации, окварцевания и скарнирования. В зонах турмалинизации количество турмалина достигает 10 %. Часто он образует радиально-лучистые «турмалиновые солнца» размером до 0,8–1,0 мм. В тесном срастании с турмалином наблюдаются удлиненно-вытянутые листовидные обособления графита размером до 1,5–2,0 мм. Кварц-турмалиновые метасоматиты являются рудовмещающими для золото-турмалинового типа оруденения. Кварц-серицитовые метасоматиты и березиты сопровождают зоны дробления в гнейсах и тоже содержат графит, который наблюдается в виде неравномерной вкрапленности, пластинчатых агрегатов, ветвистых прожилков мощностью до 1 мм.

Рудные тела в пределах месторождения выявляются по данным опробования и представляют собой штокверковые зоны с кварц-сульфидной минерализацией в графитовых гнейсах. Среднее содержание золота в рудах составляет 2,6 г/т. В графитовых гнейсах с наложенной сульфидной минерализацией содержания золота варьируют от 0,1 до 11,0 г/т при среднем содержании (пробирный метод) 2,9 г/т (табл. 1). По подсчитанным запасам ис-

следуемый объект соответствует мелким месторождениям золота. Выделены Северная и Широтная рудные зоны, представленные участками распространения кварцево-жильной и прожилково-вкрапленной рудной минерализации штокверкового типа среди графитовых гнейсов. Широтная рудная зона образована штокверком прожилково-вкрапленного оруденения и локализована в узле сопряжения тектонических структур разной ориентации. Повышенные содержания золота отмечаются в зонах интенсивного развития прожилково-вкрапленной кварц-турмалин-сульфидной минерализации. Северная рудная зона сопряжена с мощной трещинной структурой субмеридиональной ориентировки, вмещающей измененные дайковые тела габбро-диоритового состава. В пределах Северной рудной зоны развиты золотоносные кварц-графитовые жилы мощностью до нескольких сантиметров. Главными рудными минералами являются магнетит, молибденит, пирит, арсенопирит, сфалерит, галенит. К второстепенным и редким минералам руд относятся халькопирит, марказит, мартит, мельниковит, шеелит, пентландит, кобальтин, Bi, Ag теллуриды, самородное Au, а также монацит, ксенотим и рабдофан.

На месторождении установлены минеральные ассоциации, соответствующие стадиям рудообразования: 1 – магнетитовая; 2 – молибденит-пирит-кварцевая; 3 – кварц-турмалиновая; 4 – кварц-пиритовая; 5 – пирит-арсенопирит-кварцевая; 6 – полиметаллическая; 7 – кварц-халцедон-

карбонатная [16]. Магнетитовая, молибденит-пирит-кварцевая, пирит-арсенопирит-кварцевая и полиметаллическая ассоциации имеют ограниченное распространение. Кварц-турмалиновая и кварц-пиритовая ассоциации широко представлены на площади всего месторождения. Продуктивными на Au оруденение являются кварц-пиритовая, пирит-арсенопирит-кварцевая и полиметаллическая ассоциации (табл. 2). Графит установлен в виде минеральных включений в кварце, пирите, халькопирите, марказите, арсенопирите. Агрегаты графита и его прожилки секутся более поздними прожилками сульфидно-карбонат-кварцевого состава. Руды месторождения отвечают малосульфидной золоторудной формации и относятся к арсенопирит-пирит-сфалерит-галенитовому минеральному типу. По содержанию сульфидов руды являются мало- и умеренно сульфидными.

Петрогеохимическая характеристика пород амуджиканского комплекса и руд

По соотношениям $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ мезозойские интрузивные образования основного и среднего составов соответствуют калиево-натриевой серии (табл. 3). В районе месторождения породы кислого состава представлены дайками кварцевых порфиров, соответствующих калиевой серии. По геохимическим особенностям состава интрузивные образования амуджиканского комплекса соответствуют интрузиям, сформированным в коллизионных и постколлизионных обстановках (рис. 2).

Таблица 2. Элементный состав (г/т) и индикаторные отношения элементов в сульфидно-кварцевых жилах рудных стадий Амазарканского месторождения

Table 2. Elemental composition (g/t) and indicator ratios of elements in sulfide-quartz veins of ore stages Amazarkan gold deposit

№ проб Sample no.	Au	As	Bi	Mo	Cu	Co	Ni	Pb	Sn	Sb	Nb	Rb	Sr	U	Th	La	Th/La	Nb/La	Co/Ni	Rb/Sr	U/Th
Кварц-турмалиновая стадия/Quartz-tourmaline stage																					
647-1	3,08	220	51,9	14,0	170	29,0	5,0	39,0	19,0	11,5	6,0	136	90	1,16	6,5	28,8	0,23	0,21	5,8	1,5	0,2
649	2,40	250	6,9	30,0	50,0	26,0	12,0	55,0	18,0	18,0	5,0	115	150	0,94	6,6	47,4	0,14	0,11	2,2	0,8	0,1
649-1	1,31	391	8,5	–	–	34,0	17,0	24,0	–	16,0	12,0	55	117	–	6,4	–	–	–	2,0	0,5	–
692	0,68	220	18,2	2,0	380	28,5	19,0	46,0	31,0	9,7	8,0	60,1	40	18,8	10	19,7	0,54	0,41	1,5	1,5	1,8
Кварц-пиритовая стадия/Quartz-pyrite stage																					
695	1,37	70	4,0	3,0	290	22,5	24,0	58,0	80,0	3,0	17,0	6,2	8,0	80,4	220	2,24	7,7	0,9	0,4	0,3	0,3
697	0,77	110	5,0	5,0	1630	18,5	10,0	47,0	90,0	5,0	29,0	8,5	14	158	180	3,12	5,7	1,8	0,9	0,5	0,5
655	10,8	270	148	132	60,0	13,8	17,0	98,0	64,0	139,0	18,0	40,4	8,0	17,4	90	2,50	12,5	0,8	0,2	0,2	0,2
655-1	0,11	40	4,4	60,0	40,0	13,3	5,0	26,0	28,0	60,0	19,0	4,3	10	74,2	180	1,30	3,6	2,7	0,4	0,4	0,4
656	–	140	71,3	16,0	20,0	15,6	5,0	108,0	22,0	16,0	15,0	14,5	5,0	119	150	1,36	14,9	3,1	0,8	0,1	0,1
698	1,38	30	32,3	61,0	30,0	8,7	6,0	29,0	12,0	61,0	21,0	25,4	17	79,0	620	5,02	25,1	1,5	0,1	0,2	0,2
Пирит-арсенопирит-кварцевая стадия/Pyrite-arsenopyrite-quartz stage																					
647	7,50	1819	59,0	–	–	84,0	2,0	89,0	–	54,0	–	37,0	48	–	4,2	–	–	–	42,0	0,8	–
654	0,35	1030	28,0	–	–	21,5	9,0	36,0	16,0	2,3	5,0	157	210	0,46	2,7	0,46	–	10,9	2,4	0,7	0,2
690	2,68	334022	128	–	450	138	17,0	120	18,0	19,0	2,0	11,1	10	8,6	4,7	8,6	5,87	0,2	8,1	1,1	1,8
693-1	0,47	70	18,6	51	30	97,0	46,0	56,0	16,0	18,5	15	46,6	110	2,98	6,0	3,0	0,55	5,0	2,1	0,4	0,5
Кварц-полиметаллическая стадия/Quartz-polymetallic stage																					
651-1	2,78	160	13,2	6,0	40	163	21,0	253	652	6,0	25	19,1	1,0	6,6	20	0,4	3,2	7,8	0,3	0,1	0,1

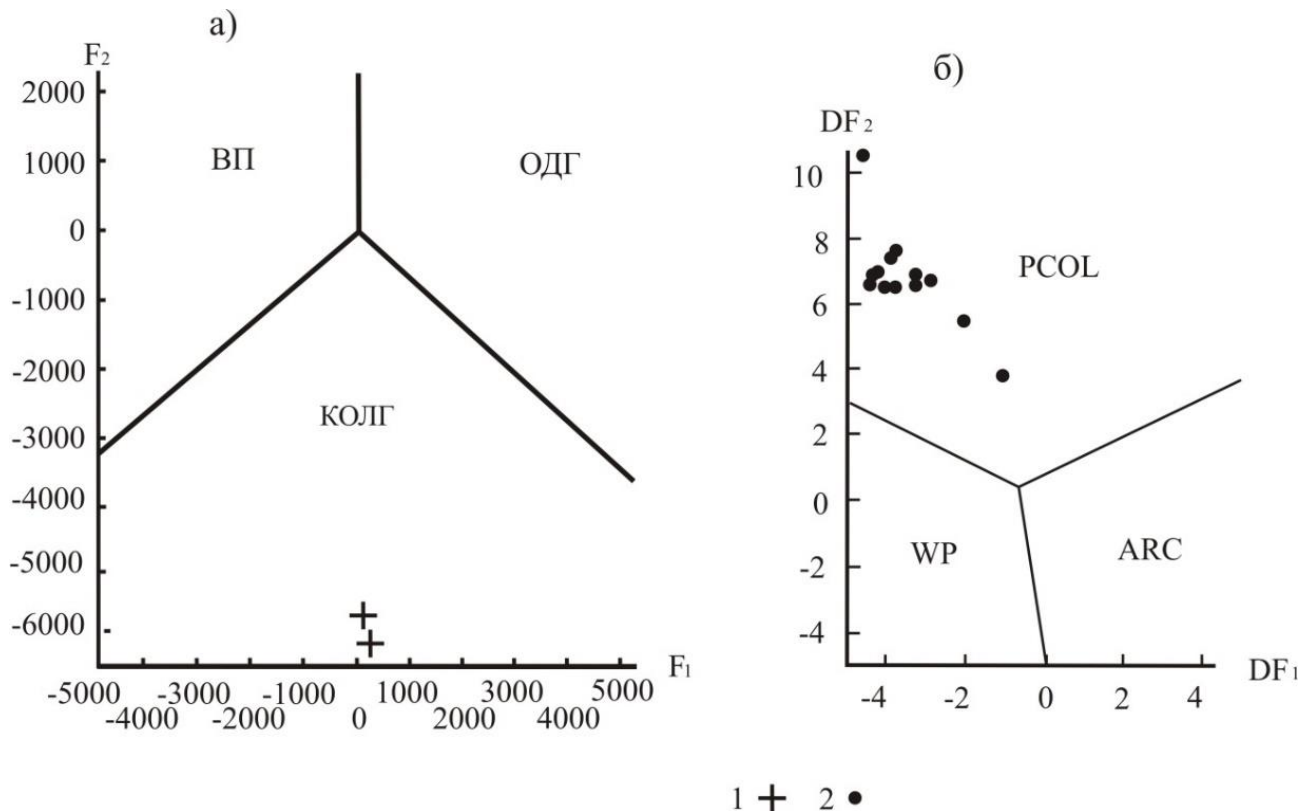


Рис. 2. Дискриминационные диаграммы интрузивных пород Амазарканского месторождения: а) диаграмма F_1 - F_2 [18] с фигуративными точками кислых по составу магматических пород амананского комплекса (J_1) – 1; $F_1=196,203\text{SiO}_2+753,953\text{TiO}_2+481,96\text{Al}_2\text{O}_3+92,664\text{FeO}^*+521,5\text{MgO}+374,766\text{CaO}+7,571\text{Na}_2\text{O}-584,778\text{K}_2\text{O}+0,379\text{Ba}-0,339\text{Sr}-0,733\text{Rb}-0,429\text{La}-3,33\text{Ce}-5,242\text{Nd}+10,565\text{Sm}-19823,8$; $F_2=1292,962\text{SiO}_2+4002,667\text{TiO}_2+1002,231\text{Al}_2\text{O}_3+1297,136\text{FeO}^*+262,067\text{MgO}+1250,48\text{CaO}+1923,417\text{Na}_2\text{O}+1009,287\text{K}_2\text{O}+0,3634\text{Ba}-0,325\text{Sr}-0,701\text{Rb}+0,8015\text{La}+3,347\text{Ce}+2,68\text{Nd}+10,11\text{Sm}-126860,0$; $\text{FeO}^*=0,9\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{FeO}$. Породы: ВПГ – внутриплитные, ОДГ – островодужные, КОЛГ – коллизионные; б) дискриминационная диаграмма DF_1 - DF_2 [19] с фигуративными точками магматических пород амуджиканского комплекса среднего состава (J_2 -3) – 2;

$$DF_1=-2,45605\ln(\text{TiO}_2/\text{SiO}_2)+1,11985\ln(\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2)-2,22475\ln(\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2)+2,48861\ln(\text{FeO}/\text{SiO}_2)-0,212024\ln(\text{MnO}/\text{SiO}_2)-0,06661\ln(\text{MgO}/\text{SiO}_2)+1,29066\ln(\text{CaO}/\text{SiO}_2)-0,28377\ln(\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2)-0,40211\ln(\text{K}_2\text{O}/\text{SiO}_2)+0,030635\ln(\text{P}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2)-11,43097347;$$

$$DF_2=-0,57759\ln(\text{TiO}_2/\text{SiO}_2)-0,01121\ln(\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2)+0,69125\ln(\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2)-1,99798\ln(\text{FeO}/\text{SiO}_2)-1,72014\ln(\text{MnO}/\text{SiO}_2)+0,305275\ln(\text{MgO}/\text{SiO}_2)+0,816018\ln(\text{CaO}/\text{SiO}_2)-1,791727\ln(\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2)+0,871298\ln(\text{K}_2\text{O}/\text{SiO}_2)+0,335479\ln(\text{P}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2)-12,20158596.$$

Породы: PCOL – постколлизионные, WP – внутриплитные, ARC – островодужные

Fig. 2. Discrimination diagrams of intrusive rocks of the Amazarkan deposit area: а) diagram F_1 - F_2 [18] with figurative points of acidic igneous rocks of the Amanan complex (J_1) – 1;

$$F_1=196.203\text{SiO}_2+753.953\text{TiO}_2+481.96\text{Al}_2\text{O}_3+92.664\text{FeO}^*+521.5\text{MgO}+374.766\text{CaO}+7.571\text{Na}_2\text{O}-584.778\text{K}_2\text{O}+0.379\text{Ba}-0.339\text{Sr}-0.733\text{Rb}-0.429\text{La}-3.33\text{Ce}-5.242\text{Nd}+10.565\text{Sm}-19823.8;$$

$$F_2=1292.962\text{SiO}_2+4002.667\text{TiO}_2+1002.231\text{Al}_2\text{O}_3+1297.136\text{FeO}^*+262.067\text{MgO}+1250.48\text{CaO}+1923.417\text{Na}_2\text{O}+1009.287\text{K}_2\text{O}+0.3634\text{Ba}-0.325\text{Sr}-0.701\text{Rb}+0.8015\text{La}+3.347\text{Ce}+2.68\text{Nd}+10.11\text{Sm}-126860.0;$$

$\text{FeO}^*=0.9\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{FeO}$.

Rocks: PCOL – post-collisional, WP – intraplate, ARC – island-arc; б) discrimination diagram DF_1 - DF_2 [19] with figurative points of igneous rocks of average composition of the Amudzhikan complex (J_2 -3) – 2;

$$DF_1=-2,45605\ln(\text{TiO}_2/\text{SiO}_2)+1,11985\ln(\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2)-2,22475\ln(\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2)+2,48861\ln(\text{FeO}/\text{SiO}_2)-0,212024\ln(\text{MnO}/\text{SiO}_2)-0,06661\ln(\text{MgO}/\text{SiO}_2)+1,29066\ln(\text{CaO}/\text{SiO}_2)-0,28377\ln(\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2)-0,40211\ln(\text{K}_2\text{O}/\text{SiO}_2)+0,030635\ln(\text{P}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2)-11,43097347;$$

$$DF_2=-0,57759\ln(\text{TiO}_2/\text{SiO}_2)-0,01121\ln(\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2)+0,69125\ln(\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2)-1,99798\ln(\text{FeO}/\text{SiO}_2)-1,72014\ln(\text{MnO}/\text{SiO}_2)+0,305275\ln(\text{MgO}/\text{SiO}_2)+0,816018\ln(\text{CaO}/\text{SiO}_2)-1,791727\ln(\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2)+0,871298\ln(\text{K}_2\text{O}/\text{SiO}_2)+0,335479\ln(\text{P}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2)-12,20158596;$$

Rocks: PCOL – post-collisional, WP – intraplate, ARC – island-arc

Таблица 3. Содержания и соотношения химических элементов в интрузивных образованиях амуджиканского комплекса района Амазарканского месторождения (от–до)

Table 3. Contents and ratios of chemical elements in intrusive formations of the amudzhikan complex of the Amazarkan deposit field area (from–to)

Соотношения элементов Ratios of elements	Диориты Diorites (n=14)	Гранодиориты Granodiorites (n=5)	Кварцевые порфиры Quartz porphyry (n=2)	Габброиды Gabbroids (n=3)
Na ₂ O/K ₂ O	0,18–0,31	0,28–2,10	0,06–0,12	1,72–2,79
Mg#	–	1,05–2,10	–	1,72–2,79
Eu/Sm	0,18–0,33	0,18–0,24	–	0,31–0,35
Au	0,026–1,171	0,087	–	–

Примечание. «–» – нет данных/Note. "–" – no data available.

Классификационная диаграмма [17] в координатах Ас и (Na+K)/Ca, где Ас – универсальный параметр кислотности-основности, учитывающий не только содержание, но и химическую активность порообразующих элементов, а (Na+K)/Ca – параметр, характеризующий степень щелочности-известковистости, позволяет показать металлогеническую специализацию магматических пород. На этой диаграмме составы габброидов, диоритов и гранодиоритов амуджиканского комплекса Амазарканского месторождения попадают в эталонное известково-щелочное поле, за исключением некоторых образцов гранодиоритов, которые попадают в поля субщелочных и щелочных гранитов (рис. 3).

Диаграмма также демонстрирует редкометалльную Мо металлогеническую специализацию этих пород. Фигуративные точки состава пород амуджиканского комплекса образуют тренд, близкий к Мо металлогеническому тренду. Значения коэффициента Mg# варьируют в гранодиоритах от 1,05 до 2,10, в диоритах – от 1,40 до 1,56, в габброидах от – 1,72 до 2,79 (табл. 3). Соотношения Eu/Sm > 0,2 и Eu/Eu* от 0,93 до 1,05 в породах основного и среднего составов (табл. 3) указывают, соответственно, на формирование магматических расплавов в магматических очагах на уровне нижней континентальной коры [20]. Гранодиориты и диориты амуджиканского комплекса в районе месторождения характеризуются повышенным содержанием Au от 0,026 до 1,71 г/т (табл. 3).

Породы амуджиканского комплекса рассматриваются как первичные выплавки глубинного мантийного вещества [21]. Преобладание производных высококальциевой известково-щелочной магмы и наличие пород нормальной известково-щелочной серии объясняется плавлением корового материала под воздействием латитовой магмы, происходит смешение коровых и мантийных расплавов и ассимиляция корового материала мантийными магмами [2, 22].

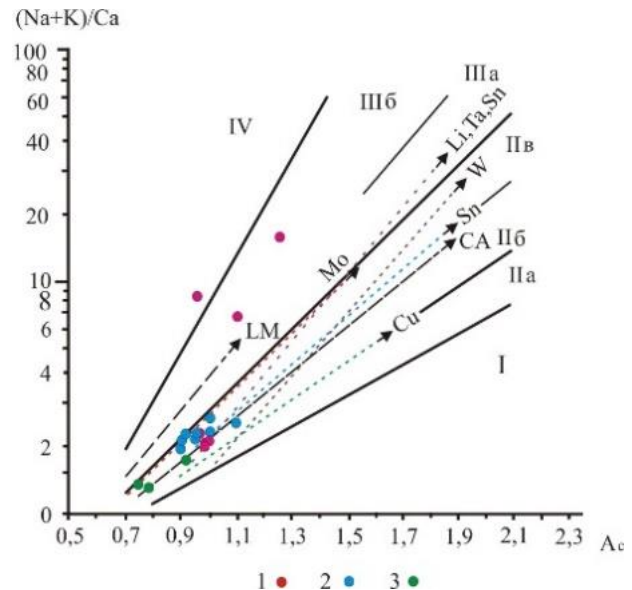


Рис. 3. Диаграмма (Na+K)/Ca–Ac для магматических пород Амазарканского месторождения по [17]. Породы амуджиканского комплекса: 1 – гранодиориты, 2 – диориты, 3 – габброиды. Классификационные поля пород: I – известковое, II – известково-щелочное (IIa – субизвестковистые, IIb – известково-щелочные, IIв – субизвестково-щелочные граниты); III – субщелочное (IIIa – субщелочные и щелочные граниты и лейкограниты, IIIб – щелочные агпаитовые граниты); IV – щелочные. Эталонные тренды (штрих-пунктирные линии): Ca – главный известково-щелочной, LM – латитовый (монзонитовый), Sn – оловянный, Cu – медно-порфировый, Mo–(Cu) – молибденовый, W–(Mo) – вольфрам-молибденовый; Li, Ta, Nb, Sn – литий-тантал-ниобий

Fig. 3. Diagram (Na+K)/Ca–Ac for igneous rocks of the Amazarkan deposit according to [17]. Amudzhikan complex: 1 – granodiorites, 2 – diorites, 3 – gabbroids. Classification fields of rocks: I – calcareous, II – calc-alkaline (IIa – subcalcareous, IIb – calc-alkaline, IIb – subcalc-alkaline granites); III – subalkaline (IIIa – subalkaline and alkaline granites and leucogranites, IIIb – alkaline agpaite granites); IV – alkaline. Reference trends (dash-dotted lines): Ca – main calc-alkaline, LM – latite (monzonite), Sn – tin, Cu – porphyry copper, Mo–(Cu) – molybdenum, W–(Mo) – tungsten-molybdenum; Li, Ta, Nb, Sn – lithium-tantalum-niobium-tin

Таблица 3. Отношения Na₂O/K₂O и Eu/Sm, Mg# индекс и содержание Au в интрузивных породах амуджиканского комплекса в районе Амазарканского месторождения

Table 3. Na₂O/K₂O and Eu/Sm ratios, Mg# index and Au content in intrusive rocks of the Amudzhikan complex in the Amazarkan deposit area

Соотношения элементов Ratios of elements	Диориты Diorites (n=14)	Гранодиориты Granodiorites (n=5)	Кварцевые порфиры Quartz porphyry (n=2)	Габброиды Gabbroids (n=3)
Na ₂ O/K ₂ O	0,18–0,31	0,28–2,10	0,06–0,12	1,72–2,79
Mg#	–	1,05–2,10	–	1,72–2,79
Eu/Sm	0,18–0,33	0,18–0,24	–	0,31–0,35
Au	0,026–1,171	0,087	–	–

Примечание. «–» – нет данных/Note. "–" – no data available.

Спектры распределения редкоземельных элементов (РЗЭ) в сульфидно-кварцевых рудах, кварцево-углеродистых жилах месторождения, а также в гранодиоритах и диоритах достаточно близки (рис. 4). Кроме того, на диаграмме в координатах $Eu/Sm-Eu/Eu^*$ фигуративные точки составов рудных жил и гранодиоритов амуджиканского комплекса образуют единый тренд (рис. 5).

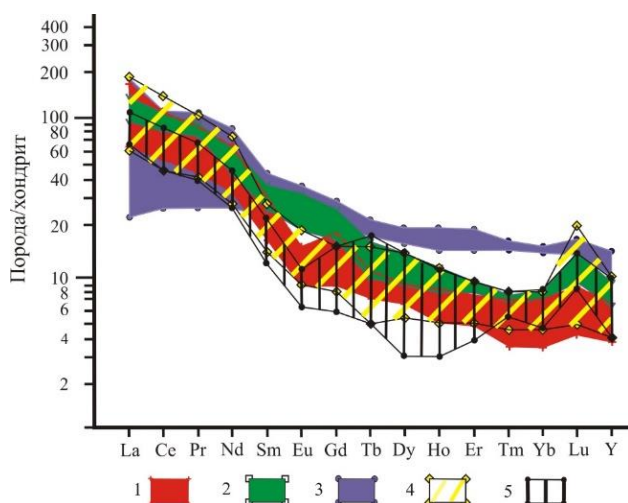


Рис. 4. Спайдер-диаграмма распределения редкоземельных элементов в породах и рудах Амазарканского месторождения. Поля на диаграмме: амуджиканский интрузивный комплекс (J2-3): 1 – гранодиориты, 2 – диориты; 3 – базальты нюкжинской серии (J3); рудоносные жилы: 4 – сульфидно-кварцевые, 5 – сульфидно-кварцевые с включениями графита

Fig. 4. Spider diagram of the distribution of rare earth elements in rocks and ores of the Amazarkan deposit. Fields in the diagram: Amudzhikan intrusive complex (J2-3): 1 – granodiorites, 2 – diorites; 3 – Nyukzha series basalts (J3); ore-bearing veins: 4 – sulfide-quartz, 5 – sulfide-quartz with graphite inclusions

На связь Au-оруденения с процессами магматизма также указывает отношения Co/Ni в рудах, которое составляет величину более 1,5, что может косвенно свидетельствовать об участии магматического флюида в рудообразовании [23]. Значения отношения Nb/La , превышающие 1, свидетельствуют о наличии в рудах тяжелых лантаноидов, что косвенно указывают на глубинный источник оруденения (табл. 2) [24]. Соотношения Nb/La и Th/La в рудах меньше 1 указывают на наличие в рудоносных флюидах хлора, что подтверждается результатами исследования флюидных включений (ФВ). Присутствие хлоридов характерно для состава рудообразующих магматических флюидов Мо и Си-Мо порфировых месторождений Восточного Забайкалья, связанных с интрузиями амуджиканского комплекса.

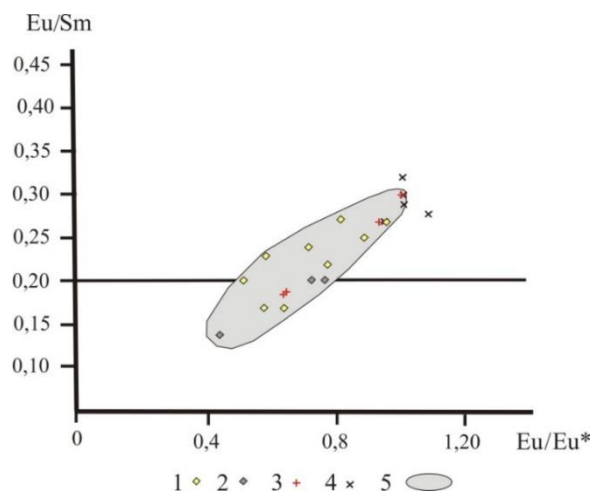


Рис. 5. Диаграмма $Eu/Sm-Eu/Eu^*$ интрузивных и рудных образований Амазарканского месторождения. Значения: 1 – сульфидно-кварцевые руды, 2 – кварцево-графитовые жилы; амуджиканский комплекс: 3 – гранодиориты, 4 – диориты; 5 – область значений распределения рудных жил и гранодиоритов амуджиканского комплекса

Fig. 5. $Eu/Sm-Eu/Eu^*$ diagram of intrusive and ore formations of the Amazarkan deposit. Values: 1 – sulphide-quartz ores, 2 – quartz-graphite veins; the Amudzhikan complex: 3 – granodiorites, 4 – diorites; 5 – area of distribution values of ore veins and granodiorites of the Amudzhikan complex

Величины соотношения U/Th (табл. 2) в рудных минеральных ассоциациях кварц-турмалиновой (0,1–1,8), кварц-пиритовой (0,1–0,5), пирит-арсенопирит-кварцевой (1819–2270) и кварц-полиметаллической (0,1) стадий может свидетельствовать об изменении редокс-потенциала в процессе рудообразования от окислительных ($U/Th < 0,75$) к восстановительным ($U/Th > 0,75$) условиям [24].

Термобарогеохимия и изотопный состав флюида кварцево-сульфидных руд

Флюидные включения. В кварце минеральных ассоциаций кварц-турмалиновой, кварц-пиритовой, пирит-арсенопирит-кварцевой стадий Амазарканского месторождения присутствуют флюидные включения (ФВ) газовые (тип I), двухфазные (тип II) и трёхфазные с галитом (тип III), а также ФВ, содержащие жидкую фазу CO_2 (тип IV) (рис. 6). При нагревании двухфазные и трёхфазные с галитом ФВ (типы II и III) гомогенизируются в жидкую фазу, газовые ФВ (типы I и IV), содержащие тонкую каёмку раствора, гомогенизируются в газовую фазу. Общий интервал температуры гомогенизации ФВ охватывает диапазон от 125 до 410 °С. Растворы включений, судя по температуре их эвтектики (–55, –52 и –23 °С), относятся к водно-солевым системам $NaCl+KCl+H_2O$ и $CaCl_2+NaCl+H_2O$ [9]. Соленость включений варьирует от 0,4 до 38,5 мас. % экв. $NaCl$ (табл. 4, рис. 7).

Таблица 4. Результаты исследования флюидных включений

Table 4. Results of the study of fluid inclusions

Образец Sample	Тип* Type*	Кол-во Quantity	Т гомогениза- ции газа T of vapor ho- mogenization	Т эвтектики T of eutectic	Т плавления T miting			Соленость в мас. % экв, NaCl Salinity in wt % eq, NaCl
					льда ice	гидрата CO2 CO2 hydrate	галита halite	
Кварц-турмалиновая рудная стадия / Quartz-tourmaline ore stage								
722-1	II	6	154...150	-23	4,2...3,8	-	-	6,7-6,2
722-1	IV	10	306...230	-24,5...-23	-	8,9...8,7	-	2,6-2,2
Кварц-пиритовая рудная стадия / Quartz-pyrite ore stage								
645	III	4	360...345	-23	-	-	130	29
645	II	5	230...170	-23	-22...-5,8	-	-	22-7,2
719	I	10	254...150	-23,6...-23	-3,8...-1,5	-	-	6,2-2,3
Кварц-пирит-арсенопиритовая стадия / Quartz-pyrite-arsenopyrite stage								
655	III	8	316...230	-52	-	-	310-230	38,5-33,3
655	II	8	332...125	-55...-23	-6,4...-1,5	-	-	9,7-2,3
655	I	3	410...382	-23	-2...-0,2	-	-	3,4-0,4

Примечание: *типы включений – газовые (I), двухфазные (II), трёхфазные с галитом (III), двухфазные с жидкой CO₂ (IV).

Note: *types of inclusions – gas (I), two-phase (II), three-phase with halite (III), two-phase with liquid CO₂ (IV).

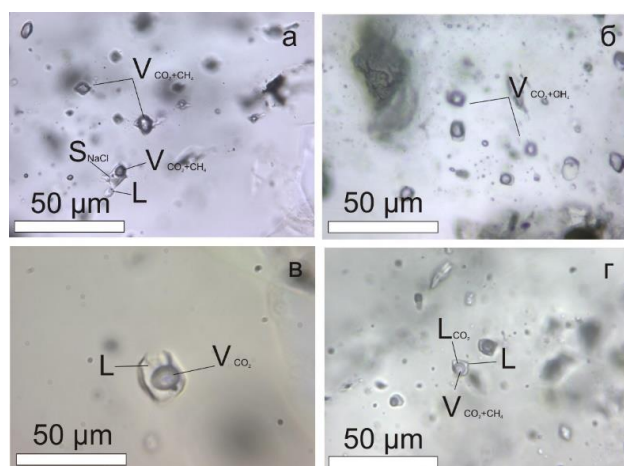


Рис. 6. Типы ФВ в кварце рудных жил Амазарканского месторождения. Газовое (тип I) и трехфазное с галитом (тип III) ФВ – (а); газовые ФВ (тип I) – (б); двухфазное ФВ (тип II) – (в); ФВ с жидкой CO₂ (тип IV). Фазы ФВ V – газ, L – жидкость, S – твердая фаза.

Fig. 6. Types of PV in quartz of ore veins of the Amazarkan deposit. Gas (type I) and three-phase with halite (type III) PV – (a); gas PV (type I) – (b); biphasic EF (type II) – (v); PV with liquid CO₂ (type IV). PV phases V – gas, L – liquid, S – solid phase

В замороженных включениях (тип IV) плавление CO₂ происходит при температуре от –57 до –56,8 °С, гомогенизация CO₂ в газовую фазу происходит при температуре от 27 до 29 °С. В глубоко охлажденных газовых включениях (тип I) наблюдалось выпадение CO₂ в виде небольшой твердой фазы, которая превращалась в газ при температуре от –88 до –56,7 °С, что указывает на низкую плотность газовой фазы. По данным КР-спектроскопии газовая фаза флюидных включений содержит CO₂ от 0 до 100, N₂ от 0 до 59,7 и CH₄ от 0,1 до 40,3 мольных %.

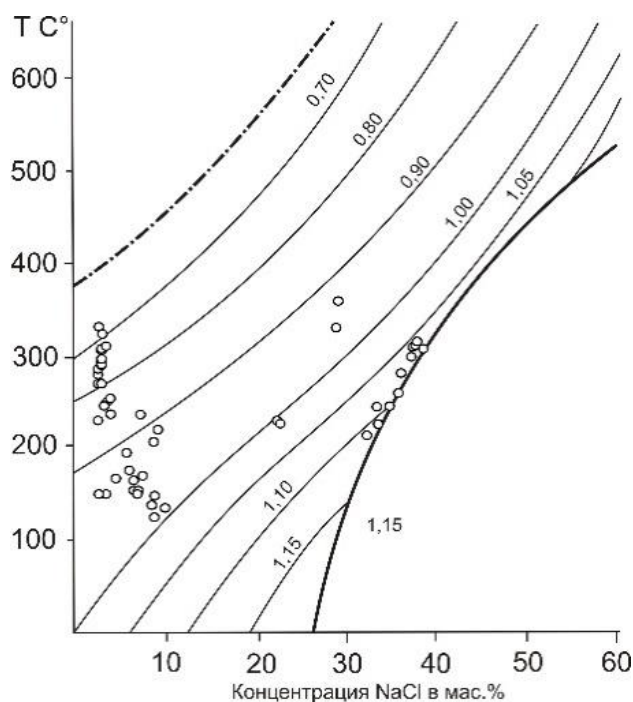


Рис. 7. Диаграмма состояния водно-солевой системы NaCl-H₂O насыщенных паром растворов H₂O-NaCl по [10, 11]. Штрих-пунктирная линия – кривая равновесия «пар-жидкость»; жирная сплошная линия – кривая равновесия «жидкость-галит»; тонкие сплошные линии – изохоры, указана плотность (г/см³). Показаны температура гомогенизации и соленость ФВ в кварце рудных жил Амазарканского месторождения

Fig. 7. Diagram of the state of the NaCl-H₂O water-salt system of steam-saturated H₂O-NaCl solutions according to [10, 11]. The dash-dotted line is the vapor-liquid equilibrium curve; thick solid line – liquid-halite equilibrium curve; thin solid lines are isochors; density is indicated (g/cm³). The homogenization temperature and salinity of PV in quartz of ore veins of the Amazarkan deposit are shown

По данным исследования ФВ в кварце руд Амазарканского месторождения минералообразование в ходе *кварц-турмалиновой стадии* происходило в интервале температуры от 306 до 150 °С при участии гомогенных флюидов средней до низкой солености (6,7–2,2 мас. % экв. NaCl). Минеральные ассоциации *кварц-пиритовой стадии* могли кристаллизоваться в интервале температуры от 360 до 150 °С в среде гетерофазного флюида, представленного водно-солевой фракцией высокой до средней солености (29–7,2 мас. % экв. NaCl) и парообразной с низким содержанием хлоридов (6,7–2,3 мас. % экв. NaCl). Образование минералов *пирит-арсенопирит-кварцевой стадии* также происходило при участии гетерофазного флюида при температуре от 410 до 230 °С. Водно-солевая флюидная фракция характеризовалась высокой соленостью (38,5–33,3 мас. % экв. NaCl), парообразная содержала меньше хлоридов (3,4–0,4 мас. % экв. NaCl). Присутствие газовых и водно-солевых ФВ в кварце рудных жил месторождения Амазаркан может указывать на гетерофазное состояние рудообразующего флюида в результате разделения гомогенного флюида на парообразную и водно-солевую фракции при понижении давления и температуры.

Изотопный состав O, S и C в минералах рудных жил. Кварц различных рудных стадий весьма однороден по изотопному составу кислорода ($\delta^{18}\text{O}=+10,7\pm 0,2$). Таким образом, с большой вероятностью кварц кристаллизовался из флюидов близкого состава при схожих условиях. Применяя уравнение [25] $\delta^{18}\text{O}_{\text{кварц}}-\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}=3,34(10^6/T^2)-3,31$, где T – температура по Кельвину, получаем $\delta^{18}\text{O}$ минералообразующего гидротермального флюида для температур 350...400 °С (по гомогенизации включений) в диапазоне от +5,5 до +6,7 ‰. Полученные значения $\delta^{18}\text{O}$ соответствуют флюиду магматической природы: +5,5 – +9,0 ‰, [26] (табл. 5).

Сера пиритов Амазарканского месторождения в среднем имеет $\delta^{34}\text{S}=+2,5$ ‰ и колеблется в очень узком диапазоне (табл. 6), что так же, как и в случае с кварцем, указывает на единство источников и стабильность условий минералообразования. Исходя из предположения, что во флюиде преобладал H_2S , для расчёта $\delta^{34}\text{S}$ флюида используем уравнения фракционирования [27]:

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

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

Рассчитанный изотопный состав серы во флюиде Амазарканского месторождения составляет +3,5 ‰ в равновесии с пиритом и +3,1 ‰ в равновесии с халькопиритом (для 350 °С). Полученные значения, с учётом имеющейся ограниченной статистики, близки к интервалу, характерному для магматического источника – 3– +3 ‰ [26]. Небольшое обога-

щение пирита тяжёлым изотопом серы относительно мантийного диапазона может быть связано как с физико-химическими условиями кристаллизации, включая кристаллизацию полисульфидных парагенезисов, так и с незначительной контаминацией флюида.

Таблица 5. Изотопный состав кислорода и сосуществующего с ним флюида Амазарканского месторождения

Table 5. Isotopic composition of oxygen and the fluid co-existing with it Amazarcan gold deposit

№ проб Sample no.	Состав руд Ore composition	$\delta^{18}\text{O}$, ‰ (SMOW)	Изотопный состав флюида при различных температурах, $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ Isotopic composition of the fluid at different temperatures, $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$	
Кварц-турмалиновая рудная стадия Quartz-tourmaline ore stage			170 °C	360 °C
646	Pr (до (to) 1 %)	10,78	-2,92	+5,71
Кварц-пиритовая рудная стадия Quartz-pyrite ore stage			125 °C	410 °C
696	Pr (до (to) 3 %)	10,88	-7,19	+5,86
Пирит-арсенопирит-кварцевая рудная стадия Pyrite-arsenopyrite-quartz ore stage			280 °C	320 °C
693-1	Pr, as, sf (до (to) 3 %)	10,58	+5,01	+5,55

Примечание: минералы: Pr – пирит, as – арсенопирит, sf – сфалерит.

Note: Minerals: Pr – pyrite, as – arsenopyrite, sf – sphalerite.

Таблица 6. Изотопный состав серы сульфидных минералов и расчетный состав серы во флюиде Амазарканского месторождения

Table 6. Sulfur isotope composition of sulfide minerals and calculated sulfur composition in the fluid of the Amazarcan gold deposit

Образец Sample	Минерал Mineral	$\delta^{34}\text{S}$, ‰ CDT	Изотопный состав серы во флюиде $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$ ‰ CDT при различных температурах Isotopic composition of sulfur in fluid $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$ ‰ CDT at various temperatures	
Кварц-турмалиновая рудная стадия Quartz-tourmaline ore stage			170 °C	360 °C
646	Пирит/Pyrite	+1,9	-0,13	+0,83
647-1		+2,6	+0,57	+1,55
652		+2,3	+0,27	+1,25
693		+2,7	+0,67	+1,63
694		+2,5	+0,47	+1,45
Кварц-пиритовая рудная стадия Quartz-pyrite ore stage			125 °C	410 °C
645	Пирит/ Pyrite	+2,3	-0,22	+1,44
689		+3,1	+0,58	+1,24
696		+2,6	+0,08	+1,74
Кварц-пирит-арсенопиритовая стадия Quartz-pyrite-arsenopyrite stage			280 °C	320 °C
690	Пирит/Pyrite	+2,8	+1,49	+1,69
693-1	Халькопирит Chalcopyrite	+3,0	+1,69	+1,89

Графит кварцево-графитовых жил Северной рудной зоны месторождения имеет изотопный состав углерода в узком диапазоне от $-27,2$ до $-28,9$ ‰ (табл. 1). Такой изотопно-лёгкий углерод характерен для биогенного вещества, что в данном случае указывает на заимствование углерода из осадочных толщ. Источником углерода во флюиде могут являться графитовые гнейсы амазарканской свиты, породы которой содержат повышенные содержания Au. Графит амазарской свиты имеет несколько утяжеленный изотопный состав углерода от $-21,96$ до $-24,93$ ‰ $\delta^{13}\text{C}$ (‰) по сравнению с графитом золотоносных кварцево-графитовых жил (табл. 1). Незначительное обогащение флюида тяжёлым изотопом серы можно объяснить избирательным извлечением рудообразующим флюидом компонентов вмещающих толщ.

Заключение

Образование многочисленных, близких по возрасту, разноглубинных рудоносных магматических очагов характерно для развития рудно-магматических систем, возникающих при мантийно-коровом взаимодействии [27]. В Восточном Забайкалье эти процессы выразились в пространственной и временной совмещенности золотого оруденения и малых интрузий кислого, среднего и

основного состава амуджиканского комплекса [1, 28–35]. При этом магматические очаги пород основного состава и преобладающей части пород среднего составов локализовались в нижней континентальной коре. Мезозойские магматические образования амуджиканского комплекса (J_{2-3}), развитые в районе Амазарканского месторождения, являются вероятными источниками вещества для золотого оруденения. Полученные данные по изотопному составу кислорода и серы позволяют сделать вывод о том, что рудоносный флюид Амазарканского месторождения имел преимущественно магматический источник. Изотопные характеристики углерода свидетельствуют о ремобилизации его из вмещающих толщ, вероятно, сопровождавшейся переотложением золота.

Рудные жилы месторождения Амазаркан образовались в интервале температуры от 120 до 410 °C при участии флюидов, солёность которых варьировала от $0,4$ до $38,5$ мас. % экв. NaCl (рис. 7, табл. 4). В качестве основных солевых компонентов рудообразующие флюиды содержали NaCl, KCl, и CaCl_2 . Газовая фаза флюидов была представлена CO_2 , N_2 и CH_4 . Подобные физико-химические условия рудообразования типичны для золоторудных месторождений Восточного Забайкалья [1, 31–35].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Проблемы развития минерально-сырьевой базы высокотехнологичной промышленности России / Н.С. Бортников, А.В. Волков, А.Л. Галямов, И.В. Викентьев, А.В. Лаломов, К.Ю. Мурашов // Геология рудных месторождений. – 2023. – Т. 65. – № 5. – С. 371–380.
2. Спиридонов А.М., Зорина Л.Д., Китаев Н.А. Золотоносные рудно-магматические системы Забайкалья. – Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2006. – 291 с.
3. Берзина А.Н., Берзина А.П., Гимон В.О. Cu-Mo-порфировая рудно-магматическая система Аксут (Северо-Восточная Тува): источники и процессы формирования рудоносной магмы // Геология и геофизика. – 2021. – Т. 62. – № 4. – С. 549–566.
4. Sharp Z.D. A laser-based microanalytical method for the in-situ determination of oxygen isotope ratios of silicates and oxides // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1990. – № 54. – P. 1353–1357.
5. Geology, mineralization, igneous geochemistry, and zircon U-Pb geochronology of the early Paleozoic shoshonite-related Julia skarn deposit, SW Siberia, Russia: toward a diversity of Cu-Au-Mo skarn to porphyry mineralization in the Altai-Sayan orogenic system / S.G. Soloviev, S.G. Kryazhev, D.V. Semenova, Yu.A. Kalinin, S.S. Dvurechenskaya, N.V. Sidorova // *Ore Geology Reviews*. – 2022. – Vol. 142. – 104706. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.104706>
6. Пиритизированные двусторчатые моллюски из верхнего триаса орогенного золото-сурьмяного месторождения Сентачан (Восточная Якутия): минеральный состав и изотопный состав серы / Г.А. Пальянова, Е.С. Соболев, В.Н. Реутский, Н.С. Бортников // Геология рудных месторождений. – 2016. – Т. 58. – № 6. – С. 513–521.
7. Reutsky V.N., Borzdov Yu.M., Palyanov Yu.N. Carbon isotope fractionation associated with HPHT crystallization of diamond // *Diamond and Related Materials*. – 2008. – Vol. 17 (11). – P. 1986–1989.
8. Bakke R.J. AqSo–NaCl: computer program to calculate p-T-V-x properties in the H_2O -NaCl fluid system applied to fluid inclusion research and pore fluid calculation // *Computers and Geosciences*. – 2018. – № 115. – P. 122–133.
9. Борисенко А.С. Анализ солевого состава растворов газово-жидких включений в минералах методом криометрии // Использование методов термобарогеохимии при поисках и изучении рудных месторождений. – М.: Недра, 1982. – С. 37–47.
10. Bodnar R.J. A method of calculating fluid inclusion volumes based on vapor bubble diameters and P-V-T-X properties of inclusion fluids // *Economic Geology*. – 1988. – № 78. – P. 535–542.
11. Bodnar R.J., Vityk M.O. Interpretation of microthermometric data for NaCl– H_2O fluid inclusions // *Fluid inclusions in minerals: methods and applications* / Eds. B. de Vivo, M.L. Frezzotti. – Blacksburg, VA: Virginia Polytechnic Inst State Univ, 1994. – P. 117–131.
12. Гаврикова С.Н., Николаева Л.Л., Галанин А.В. Ранний докембрий южной части Становой складчатой области. – М.: Недра, 1991. – 170 с.
13. Краткий справочник по геохимии / Г.В. Войткевич, А.Е. Мирошников, А.С. Поваренных, В.Г. Прохоров. – М.: Недра, 1977. – 183 с.

14. Возраст и границы Олекминского магматического пояса Селенгино-Станового супертеррейна центрально-азиатского подвижного пояса / В.П. Ковач, А.Б. Котов, А.М. Ларин, Е.Б. Сальникова, С.Д. Великославинский, С.З. Яковлева, Ю.В. Плуткина // Доклады Академии Наук. – 2018. – Т. 483. – № 1. – С. 62–67.
15. Александров Г.В., Рублев А.Г. Новые данные о возрасте и металлоносности амананского, амуджиканского, нерчуганского комплексов Северо-Восточного Забайкалья // Эндогенные процессы и металлогения в зоне БАМ / под ред. В.С. Соболева. – Новосибирск: Наука, 1983. – С. 141–147.
16. Лукин В.А. и др. Отчет о поисково-разведочных работах и детальной разведке верхних горизонтов Амазарканского золоторудного месторождения за 1993–1998 гг. – Чита: ФГУП «Читагеологразведка» 2002. – 263 с.
17. Бородин Л.С. Модельная система петрохимических и металлогенических трендов гранитоидов как система прогноза месторождений Sn, Li, Ta, W, Mo, Cu // Геология рудных месторождений. – 2004. – Т. 46. – № 1. – С. 1–26.
18. Великославинский С.Д. Геохимическая типизация кислых магматических пород ведущих геодинамических обстановок // Петрология. – 2003. – Т. 11. – № 4. – С. 363–380.
19. Великославинский С.Д., Крылов Д.П. Геодинамическая позиция магматических пород среднего состава по геохимическим данным // Петрология. – 2015. – Т. 23. – № 5. – С. 451–458.
20. Винокуров С.Ф. Европиевые аномалии в рудных месторождениях и их геохимическое значение // Доклады Академии Наук. – 1996. – Т. 346. – № 6. – С. 792–795.
21. Зорина Л.Д., Куликова З.И. Рудогенерирующий магматизм и золотое оруденение Дарасунского рудного узла в Восточном Забайкалье // Проблемы петрогенезиса и рудообразования: Тез. докл. чтений им. А.Н. Заварицкого. – Екатеринбург, 1998. – С. 68–70.
22. Jones B., Manning D.A.C. Composition of geochemical indices used for the interpretation of paleoredox conditions in ancient mudstones // Chemical Geology. – 1994. – Vol. 111. – P. 111–129.
23. Trace element and REE geochemistry of the Zhewang gold deposit, Southeastern Guizhou Province, China / L. Kun, Y. Ruidong, C. Wenying, L. Rui, T. Ping // Chinese Journal of Geochemistry. – 2014. – № 33. – P. 109–118.
24. Геохимические особенности палеозойских Au-Ag эпипермальных месторождений (Северо-Восток России) / А.В. Волков, А.А. Сидоров, Н.Е. Савва, Е.Е. Колова, К.Ю. Мурашов // Доклады Академии Наук. – 2017. – Т. 472. – № 4. – С. 443–448.
25. Matsuhisa Y., Goldsmith J.R., Clouton R.N. Oxygen isotopic fractionation in the system quartz-albite-anorthite-water // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 1979. – Vol. 43. – P. 1131–1140.
26. Ohmoto H., Rye R.O. Isotope of sulfur and carbon // Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits. – N.Y.: J. Wiley and Sons, 1979. – P. 509–567.
27. Mineralogical and geochemical peculiarities and PT conditions of ores from the Kyzyl-Tashtyg VMS polymetallic deposit, Eastern Tuva: fluid inclusion and S, O, C isotopic data / R.V. Kuzhuget, N. Ankusheva, Yu.A. Kalinin, F. Pirajno, V.N. Reutsky // Ore Geology Reviews. – 2022. – Vol. 142. – 104717. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.104717>
28. Distinctive features of the major and trace element composition of biotite from igneous rocks associated with various types of mineralization on the example of the Shakhtama Intrusive Complex (Eastern Transbaikalia) / Yu. Redin, A. Redina, A. Malyutina, V. Dultsev, Yu. Kalinin, B. Abramov, A. Borisenko // Minerals. – 2023. – Vol. 13. – 1334. DOI: <https://doi.org/10.3390/min13101334>
29. Состояние и перспективы развития учения о структурах рудных полей и месторождений / Ю.Г. Сафонов, Г.И. Горбунов, А.А. Пэк, А.В. Волков, Т.М. Злобина, Г.Г. Кравченко, Е.П. Малиновский // Геология рудных месторождений. – 2007. – Т. 49. – № 5. – С. 386–420.
30. Абрамов Б.Н. Карийский золоторудный узел (Восточное Забайкалье): геохимические особенности руд, связь магматизма с оруденением // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2023. – № 1 (53). – С. 61–67.
31. Абрамов Б.Н., Калинин Ю.А., Боровиков А.А. Итакинское золоторудное месторождение: изотопный состав, вероятные источники рудного вещества (Восточное Забайкалье) // Геосферные исследования. – 2022. – № 2. – С. 6–22.
32. Прокофьев В.Ю., Зорина Л.Д. Флюидный режим Дарасунской рудно-магматической системы (Восточное Забайкалье) по данным исследования флюидных включений // Геология и геофизика. – 1996. – Т. 37. – № 5. – С. 50–61.
33. Минералогия и условия формирования Новоширокинского золото-полиметаллического месторождения (Восточное Забайкалье, Россия) / В.Ю. Прокофьев, Г.Д. Киселева, А.А. Долманова-Тополь и др. // Геология рудных месторождений. – 2017. – Т. 59. – № 6. – С. 542–575. DOI: [10.7868/S0016777017060041](https://doi.org/10.7868/S0016777017060041)
34. Прокофьев В.Ю. Геохимические особенности рудообразующих флюидов гидротермальных месторождений золота различных генетических типов (по данным исследования флюидных включений) / под ред. Л.Д. Зорина. – Новосибирск: Изд-во «Наука», 2000. – 186 с.
35. Прокофьев В.Ю., Наумов В.Б., Миронова О.Ф. Физико-химические параметры и геохимические особенности флюидов мезозойских золоторудных месторождений // Геохимия. – 2020. – Т. 65. – № 2. – С. 123–144. DOI: [10.31857/S0016752520020107](https://doi.org/10.31857/S0016752520020107)

Информация об авторах

Баир Намжилович Абрамов, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории геохимии и рудогенеза Института природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, Россия, 672007, г. Чита, ул. Недорезова, 16А; b_abramov@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8905-1677>

Юрий Александрович Калинин, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник лаборатории прогнозно-металлогенических исследований, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3; kalinin@igm.nsc.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5877-666x>

Андрей Александрович Боровиков, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории прогнозно-металлогенических исследований, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3; borovik@igm.nsc.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1665-176X>

Виктор Федорович Посохов, старший научный сотрудник лаборатории инструментальных методов анализа Геологического института им. Н.Л. Добрецова СО РАН, Россия, 670047 г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6А; vitaf1@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6346-3182>

Вадим Николаевич Реутский, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории изотопно-аналитической геохимии, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3; reutsky@igm.nsc.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5083-6629>

Поступила в редакцию: 28.11.2023

Поступила после рецензирования: 20.12.2023

Принята к публикации: 09.09.2024

REFERENCES

1. Bortnikov N.S., Volkov A.V., Galyamov A.L., Vikentev I.V., Lalomov A.V., Murashov K.Yu. Problems of development of the mineral resource base of the high-tech industry of Russia. *Geology of Ore Deposits*, 2023, vol. 65, no. 5, pp. 371–386. (In Russ.)
2. Spiridonov A.M., Zorina L.D., Kitaev N.A. *Gold-bearing ore-magmatic systems of Transbaikalia*. Novosibirsk, Geo Publ., 2006. 291 p. (In Russ.)
3. Berzina A.N., Berzina A.P., Gimon V.O. Cu-Mo-porphyry ore-magmatic system of Aksut (North-Eastern Tuva): sources and processes of ore-bearing magma formation. *Russian Geology and Geophysics*, 2021, vol. 62, no. 4, pp. 549–566. (In Russ.)
4. Sharp Z.D. A laser-based microanalytical method for the in-situ determination of oxygen isotope ratios of silicates and oxides. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1990, vol. 54, pp. 1353–1357.
5. Soloviev S.G., Kryazhev S.G., Semenova D.V., Kalinin Yu.A., Dvurechenskaya S.S., Sidorova N.V. Geology, mineralization, igneous geochemistry, and zircon U-Pb geochronology of the early Paleozoic shoshonite-related Julia skarn deposit, SW Siberia, Russia: toward a diversity of Cu-Au-Mo skarn to porphyry mineralization in the Altai-Sayan orogenic system. *Ore Geology Reviews*, 2022, vol. 142, 104706. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.104706>
6. Palyanova G.A., Sobolev E.S., Reutskiy V.N., Bortnikov N.S. Pyritized bivalve mollusks from the Upper Triassic of the Sentachan orogenic gold-antimony deposit (Eastern Yakutia): mineral composition and isotopic composition of sulfur. *Geology of Ore Deposits*, 2016, vol. 58, no. 6, pp. 513–521. (In Russ.)
7. Reutsky V.N., Borzdov Yu.M., Palyanov Yu.N. Carbon isotope fractionation associated with HPHT crystallization of diamond. *Diamond and Related Materials*, 2008, vol. 17 (11), pp. 1986–1989.
8. Bakker R.J. AqSo–NaCl: computer program to calculate p-T-V-x properties in the H₂O–NaCl fluid system applied to fluid inclusion research and pore fluid calculation. *Computers and Geosciences*, 2018, no. 115, pp. 122–133.
9. Borisenko A.S. Analysis of the salt composition of solutions of gas-liquid inclusions in minerals by cryometry method. *Using methods of thermobarogeochemistry in the search and study of ore deposits*. Moscow, Nedra Publ., 1982. pp. 37–47. (In Russ.)
10. Bodnar R.J. A method of calculating fluid inclusion volumes based on vapor bubble diameters and P-V-T-X properties of inclusion fluids. *Economic Geology*, 1988, no. 78, pp. 535–542.
11. Bodnar R.J., Vityk M.O. Interpretation of microthermometric data for NaCl–H₂O fluid inclusions. *Fluid inclusions in minerals: methods and applications*. Eds. B. De Vivo, M.L. Frezzotti. Blacksburg, VA, Virginia Polytechnic Inst State Univ, 1994. pp. 117–131.
12. Gavrikova S.N., Nikolaeva L.L., Galanin A.V., Orlov V.N. Early Precambrian of the southern part of the Stanovoi folded region. Moscow, Nedra Publ., 1991. 171 p. (In Russ.)
13. Voytkovich G.V., Miroshnikov A.E., Povarennykh A.S., Prokhorov V.G. *A brief guide to geochemistry*. Moscow, Nedra Publ., 1977. 183 p. (In Russ.)
14. Kovach V.P., Kotov A.B., Larin A.M., Salnikova E.B., Velikoslavinskiy S.D., Yakovleva S.Z., Plotkina Yu.V. Age and boundaries of the Olekminsky magmatic belt of the Selengino-Stanovoi superterrane of the Central Asian mobile belt. *Doklady Earth Sciences*, 2018, vol. 483, pp. 62–67. (In Russ.)
15. Aleksandrov G.V., Rublev A.G. New data on the age and metal content of the Amanan, Amudjikan, Nerchugan complexes of Northeastern Transbaikalia. New data on the age and metal content of the Amanan, Amudjikan, Nerchugan complexes of Northeastern Transbaikalia. *Endogenous processes and metallogeny in the BAM zone*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1983. pp. 141–147. (In Russ.)
16. Lukin V.A. *Report on exploration work and detailed exploration of the upper horizons of the Amazarkan gold deposit for 1993–1998*. Chita, Chitageologrosvetka Publ., 2002. 263 p. (In Russ.)
17. Borodin L.S. Model system of petrochemical and metallogenic trends of granitoids as a forecast system for deposits Sn, Li, Ta, W, Mo, Cu. *Geology of Ore Deposits*, 2004, vol. 46, no. 1, pp. 1–26. (In Russ.)
18. Velikoslavinskiy S.D. Geochemical typification of acid magmatic rocks of leading geodynamic settings. *Petrology*, 2003, vol. 11, no. 4, pp. 363–380. (In Russ.)
19. Velikoslavinskiy S.D., Krylov D.P. Geodynamic position of magmatic rocks of medium composition according to geochemical data. *Petrology*, 2015, vol. 23, no. 5, pp. 451–458. (In Russ.)
20. Vinokurov S.F. Europium anomalies in ore deposits and their geochemical significance. *Doklady Earth Sciences*, 1996, vol. 346, no. 6, pp. 792–795. (In Russ.)

21. Zorina L.D., Kulikova Z.I. Ore-generating magmatism and gold mineralization of the Darasunsky ore node in Eastern Transbaikalia. *Problems of petrogenesis and ore formation: Thesis of the A.N. Zavaritsky Readings*. Ekaterinburg, 1998. pp. 68–70. (In Russ.)
22. Jones B., Manning D.A.C. Composition of geochemical indices used for the interpretation of paleoredox conditions in ancient mudstones. *Chemical Geology*, 1994, vol. 111, pp. 111–129.
23. Kun L., Ruidong Y., Wenyong C., Rui L., Ping T. Trace element and REE geochemistry of the Zhewang gold deposit, Southeastern Guizhou Province, China. *Chinese Journal of Geochemistry*, 2014, no. 33, pp. 109–118.
24. Volkov A.V., Sidorov A.A., Savva N.E., Kolova E.E., Murashov K.Yu. Geochemical features of Paleozoic Au-Ag epithermal deposits (North-East of Russia). *Doklady Earth Sciences*, 2017, vol. 472, no. 4, pp. 443–448. (In Russ.)
25. Matsuhisa Y., Goldsmith J.R., Clouton R.N. Oxygen isotopic fractionation in the system quartz-albite-anorthite-water. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1979, vol. 43, pp. 1131–1140.
26. Ohmoto H., Rye R.O. Isotope of sulfur and carbon. *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*. N.Y., J. Wiley and Sons, 1979. pp. 509–567.
27. Kuzhuget R.V., Ankusheva N., Kalinin Yu.A., Pirajno F., Reutsky V.N. Mineralogical and geochemical peculiarities and PT conditions of ores from the Kyzyl-Tashtyg VMS polymetallic deposit, Eastern Tuva: fluid inclusion and S, O, C isotopic data. *Ore Geology Reviews*, 2022, vol. 142, 104717. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.104717>
28. Redin Yu., Redina A., Malyutina A., Dultsev V., Kalinin Yu., Abramov B., Borisenko A. Distinctive features of the major and trace element composition of biotite from igneous rocks associated with various types of mineralization on the example of the Shakhtama Intrusive Complex (Eastern Transbaikalia). *Minerals*, 2023, vol. 13, 1334. DOI: <https://doi.org/10.3390/min13101334>
29. Safonov Yu.G., Gorbunov G.I., Pek A.A., Volkov A.V., Zlobina T.M., Kravchenko G.G., Malinovskiy E.P. State and prospects of development of the doctrine of the structures of ore fields and deposits. *Geology of ore Deposits*, 2007, vol. 49, no. 5, pp. 386–420. (In Russ.)
30. Abramov B.N. Kariskij gold-ore cluster (Eastern Transbaikalia): geochemical features of ores, relationship of magmatism with mineralization. *Geology and mineral resources of Siberia*, 2023, no. 1 (53), p. 61–67. (In Russ.)
31. Abramov B.N., Kalinin Yu.A., Borovikov A.A. Itakinskoe gold deposit: isotopic composition, probable sources of ore matter (Eastern Transbaikalia). *Geospheric research*, 2022, no. 2, pp. 6–22. (In Russ.)
32. Prokofiev V.Yu., Zorina L.D. Fluid regime of the Darasun ore-magmatic system (Eastern Transbaikalia) according to the study of fluid inclusions. *Russian Geology and Geophysics*, 1996, vol. 37, no. 5, pp. 50–61. (In Russ.)
33. Prokofiev V.Yu., Kiseleva G.D., Dolomanova-Topol A.A. Mineralogy and formation conditions of Novoshirokinsky base metal-gold deposit, Eastern Transbaikalia Region, Russia. *Geology of Ore Deposits*, 2017, vol. 59, no. 6, pp. 521–550. DOI: [10.1134/S1075701517060046](https://doi.org/10.1134/S1075701517060046)
34. Prokofiev V.Yu. *Geochemical features of ore-forming fluids of hydrothermal gold deposits of various genetic types (based on the study of fluid inclusions)*. Novosibirsk, Nauka Publ., 2000. 186 p. (In Russ.)
35. Prokofiev V.Yu., Naumov V.B., Mironova O.F. Physicochemical parameters and geochemical features of fluids at Mesozoic gold deposits. *Geochemistry International*, 2020, vol. 58, no. 2, pp. 128–150. DOI: [10.1134/S001670292002010X](https://doi.org/10.1134/S001670292002010X)

Information about the authors

Bair N. Abramov, Dr. Sc., Leading Researcher, Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology SB RAS, 16A, Nedorezova street, Chita, 672007, Russian Federation. b_abramov@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8905-1677>

Yury A. Kalinin, Dr. Sc., Senior Researcher, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, 3, Akademik Koptyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russian Federation. kalinin@igm.nsc.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5877-666x>

Andrey A. Borovikov, Cand. Sc., Senior Researcher, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, 3, Akademik Koptyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russian Federation. borovik@igm.nsc.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1665-176X>

Viktor F. Posokhov, Senior Researcher, Geological Institute SB RAS, 6A, st. Sakhyanova, Ulan-Ude, 670047, Russian Federation. vitafl1@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6346-3182>

Vadim N. Reutsky, Dr. Sc., Leading Researcher, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, 3, Akademik Koptyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russian Federation. reutsky@igm.nsc.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5083-6629>

Received: 28.11.2023

Revised: 20.12.2023

Accepted: 09.09.2024

УДК 556.314

DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4775

Шифр специальности ВАК: 1.6.6

Изотопный состав природных вод Кузбасса на площадях добычи угольного метана

О.Е. Лепокурова^{1,2✉}, Е.В. Домрочева¹

¹Томский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
Россия, г. Томск

²Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

✉ LepokurovaOY@ipgg.sbras.ru

Аннотация. Актуальность. В Кузбассе впервые в России реализуется проект по добыче метана из угольных пластов. Пластовой воде, добываемой совместно с метаном из угольных пластов, отводится важная роль, т. к. она долгое время контактировала с угленосными породами, поэтому содержит богатую геохимическую информацию. За период с 2002 по 2022 гг. накопились новые изотопные данные как по водам угольных отложений региона, так и по вышележающим водам, включая поверхностные. **Цель.** На основе накопленного материала по изотопному составу (δD , $\delta^{18}O$, $\delta^{13}C$, ^{34}S , ^3H , ^{14}C) природных вод угленосных площадей создать эволюционную схему формирования вод в рамках развиваемой гипотезы по взаимодействию вода–порода–уголь–метан. **Объекты.** Речные, подземные воды зоны активного водообмена, верхней и нижней части зоны замедленного водообмена (добываемые совместно с метаном из угольных пластов). **Методы.** Исследования изотопного состава вод проводились в нескольких лабораториях: Центр коллективного пользования многоэлементных и изотопных исследований СО РАН, Томский филиал Федерального Государственного унитарного предприятия «СНИИГГИМС», в радиоуглеродной лаборатории на базе Центра коллективного пользования «Геохронология кайнозоя» и в Тихоокеанском океанологическом институте ДВО РАН. **Результаты и выводы.** Приведены данные по δD , $\delta^{18}O$, $\delta^{13}C$ и $\delta^{34}S$ для поверхностных и подземных вод Кузбасса на площадях добычи угольного метана. Показано, что все рассматриваемые воды по изотопному составу (δD и $\delta^{18}O$) являются инфильтрационными. Для вод нижней части замедленного водообмена, добываемых совместно с метаном из угольных пластов, характерен положительный кислородный сдвиг и очень легкий водород. Составлена схема эволюции изотопного состава водорастворенного углерода в регионе согласно полученным данным. Отмечается, что атмосферный источник CO_2 характерен только для речных вод, а в подземных водах присутствует только биогенная углекислота. Широкий диапазон значений $\delta^{13}C_{DIC}$ последних объясняется разной степенью участия легкой почвенной углекислоты и тяжелой биохимической, образуемых в угольном пласте, в процессе метанообразования. Самые тяжелые значения характерны для вод, добываемых совместно с метаном из угольных пластов, что связано с длительным взаимодействием с углем и метаном. Определено время такого взаимодействия радиоуглеродным методом: 17–30 тыс. лет. В районах добычи метана из угольных пластов отмечается утяжеление значений $\delta^{13}C_{DIC}$ для всех природных вод, что требует дальнейшего изучения.

Ключевые слова: поверхностные и подземные воды, угольный метан, стабильные изотопы водорода, кислорода, углерода, генезис, эволюция, возраст, Нарыкско-Осташкинская площадь

Благодарности: Авторы выражают благодарность Дмитрию Александровичу Сизикову и Евгению Владимировичу Кудинову за плодотворное многолетнее сотрудничество. Исследование выполнено в рамках проекта РФФ №24-27-00372.

Для цитирования: Лепокурова О.Е., Домрочева Е.В. Изотопный состав природных вод Кузбасса на площадях добычи угольного метана // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 10. – С. 71–86. DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4775

UDC 556.314

DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4775

Isotopic composition of natural waters of Kuzbass in coalbed methane production areas

O.E. Lepokurova^{1,2✉}, E.V. Domrocheva¹

¹Tomsk Branch of the Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of SB RAS,
Tomsk, Russian Federation

²National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

✉LepokurovaOY@ipgg.sbras.ru

Abstract. Relevance. In Kuzbass, a coalbed methane production project is being implemented for the first time in Russia. Formation water extracted together with coalbed methane plays an important role, since it has been in contact with the coal-bearing rocks for a long time, therefore it contains rich geochemical information. Over the period 2002–2022, new isotopic data were accumulated both on the waters of the region coal deposits and on overlying waters, including surface waters. **Aim.** Based on the material accumulated on the isotopic composition (δD , $\delta^{18}O$, $\delta^{13}C$, $\delta^{34}S$, ^3H , ^{14}C) of natural waters in coal-bearing areas, create an evolutionary scheme for the formation of waters within the framework of the developed hypothesis on the interaction of water-rock-coal-methane. **Objects.** River, underground waters of the zone of active water exchange, upper and lower parts of the zone of slow water exchange (extracted together with coalbed methane). **Methods.** Studies of the isotopic composition of waters were carried out in several laboratories: in the Multielement and Isotope Research Center of the SB RAS, the Technical Branch of the “SNIIGGIMS”, in the radiocarbon AMS laboratory based on the Center for Collective Use “Cenozoic Geochronology” and in the Pacific Oceanological Institute Far Eastern Branch Russian Academy of Sciences. **Results and conclusions.** The paper introduces the data on δD , $\delta^{18}O$, $\delta^{13}C$ и $\delta^{34}S$ for surface and groundwater in Kuzbass in coalbed methane production areas. It is shown that all the waters under consideration are infiltration based on their isotopic composition (δD and $\delta^{18}O$). The waters of the lower part of the slow water exchange, produced together with coalbed methane, are characterized by a positive oxygen shift and very light hydrogen. A diagram of the evolution of the isotopic composition of water-dissolved carbon in the region has been compiled according to the data obtained. It is noted that the atmospheric source of CO_2 is characteristic only of river waters, and only biogenic carbon dioxide is present in groundwater. The wide range of $\delta^{13}C_{DIC}$ values of the latter is explained by the varying degrees of participation of light soil carbon dioxide and heavy biochemical carbon dioxide formed during methane formation in the coal seam. The heaviest values are typical for waters produced together with coalbed methane, which is associated with long-term interaction with coal and methane. The time of such interaction was determined using the radiocarbon method: 17–30 thousand years. In areas where coalbed methane is produced, an increase in $\delta^{13}C_{DIC}$ values for all natural waters is observed, which requires further study.

Keywords: surface and ground waters, coal methane, stable isotopes of hydrogen, oxygen, carbon, genesis, evolution, age, Naryk-Ostashkinskaya area

Acknowledgements: The authors express their gratitude to Dmitry A. Sizikov and Evgeny V. Kudinov for fruitful, long-term cooperation. The research was financially supported by the RSF no. 24-27-00372.

For citation: Lepokurova O.E., Domrocheva E.V. Isotopic composition of natural waters of Kuzbass in coalbed methane production areas. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 10, pp. 71–86. DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4775

Введение

Кузнецкий каменноугольный бассейн (Кузбасс) представляет самое крупное отечественное и крупнейшее в мире угольное месторождение. Именно здесь, впервые в России, с 2010 г. реализуется проект по добыче метана из угольных пластов (МУП) [1–3], что дает прекрасную возможность для гидро-геохимического изучения территории в связи с ее разбуриванием. Существует огромный зарубежный опыт таких исследований месторождений МУП, особенно в США, Канаде, Австралии [4–7], а в по-

следнее годы в Китае и Индии [8–11]. Пластовой воде, добываемой вместе с угольным метаном, отводится важная роль, т. к. она долгое время контактировала с угленосными породами, поэтому содержит богатую геохимическую информацию и может выступать в качестве эффективных индикаторов для разведки и разработки МУП [12, 13]. Особый интерес представляет изотопный состав воды и водорастворенных веществ (в основном углерода) [14–17], в том числе с позиций взаимодействия системы вода–порода–уголь–метан [18, 19].

Первые изотопные исследования подземных вод региона сотрудники Томского филиала Института нефтегазовой геологии и геофизики (ТФ ИНГГ) СО РАН начали еще в 2002 г. при совместных работах с ООО «Газпром добыча Кузнецк» по гидрогеологии территорий потенциальной промышленной добычи угольного метана, т. е. еще до начала добычи. Данные были точечные, неполные и по разным районам центрального и южного Кузбасса. В 2012 г. работы были сконцентрированы на Нарыкско-Осташкинской площади, где на тот момент уже началась добыча угольного метана. Именно здесь в нижней части зоны замедленного водообмена были обнаружены воды высокой (нехарактерной для содовых вод) минерализации с тяжелым изотопным составом водорастворенного углерода. О первом опыте такого исследования авторы докладывали в работах [20–22].

Исследования были продолжены и далее, в результате появились новые изотопные данные как по водам угольных отложений, так и по другим природным водам территории. Кроме изотопного состава воды (δD и $\delta^{18}O$) и водорастворенного углерода ($\delta^{13}C$), в некоторых водах получены данные по водорастворенной сере (^{34}S), а также тритию (^3H) и радиоактивному углероду (^{14}C). Поэтому цель данной статьи заключается в обобщении всего накопленного, но до сих пор разрозненного материала по изотопному составу вод угленосных площадей (с акцентом на Нарыкско-Осташкинскую площадь) за период 2002–2022 гг., включая еще неопубликованные новые данные, что позволит выявить на этой основе изотопные маркеры и создать обобщенную схему формирования вод в рамках развиваемой гипотезы по взаимодействию вода–порода–уголь–метан.

Объекты и методы исследования

Нарыкско-Осташкинская площадь расположена в Ерунаковском районе Кемеровской области в центральной части Кузнецкого угольного бассейна. Природные, геологические и гидрогеологические условия территории детально рассмотрены в работах [20–25]. Отметим, что гидрографическая сеть относится к системе р. Томь, ее левый приток Черновой Нарык – основной водоток площади, также в западной части протекает левый приток Томи – Кыргай, и его правый приток Талда. Участок работ пересекают более мелкие речки. При анализе ранее известной информации и нового материала по гидрогеологии можно отметить прямые вертикальные зональности: гидродинамическую и гидрогеохимическую, в соответствии с которыми выделяются две зоны: активного (мощностью 150–300 м) и замедленного (нижнюю границу пока провести невозможно) водообменов. Последняя подразделяется также на верхнюю и нижнюю части зоны, как

раз в нижней и циркулируют наиболее интересные по изотопному составу воды [26–28].

Полевые исследования проходили в несколько временных периодов. До начала добычи угольного метана: в 2002–2004 и 2009 гг. точно опробованы подземные воды в разрозненных районах Кузбасса, всего по изотопному составу изучено 20 проб вод из 9 скважин и 2 родников. После начала добычи угольного метана в 2012 г. на Нарыкско-Осташкинской площади, в том числе непосредственно в угольных отложениях, а затем в 2013–2014 гг. проведены корректирующие полевые работы, отобрано 28 проб из 17 скважин и 1 родника. Также появились новые данные в процессе трехлетних полевых работ 2020–2022 гг.: 19 проб воды из 12 скважин, 3 рек, 1 шахты и 1 родника. Таким образом, в регионе изучено 67 проб природных вод на разный изотопный состав. Карта фактического материала представлена на рис. 1.

Результаты измерений отдельно представлены для разных типов водных объектов (по разрезу сверху вниз): 1) речные воды, 2) подземные воды активного водообмена, 3) верхней и 4) нижней части замедленного водообмена. Кроме того, были разделены воды Нарыкско-Осташкинской площади (всего 45 проб) и воды, не попадающие на эту площадь (22 пробы). В том числе мы смогли сравнить и изучить гидрогеохимическую ситуацию территории до и после начала добычи угольного метана.

Кроме изотопного состава определялись температура, pH, Eh, общая минерализация, ионный состав, концентрации микрокомпонентов и органических веществ. Более детально они были показаны в работах [22, 26, 27, 29–32]. Аналитические исследования проводились стандартными методами (титрование, масс-спектрометрия, фотометрия) в Томской политехническом университете и в ТФ ИНГГ СО РАН.

Определения изотопного состава кислорода и водорода вод, а также углерода водорастворенной углекислоты (DIC – dissolved inorganic carbon) проводилось в двух организациях: 1) до и включая 2012 г. в аккредитованной лаборатории изотопных методов ТФ ФГУП «СНИИГТИМС» (г. Томск) методом изотопного уравнивания с использованием универсальной системы подготовки и ввода проб газов GasBench II на масс-спектрометре DELTA V ADVANTAGE; 2) с 2014 г. в Центре коллективного пользования многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (г. Новосибирск) с помощью прибора Isotope Ratio Mass Spectrometer FinniganTM MAT 253, снабженного приставками пробоподготовки H/Device и GasBench II и FlashEA 1112. Результаты приводились в промилле относительно стандарта SMOW. В последнем центре определялся также изотопный состав серы сульфатов и углерода угля и карбонатов.

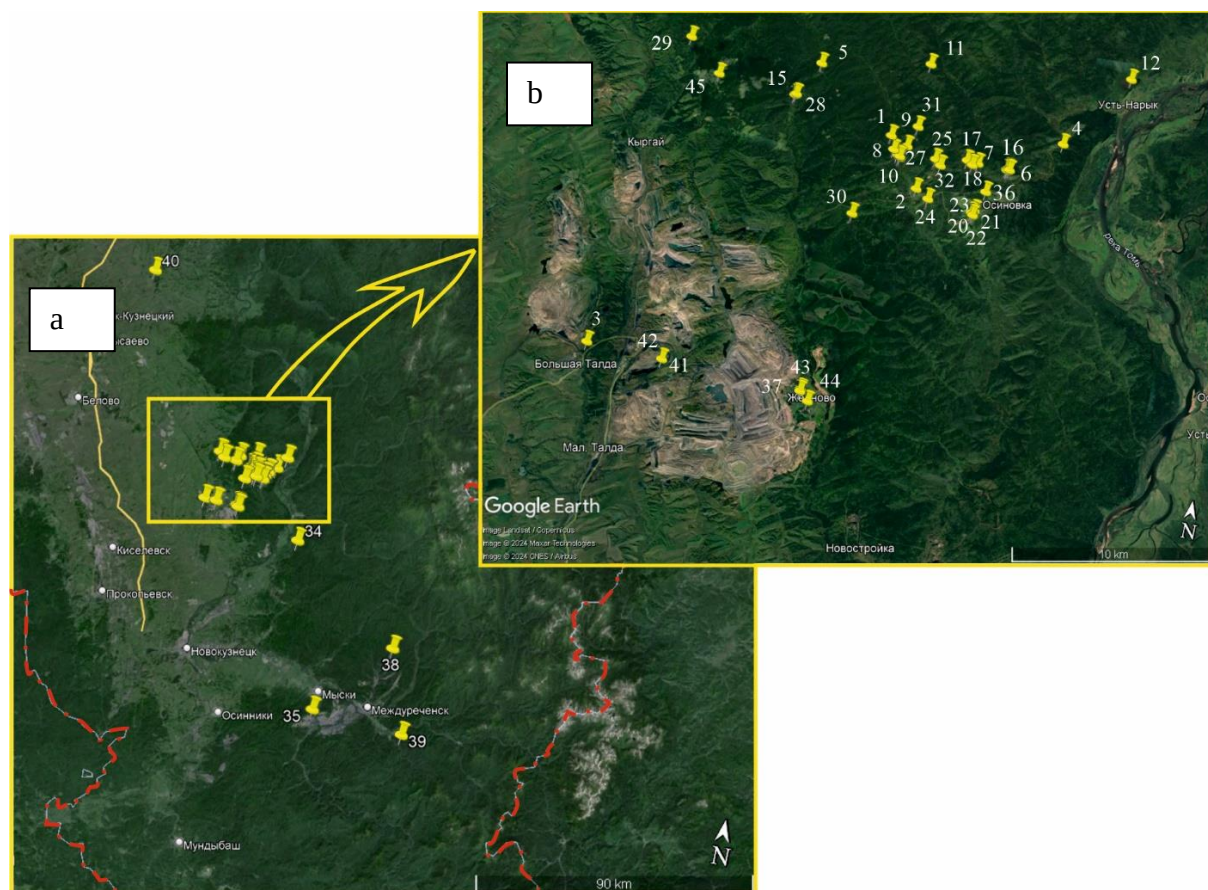


Рис. 1. Схема точек отбора проб в Кузбассе (а), на Нарыкско-Осташкинской и Талдинской площадях (б)
Fig. 1. Scheme of sampling points in Kuzbass (a), on the Naryksko-Ostashkinskaya and Taldinskaya areas (b)

Камеральная обработка заключалась в нанесении фигуративных точек с данными на диаграмму $\delta D - \delta^{18}O$, где они сравнивались с глобальной линией метеорных вод (ГЛМВ, в английском варианте GMWL – Global Meteoric Water Line) [33], на основе чего делался вывод о генезисе самого растворителя. Уравнение для линии ГЛМВ следующее:

$$\delta D = 8 \times \delta^{18}O + 10. \quad (1)$$

Локальная линия метеорных вод (ЛЛМВ) [34] совпадает с ГЛМВ в области попадания фигуративных точек, потому не использовалась здесь.

Изотопный состав углерода гидрокарбонат-иона ($\delta^{13}C(HCO_3^-)$ или $\delta^{13}C_{DIC}$) указывает нам либо непосредственно на генезис углекислоты в водах, либо на процессы, приводящие к изменению (фракционированию) изотопного состава углерода. Интервалы значений $\delta^{13}C$ вероятных источников углерода у разных авторов варьируют. Наиболее встречаемые, по нашему мнению, следующие: атмосферная углекислота с $\delta^{13}C$ от -11 до -5 ‰, все виды биогенной углекислоты (почвенная, захороненное органическое вещество: торф, уголь, нефть) от -30 до -18 ‰, образованная в результате разложения карбонатных пород от -2 до $+2$ ‰, мантий-

ная и магматическая углекислота от -4 до -8 ‰ [35–38].

При определении возраста подземных вод, т. е. среднего время нахождения вод в земных недрах, использовались два метода: тритиевый и радиоуглеродный. Для приповерхностных вод определялись концентрации трития в лаборатории ТОИ ДВО РАН (г. Владивосток) методом жидкосцинтилляционной спектрометрии на низкофоновом жидкосцинтилляционном счетчике QUANTULUS 1220. Затем возраст пересчитывался по формуле «поршневой поток» [39]. Для зоны замедленного водообмена был проведен радиоуглеродный анализ в первой в России радиоуглеродной лаборатории на базе ЦКП «Геохронология кайнозоя» (г. Новосибирск) методом ускорительной масс-спектрометрии (УМС) [40]. Процедура калибровки была произведена при помощи программы OxCal 4.3 (Оксфордский университет) последняя обновленная кривая Intcal 13.

Результаты исследования

Результаты изучения изотопного состава вод и водорастворенного неорганического углерода природных вод исследуемой территории приведены в табл. 1.

Таблица 1. Изотопный состав природных вод угленосных площадей Кузбасса

Table 1. Isotopic composition of natural waters of coal-bearing areas of Kuzbass

№ пункта Point number	Глубина, м Depth, m	Дата отбора Date of selection	$\delta^2\text{H}$, ‰	$\delta^{18}\text{O}$, ‰	$\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$, ‰
Речные воды/River waters					
1	–	05.08.2021	–110,9	–15,2	–5,6
2	–	05.08.2021	–112,5	–15,8	–4,6
3	–	05.08.2021	–113,7	–15,0	–0,2
Зона активного водообмена/Active water exchange					
Нарыкско-Осташкинская площадь/Naryksko-Ostashkinskaya area					
4	–	11.07.2012	–108,1	–15,0	–7,0
5	150	18.08.2012	–110,0	–16,0	–10,5
6	150	06.09.2012	–124,4	–17,4	–
7	150	06.09.2012	–	–	–17,1
8	150	14.10.2020	–119,0	–16,1	–10,1
9	150	14.10.2020	–116,8	–15,6	–8,8
10	150	05.08.2021	–118,6	–16,4	–3,9
11	150	05.08.2021	–118,9	–16,3	–3,6
36	110	31.07.2004	–	–	–21,2
Другие площади/Other areas					
34	–	03.08.2003	–	–	–24,4
35	–	04.08.2003	–	–	–17,6
Верхняя часть зоны замедленного водообмена/Upper part of the slow water exchange zone					
Нарыкско-Осташкинская площадь/Naryksko-Ostashkinskaya area					
12	~200–300	11.07.2012	–123,5	–17,0	8,1
		18.03.2014	–	–	0,2
		02.08.2022	–127,2	16,4	1,5
13	460	03.08.2012	–125,6	–17,7	4,7
		18.03.2014	–	–	4,4
45	200	08.10.2013	–	–	–8,8
	490	16.11.2013	–	–	–6,9
Другие площади/Other areas					
33	500	04.08.2022	–	–	–8,0
37	270	09.12.2002	–	–	–10,0
	312	20.12.2002	–	–	–11,7
	341	18.01.2003	–	–	–11,4
	432	26.05.2003	–	–	–12,8
38	305	28.04.2003	–	–	–13,2
39	1200	02.08.2003	–	–	–4,1
40	370	01.07.2004	–127,0	–16,5	–8,6
41	160	01.08.2004	–	–	–9,0
42	169	01.08.2004	–	–	–9,6
	240	07.07.2005	–	–	–4,2
43	150	01.08.2004	–	–	–12,4
44	300	30.04.2009	–132,5	–17,2	–
	500	28.05.2009	–125,3	–16,9	–
	687	09.06.2009	–122,9	–16,8	–10,2
	784	16.07.2009	–128,9	–16,5	–
	830	22.07.2009	–124,8	–16,7	–6,7
	930	02.09.2009	–127,3	–16,4	–
Нижняя часть зоны замедленного водообмена Нарыкско-Осташкинской площади Lower part of the slow water exchange zone of the Naryk-Ostashkinskaya area					
14	1120	03.08.2012	–140,1	–11,8	16,0
15	965	03.08.2012	–134,6	–12,2	29,0
	959	18.03.2014	–	–	26,4
16	870	03.08.2012	–144,6	–13,1	27,4
	870	14.10.2020	–141,8	–12,2	29,2
17	1050	03.08.2012	–144,3	–12,4	25,3
	1040	18.03.2014	–	–	23,7
18	565	03.08.2012	–132,2	–14,9	30,9
	548	18.03.2014	–	–	30,3
19	1200	03.08.2012	–132,8	–11,9	26,0
	1062	02.08.2022	–146,7	–12,2	28,5
20	455	04.08.2012	–139,4	–13,6	22,5
	437	18.03.2014	–	–	14,0
21	670	05.08.2012	–140,8	–12,8	27,6
22	670	02.08.2022	–149,6	–12,6	28,8
23	911	05.08.2021	–135,5	–14,3	24,1

	805	14.10.2020	-128,0	-14,5	24,2
24	1215	18.03.2014	-	-	21,2
25	1170	18.03.2014	-	-	28,9
26	850	18.03.2014	-	-	24,6
	1100	14.10.2020	-143,0	-13,4	29,8
	707	05.08.2021	-144,0	-14,3	28,6
27	1000	14.10.2020	-138,0	-16,3	27,3
28	1117	18.03.2014	-	-	21,4
29	750	18.03.2014	-	-	25,1
30	1070	18.03.2014	-	-	21,5
31	900	05.08.2021	-132,1	-14,1	24,0
32	748	02.08.2022	-125,6	-13,7	29,9

Речные воды. В пределах Нарыкско-Осташкинской и соседней Талдинской площадей на химический состав отобрано и изучено около 20 проб из водотоков разного порядка [31]. Как правило, воды слабощелочные и щелочные (рН от 7,6 до 8,9) гидрокарбонатные кальциевые с минерализацией 0,2–0,7 г/л. Исключение составляет отобранная в 2021 г. проба воды из реки Талды (№ 3), которая выделяется высокой соленостью 1,8 г/л и содовым составом. Для всех поверхностных вод характерны высокие концентрации органических веществ, показатель $C_{орг}$ от 2,4 до 36,6 мгО₂/л.

Данные по изотопному составу получены лишь для трех речных проб: для двух мелких водотоков Дарьина речка (№ 1) и Березовая (№ 2), протекающих за территорией Талдинского угольного разреза, но в пределах площадок скважин на угольный метан, и реки Талды (№ 3), протекающей по угольному разрезу. Значения δD и $\delta^{18}O$ близки между собой и типичны для вод метеорного генезиса, в интервалах: от -113,7 до -110,9 ‰ и от -15,8 до -15,0 ‰ соответственно (рис. 2).

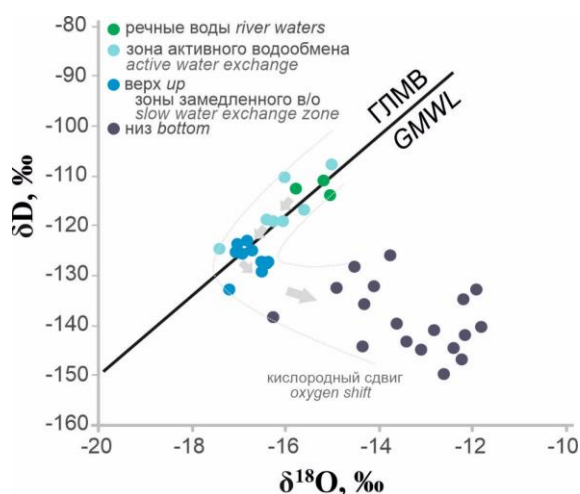


Рис. 2. Диаграмма δD - $\delta^{18}O$ с нанесением данных по изотопному составу вод (стрелками показана эволюция изотопного состава вод)

Fig. 2. δD - $\delta^{18}O$ diagram with data on the isotopic composition of waters (arrows show the evolution of the isotopic composition of waters)

Значения изотопного состава водорастворенного углерода $\delta^{13}C_{DIC}$ в мелких водотоках оказались равными -5,6 и -5,0 ‰, что указывает на атмосферный генезис углекислоты. Исключением, как и в случае с химическим составом, являются воды реки Талды, отличающиеся более тяжелым $\delta^{13}C_{DIC} = -0,2$ ‰. Причину этого попытаемся раскрыть ниже.

Подземные воды зоны активного (интенсивного) водообмена распространены в верхней части разреза, сложенной рыхлыми мезо-кайнозойскими отложениями. Минерализация колеблется от 0,4 до 1,0 г/л, рН от 7,0 до 8,9, по составу гидрокарбонатные кальциевые. Для вод характерны более низкие концентрации органических веществ, чем для поверхностных, $C_{орг}$ 1–8 мгО₂/л [22].

Данные по изотопному составу вод получены из неглубоких (100–150 м) скважин и родников. Значения δD и $\delta^{18}O$ ложатся на линию метеорных вод (рис. 2) в широких интервалах: от -127,2 до -108,1 ‰ и от -17,4 до -15,0 ‰ соответственно.

Значения $\delta^{13}C_{DIC}$ изменяются также в очень широком интервале от -24,4 до 1,5 ‰. При этом отмечена следующая закономерность: 1) в водах, отобранных до начала добычи МУП и вне Нарыкско-Осташкинской площади, состав углерода гидрокарбонат-иона легкий, в пределах от -24,4 до -17,6 ‰; 2) в водах, отобранных на территории добычи, $\delta^{13}C_{DIC}$ тяжелый, в пределах от -17,1 до 1,5 ‰. В данных геологических условиях отсутствуют исходные карбонатные породы, также невозможно участие глубинной (мантийной и магматической) и атмосферной CO₂. Источник биогенный, но утяжеленный, связанный, по-видимому, с низзалегавшими водами.

Кроме того, был определен $\delta^{13}C$ в водорастворенном газе (метане и углекислом газе), правда лишь в одной пробе (табл. 2). Углекислый газ легкий, биогенный, характерный для пресных вод верхней зоны. Разница между изотопным составом углерода гидрокарбонат-иона и углекислого газа ($\delta^{13}C_{DIC} - \delta^{13}C_{CO_2}$) составляет 5,1 ‰, в сторону утяжеления гидрокарбонат-иона. Изотопный состав углерода метана достаточно типичный для зоны окисления органического вещества -39,3 ‰.

Таблица 2. $\delta^{13}\text{C}$ в водорастворенных газах угленосных площадей Кузбасса

Table 2. $\delta^{13}\text{C}$ in water-dissolved gases of coal-bearing areas of Kuzbass

№ пункта Point number	$\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$, ‰	$\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$, ‰	$\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$
Подземные воды зоны активного водообмена Groundwater of the zone of active water exchange			
36	-39,3	-26,3	5,1
Верхняя часть зоны замедленного водообмена Upper part of the slow water exchange zone			
13	-45,9	-3,2	7,6
39	-38,0	-7,5	-5,7
40	-40,6	-3,9	-0,2
41	-51,4	-5,0	2,4
42	-45,0	-10,1	1,1
43	-39,0	-6,8	2,6
Нижняя часть зоны замедленного водообмена Lower part of the slow water exchange zone			
19	-46,9	18,0	8,4
17	-53,1	14,6	9,1
18	-46,0	22,3	8,0
20	-43,3	6,7	7,3
24	-49,1	12,6	8,6
25	-53,0	19,6	9,3
26	-44,3	17,1	7,5
28	-46,7	12,7	8,7
29	-67,3	13,7	11,4
30	-51,2	13,3	8,2

Подземные воды верхней части зоны замедленного водообмена (с интенсивно трещиноватыми породами) распространены в песчаных пермских угленосных отложениях, частично в эффузивно-осадочных безугольных отложениях триаса, на глубине до ~500 м. Это воды уже с более высокой минерализацией (от 0,8 до 4,0 г/л) и высокой щелочностью (рН от 7,1 до 9,9), гидрокарбонатным натриевым (содовым) составом. В составе водорастворенного газа начинает превалировать метан. Показатель $\text{C}_{\text{орг}}$ в среднем увеличивается в 1,5 раза по сравнению с вышележающими водами.

Данные по изотопному составу вод получены из скважин на глубинах 200–500 м на территории Нарыкско-Осташкинской площади, в других районах, не связанных с бурением на угольный метан, из скважин на глубинах и до 1000 м. Значения δD и $\delta^{18}\text{O}$ повторяют ГЛМВ (рис. 2), но уже в более узких интервалах: от -132,5 до -113,5 ‰ и от -17,7 до -16,4 ‰ соответственно. В целом отмечается облегчение изотопов воды относительно зоны активного водообмена.

Значения $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$, аналогично водам зоны активного водообмена, характеризуются широким разбросом, но с заметным утяжелением от -13,2 до 8,1 ‰. Закономерность остается прежней: 1) в водах, отобранных до начала добычи угольного метана и вне площадей добычи, состав углерода гидрокарбонат-иона более легкий, в пределах от -13,2 до -4,1 ‰; 2) в водах, отобранных на территории до-

бычи, $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ тяжелый, в пределах от -8,8 до 8,1 ‰, т. е. начинают преобладать положительные значения.

По сравнению с гидрокарбонат-ионом, значения $\delta^{13}\text{C}$ углекислого газа и метана колеблются в узких интервалах: от -10,1 до -3,2 и от -51,4 до -38,0 ‰ соответственно. Разница между $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ и $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ не поддается общей закономерности.

Подземные воды нижней части зоны замедленного водообмена (в породах затухающей трещиноватости) распространены в пермских угленосных отложениях на глубинах начиная с 400–500 м и до 1200 м, а возможно, и ниже. Именно эти воды добываются совместно с МУП. Характеризуются значениями минерализации в интервале 5–27 г/л, нейтральной средой рН 6,7–8,8, содовым составом и высокими концентрациями органических веществ $\text{C}_{\text{орг}}$ 13–53 мгО₂/л. В газовом составе превалирует метан (70–99 %).

Данные по изотопному составу вод получены из скважин на глубинах 450–1200 м только на территории Нарыкско-Осташкинской площади и уже после начала добычи метана. Интервалы значений δD и $\delta^{18}\text{O}$: от -149,6 до -125,6 ‰ и от -16,2 до -11,8 ‰ соответственно. Наблюдается положительный кислородный сдвиг (на 2,2–7,2 ‰) от ГЛМВ (рис. 2), т. е. утяжеление изотопного состава кислорода. Это объясняется достаточно длительным взаимодействием подземных вод с вмещающими алюмосиликатными породами, у которых $\delta^{18}\text{O}$ тяжелее, чем в водах. Значения δD , наоборот, немного облегчены по сравнению с вышележающими водами.

Значения $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ положительные и самые тяжелые: от 14,0 до 30,9 ‰. При этом показатель $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ тоже положительный, но легче: от 6,7 до 22,3 ‰ (табл. 2). Разница $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ стабильна в интервале 7,3–11,4 ‰. Изотопный состав углерода метана, наоборот, очень легкий и достаточно типичный для угольных бассейнов [4–19]: $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$ от -67 до -43,3 ‰.

Обсуждение

Таким образом, все рассматриваемые воды являются инфильтрационными, т. е. формировались за счет местных атмосферных осадков, в том числе воды, добываемые совместно с МУП. Однако в результате длительного их просачивания через вмещающие алюмосиликатные породы произошел изотопный обмен легкого кислорода вод с тяжелым кислородом пород, что привело к кислородному сдвигу. При этом водородный изотопный обмен не наблюдается, так как его содержание в породах пренебрежительно мало. Отсюда разные зависимости изотопного состава подземных вод с глубиной: δD облегчается, а $\delta^{18}\text{O}$ утяжеляется (рис. 3). Поскольку водород не подвергается изменениям со

временем как кислород, он может указывать на изотопный состав исходной метеорной воды, которая затем оказалась в угленосных отложениях. Используя уравнение ГЛМВ (1) [33] можно вычислить исходные значения $\delta^{18}\text{O}$. Таким образом, значения δD и $\delta^{18}\text{O}$ исходной метеорной воды были: от $-149,6$ до $-125,6$ ‰ и от $-20,0$ до $-17,0$ ‰ соответственно. Такая изотопно легкая вода могла сформироваться только в холодных климатических условиях [41–43], что тоже косвенно указывает на возраст вод. Прямые методы рассмотрим ниже.

Концентрации трития были определены для относительно современных вод, т. е. речных и зоны активного водообмена (табл. 3). Первые использовали вместо атмосферных осадков, по которым отсутствовали данные, условно приняв их за самые молодые. В подземных водах значения, пусть и по двум пробам, оказались одинаковыми 11,83–11,84 ТЕ, при пересчете по формуле [39] время пребывания вод активного водообмена в породах оказалось равным 6,15–6,17 лет. Существуют споры по поводу использования трития из-за зараженности атмосферы его термоядерным аналогом и трудностей определения его исходного значения в области питания [44, 45]. Для нашей исключительно сравнительной цели мы этим пренебрегли.

Возраст подземных вод нижней части зоны замедленного водообмена, добываемых вместе с МУП, согласно радиоуглеродному методу, оказался равен 17058–29354 лет (табл. 4). Данный возраст косвенно подтверждается, как уже сказано выше, легким изотопным составом исходной метеорной

воды, по значениям которого можно рассчитать среднегодовую температуру воздуха восполнения подземных вод, согласно [46]. Она оказалась равной от -9 до -3 °С, что соответствует времени примерно от каргинского межледникового (50–23 тыс. лет назад) к сартанскому оледенению (20–18 тыс. лет назад) [47, 48].

Таблица 3. Концентрации трития и расчетный возраст приповерхностных вод

Table 3. Tritium concentrations and estimated ages of surface waters

№ пункта/Point number	1	2	3	10	11
Объект/Object	Реки/Rivers			Зона активного водообмена Zone of active water exchange	
ТЕ/TU	16,94	16,41	16,48	11,83	11,84
Расчетный возраст, лет Estimated age (3), years	–	–	–	6,17	6,15

Таблица 4. Радиоуглеродный и калиброванный возраст вод угленосных отложений

Table 4. Radiocarbon and calibrated ages of coal-bearing sediment waters

№ пункта/Point number	30	15	20	28
Радиоуглеродный возраст, лет Radiocarbon age, years	23140	25490	15710	27400
Калиброванный возраст (календарных), лет Calibrated age (calendar), years	25469	27720	17058	29354

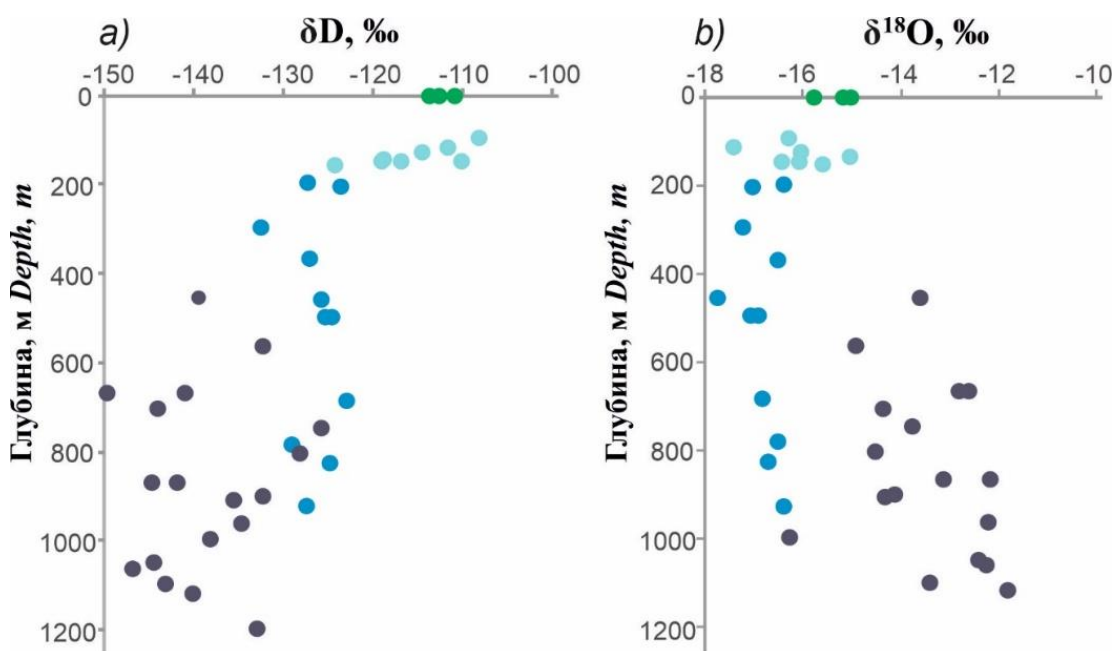


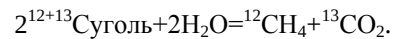
Рис. 3. Графики зависимости значений δD (a) и $\delta^{18}\text{O}$ (b) вод от глубины залегания

Fig. 3. Graphs of the dependence of δD (a) and $\delta^{18}\text{O}$ (b) values of water on the depth of occurrence

С интерпретацией данных по изотопному составу водорастворенного углерода в регионе ситуация сложнее, поскольку значения $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ попадают в очень широкий диапазон: от $-24,4$ до $30,9$ ‰, т. е. от отрицательных до аномально положительных. Однако можно выделить всего два возможных источника CO_2 : атмосферный и биогенный. Собственно, атмосферная углекислота присутствует только в реках ($\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ в интервале $-5,6 \dots -5,0$ ‰). В подземных водах присутствует только биогенный углерод в широком интервале значений $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$, трансформации которого (утяжеление изотопного состава) связаны с процессом метанообразования в пласте. То есть условно биогенную углекислоту можно разделить на почвенную (очень легкую с $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ от -17 ‰ и легче) и угольную или биохимическую (аномально тяжелую с положительными значениями $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$). Все представленное разнообразие значений $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ природных вод региона связано с разной степенью участия данных CO_2 . Схематично это представлено на рис. 4 стрелками зеленого (условное влияние почвенной углекислоты) и коричневого цветов (биохимической углекислоты).

Как же образовалась такая тяжелая биохимическая углекислота? Сам уголь имеет легкий изотоп-

ный состав углерода. В единственной измеренной нами пробе он оказался равным $\delta^{13}\text{C} = -23,1$ ‰, по литературным данным от -24 до -18 ‰ [49]. В результате биогеохимических реакций в угольном пласте образуется метан, который концентрирует легкий изотоп ^{12}C . В нашем случае $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$ от -67 до $-43,3$ ‰. Углекислый газ, наоборот, концентрирует ^{13}C , поэтому значения $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ уже положительные: от $6,7$ до $22,3$ ‰. Происходит изотопное фракционирование углерода – «легкий» в CH_4 и «тяжелый» в CO_2 [5, 38]. Условно с позиций изотопного фракционирования это можно показать так:



При этом речь идет только о доминировании легкого или тяжелого изотопа в том или ином соединении. Известна тенденция повышения содержания ^{13}C в соединениях по мере повышения степени окисления углерода: $\text{CH}_4 \rightarrow \text{C} \rightarrow \text{CO}_2 \rightarrow \text{CO}_3$ [50]. Гидрокарбонат-ион формируется еще тяжелее по изотопному составу: $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ от $14,0$ до $30,9$ ‰. Еще больше концентрирует ^{13}C осадочный из вод кальцит (табл. 5) на $1\text{--}5$ ‰ относительно HCO_3^- .

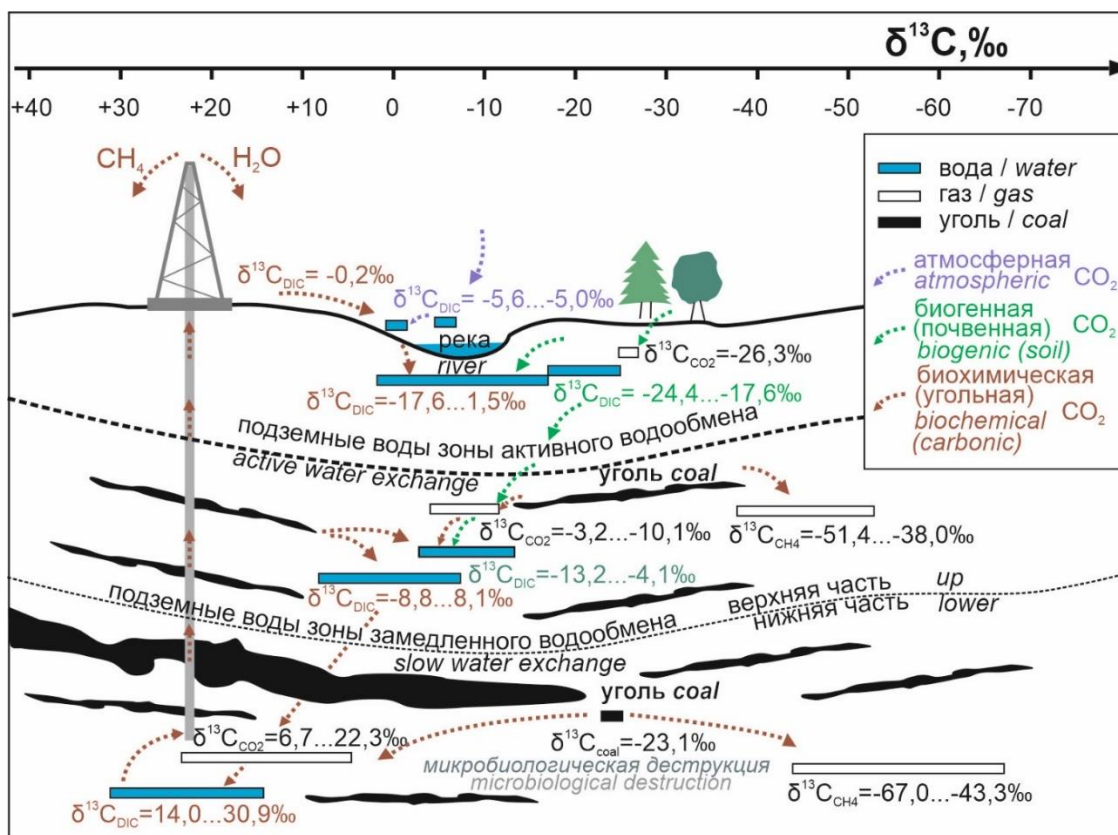


Рис. 4. Схема распределения значений $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ и водорастворенных газов (CO_2 , CH_4) в регионе. Шкала сверху идет в обратную сторону, как это принято в литературе [38]

Fig. 4. Scheme of distribution of $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ and water-dissolved gases (CO_2 , CH_4) in the region. The scale at the top goes in the opposite direction as is customary in literature [38]

Таблица 5. Изотопный состав кислорода и углерода высадившегося из вод кальцита

Table 5. Isotopic composition of oxygen and carbon in calcite precipitated from the waters

№/No.	$\delta^{13}\text{C}_{\text{CaCO}_3}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{CaCO}_3}$	$\delta^{13}\text{C}_{\text{CaCO}_3}-\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{CaCO}_3}-\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$
Верхняя часть зоны замедленного водообмена Upper part of the slow water exchange zone				
12	6,8	13,2	5,3	29,6
33	-6,7	13,4	1,3	30,5
Нижняя часть зоны замедленного водообмена Lower part of the slow water exchange zone				
19	27,8	18,9	-0,7	31,1
22	31,6	20,8	2,8	33,4
32	35,6	18,6	5,8	32,4

Изотопы кислорода в системе исходная порода [51] – вода, добываемые совместно с МУП, – вторичный карбонат меняются следующим образом. Вмещающие породы утяжелены ^{18}O примерно на 10–15 ‰ относительно вод, а вторичные карбонаты еще больше концентрируют ^{18}O на 30 и более ‰ ($\delta^{18}\text{O}_{\text{CaCO}_3}-\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$) (табл. 5).

Ускоряет процесс формирования тяжелой CO_2 в угольном пласте микробиальная редукция биогенного вещества [52–55], т. е. метаногенные бактерии. Начата работа по изучению микробиологической активности в угольных пластах Кузнецкого бассейна [56]. Косвенно об этом также могут говорить изотопные данные по растворенной сере (табл. 6). По сравнению с зоной активного водооб-

мена в водах угольных пластов значения $\delta^{34}\text{S}$ увеличиваются на 6–12 ‰, что доказывает активность процессов бактериальной сульфатредукции [57]. Чем больше время взаимодействия вод с угольными отложениями, тем больше потребляется сульфатов, что приводит к их изотопному утяжелению. Ожидаемо, самые тяжелые значения у вод ликвидированной шахты (№ 33), $\delta^{34}\text{S}=22,2$ ‰, но здесь иной «неприродный» механизм фракционирования.

Таблица 6. Изотопный состав водорастворенной серы

Table 6. Isotopic composition of water-dissolved sulfur

№ пункта/Point number	3	12Т	33	19	32
$\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4^{2-}}$, ‰	7,4	5,4	22,2	11,8	17,4

Непонятным остается вопрос о поступлении тяжелого углерода из зоны замедленного водообмена в вышезалегающие воды. Такая тенденция существует на территории добычи МУП и угольных разрезов (рис. 5). В реке Талде установлен содовый состав воды с превышением значений минерализации в 6 раз и утяжелением $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ на 5 ‰ по сравнению с другими реками. Очевидно, сюда стекает минерализованная вода с угольного разреза. Поступление тяжелого гидрокарбонат-иона в зону активного водообмена вызывает много вопросов. Имеет это природную или техногенную причину необходимо выяснять далее.

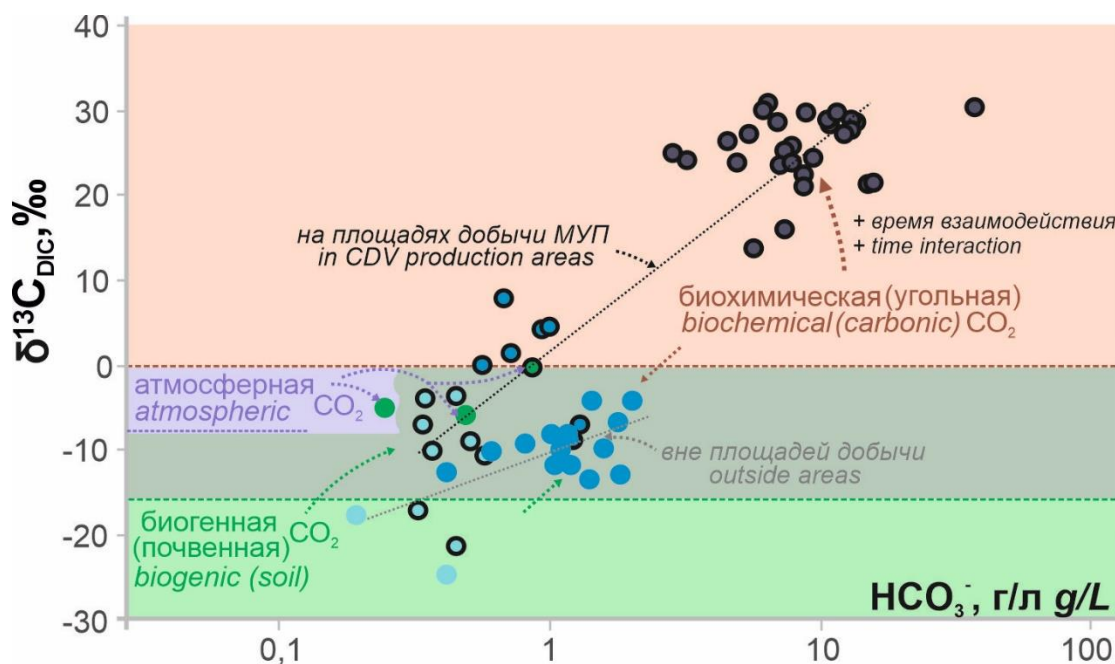


Рис. 5. Зависимости значений $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ региона от концентрации гидрокарбонат иона. Жирным обведены точки с пробам на площадях добычи МУП

Fig. 5. Dependence of $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ values in the region on hydrocarbonate ion concentration. The points with samples in the areas of extracting methane from coal layers are circled in bold

Выводы

Анализируя результаты проведенных за последние 20 лет исследований по изотопному составу природных вод Кузбасса, в том числе и на площадях добычи МУП, можно сделать следующие выводы.

1. Все рассматриваемые воды региона, согласно изотопному составу воды, являются инфильтрационными. С глубиной, судя по значениям δD , изотопный состав вод облегчается, что говорит о более холодных климатических условиях их питания. Изотоп ^{18}O , наоборот, утяжеляется, он подвержен изменениям со временем, поскольку меняется с «тяжелым» изотопом кислорода вмещающих алюмосиликатных пород.
2. Составлена схема эволюции изотопного состава водорастворенного углерода в регионе. Несмотря на широкий диапазон значений $\delta^{13}C_{DIC}$, в подземных водах присутствует только биогенная углекислота, а точнее легкая почвенная (от –17 ‰ и легче) и тяжелая биохимическая (положительные значения $\delta^{13}C$), связанная с процессом метанообразования в угольном пласте. Все многообразие $\delta^{13}C_{DIC}$ связано с разной степенью участия данных CO_2 . В целом с глубиной $\delta^{13}C_{DIC}$ утяжеляется. В речных водах преобладает атмосферный источник CO_2 .
3. Длительное взаимодействие вод, добываемых с МУП, с вмещающими породами, углем и метаном привело к высоким значениям минерализации, утяжелению кислорода (кислородный

сдвиг), углерода (масштабное фракционирование изотопов углерода угля) и серы (бактериальная сульфат-редукция). Чем больше содержание угольного метана в пласте, тем больше легкого изотопа ^{12}C он «забирает» из угля, и тем тяжелее гидрокарбонат-ион ($\delta^{13}C_{DIC}$), который концентрирует по остатку ^{13}C . Высаживающийся из вод карбонат еще более тяжелый по изотопному составу углерода ($\delta^{13}C_{CaCO_3}$), а также кислорода ($\delta^{18}O_{CaCO_3}$).

4. Время взаимодействия вода–порода–уголь–метан в нижней части зоны замедленного водообмена определено радиоуглеродным методом в 17–30 тыс. лет, что косвенно подтвердилось расчетными данными по исходному изотопному составу воды. Примерно столько необходимо для формирования содовых вод соленостью 5–27 г/л со значениями $\delta^{13}C_{DIC}$ порядка 20–30 ‰ и кислородным сдвигом 2,2–7,2 ‰. Для сравнения: возраст подземных вод активного водообмена был определен тритиевым методом в 6–7 лет.
5. В районе добычи МУП, где также сосредоточены и угольные разрезы, все природные воды имеют более тяжелые значения $\delta^{13}C_{DIC}$. В причинах этого необходимо разбираться. В случае речных вод выявлено загрязнение водами с угольного разреза. Таким образом, применение изотопов в качестве трассеров может помочь при решении различных экологических задач региона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исламов Д. Добыча угольного метана: опыт Кузбасса // Нефтегазовая вертикаль. – 2022. – Т. 12. URL: https://ngv.ru/articles/dobycha-ugolnogo-metana-opyt-kuzbassa-/?sphrase_id=4547987 (дата обращения 10.07.2024).
2. Кудинов Е.В. Промысловая добыча метана угольных пластов в Кузбассе как метод снижения угроз экосистеме // Актуальные проблемы нефти и газа. – 2018. – Вып. 4 (23). DOI: 10.29222/ipng.2078-5712.2018-23.art84.
3. Основные направления стратегии развития ОАО «Газпром» промышленной добычи метана из угольных пластов / А.М. Карасевич, Н.М. Сторонский, В.Т. Хрюкин, Е.В. Швачко // Спецвыпуск журнала «Газовая промышленность» – Метан угольных пластов. – 2012. – № 672. – С. 125–137.
4. Brinck E.L., Drever J.I., Frost C.D. The geochemical evolution of water coproduced with coalbed natural gas in the Powder River Basin, Wyoming // Environmental Geosciences. – 2008. – Vol. 15. – № 4. – P. 153–171. DOI: 10.1016/S1001-0742(10)60463-9.
5. Influence of groundwater flowpaths, residence times and nutrients on the extent of microbial methanogenesis in coal beds: Powder River Basin, USA / B.L. Bates, J.C. McIntosh, K.A. Lohse, P.D. Brooks // Chem. Geol. – 2011. – Vol. 284. – P. 45–61. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2011.02.004.
6. Relationships between water and gas chemistry in mature coalbed methane reservoirs of the Black Warrior Basin / J.C. Pashin, M.R. McIntyre-Redden, S.D. Mann, D.C. Kopaska-Merkel, M. Varonka, W. Orem // Int J Coal Geol. – 2014. – Vol. 126. – P. 92–105. DOI: 10.1016/j.coal.2013.10.002.
7. Stable isotope and water quality analysis of coal bed methane production waters and gases from the Bowen Basin, Australia / E. Kinnon, S.D. Golding, C.J. Boreham, K.A. Baublys, J.S. Esterle // Int. J Coal Geol. – 2010. – Vol. 82. – P. 219–231. DOI: 10.1016/j.coal.2009.10.014.
8. Hydrogeochemical disparities and constraints of water produced from various coal seams in the Baode Block, Ordos Basin, China / Y. Bao, Y. Hao, Z. Guo, Y. Hu, J. Li, J. Meng, F. Wang // ACS Omega. – 2024. – Vol. 17. – № 9(4). – P. 4905–4919. DOI: 10.1021/acsomega.3c08525. PMID: 38313488; PMCID: PMC10831859.
9. Geochemical characteristics and development significances of constant and trace elements from coalbed methane co-produced water: a case study of the Shizhuangnan Block, the Southern Qinshui Basin // Li Yang, T. Shuheng, J. Chen, S. Zhang, Z. Xi // Journal of Earth Science. – 2024. – Vol. 35 (1). – P. 51–61. DOI: 10.1007/s12583-022-1628-y.
10. Identification of interwell interference based on hydrogeochemical characteristics of produced water from coalbed methane wells: a case study in the Southern Qinshui Basin, China / M. Tu, W. Xiaoming, S. Hou, W. Chen, Z. Dang // SPE Journal. – 2024. DOI: 10.2118/219759-PA.

11. Coalbed methane-produced water quality and its management options in Raniganj Basin, West Bengal, India / V.A. Mendhe, S. Mishra, A.K. Varma et al. // *Appl Water Sci.* – 2017. – Vol. 7. – P. 1359–1367. DOI: 10.1007/s13201-015-0326-7.
12. Van W.A. Geochemical signature of formation waters associated with coalbed methane // *AAPG Bulletin.* – 2003. – Vol. 87. – № 4. – P. 667–676. DOI: 10.1306/10300201079.
13. Hydrogeochemistry signatures of produced waters associated with coalbed methane production in the Southern Junggar Basin, NW China / Z. Zhang, D. Yan, X. Zhuang et al. // *Environ Sci. Pollut. Res.* – 2019. – Vol. 26. – P. 31956–31980. DOI: 10.1007/s11356-019-06350-0.
14. Golding S.D., Boreham C.J., Esterle J.S. Stable isotope geochemistry of coal bed and shale gas and related production waters: a review // *Int. J. Coal Geol.* – 2013. – Vol. 120. – P. 24–40. DOI: 10.1016/j.coal.2013.09.001.
15. Stable isotopic composition of coal bed gas and associated formation water samples from Raniganj Basin, West Bengal, India / S. Ghosh, S.D. Golding, A.K. Varma, K.A. Baublys // *Int. J. Coal Geol.* – 2018. – Vol. 191. – P. 1–6.
16. Isotopic and hydrogeochemical evidence for biogenic gas in Cuervos Formation coal beds, Cesar Rancheria Basin, Colombia / V.M. Sepulveda-Castaneda, J.S. Esterle, S.D. Golding, S. Gonzalez // *International Journal of Coal Geology.* – 2022. – Vol. 249 (4). – P. 103882. DOI: 10.1016/j.coal.2021.103882.
17. Tracing the origin and formation mechanisms of coalbed gas from the Fuxin Basin in China using geochemical and isotopic signatures of the gas and coproduced water / X. Chen, Y. Wang, M. Tao, Z. Zhou, Z. He, K. Song // *International journal of coal geology.* – 2023. – Vol. 267. – P. 104185. DOI: 10.1016/j.coal.2023.104185.
18. Chemical and stable isotopic evidence for water/rock interaction and biogenic origin of coalbed methane, Fort Union Formation, Powder River Basin, Wyoming and Montana U.S.A. / C.A. Rice, R.M. Flores, G.D. Stricker, M.S. Ellis // *Int. J. Coal Geol.* – 2018. – Vol. 76. – P. 76–85. DOI: 10.1016/j.coal.2008.05.002.
19. Biogeochemistry and water-rock interactions of coalbed methane co-produced water in the Shizhuangnan Block of the Southern Qinshui Basin, China / Y. Li, S.H. Tang, S.H. Zhang et al. // *Water.* – 2020. – Vol. 12 (1). – P. 130–148. DOI: 10.3390/w12010130.
20. Аномальный состав изотопов углерода в подземных щелочных водах Кузбасса / С.Л. Шварцев, О.Е. Лепокурова, Е.В. Домрочева, В.А. Пономарчук, Д.А. Сизиков // *Доклады академии наук.* – 2016. – Т. 469. – № 6. – С. 724–728.
21. Лепокурова О.Е., Пыряев А.Н., Шварцев С.Л. Стабильные изотопы углерода водорастворенных газов угленосных отложений Нарыкско-Осташкинской площади (Кузбасс) // *Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами: Материалы Второй Всероссийской конф. с междун. участием.* – Владивосток: Изд-во «Дальнаука», 2015. – С. 393–396.
22. Лепокурова О.Е. Содовые подземные воды юга Кузбасса: изотопно-химические особенности и условия формирования // *Геохимия.* – 2018. – № 9. – С. 904–919.
23. Покровский Д.С. К вопросу режима подземных вод Ерунаковского района Кузбасса // *Известия Томского политехнического института.* – 1967. – Т. 167. – С. 32–35.
24. Гидрогеология СССР. Т. XVII. Кемеровская область и Алтайский край / под ред. М.А. Кузнецова, О.В. Постникова. – М.: Недра, 1972. – 398 с.
25. Рогов Г.М. Гидрогеология и геоэкология Кузнецкого угольного бассейна. – Томск: Изд-во ТГАСУ, 2000. – 166 с.
26. Гидрогеология Ерунаковского района Кузбасса в связи с проблемой образования ресурсов и добычи угольного метана / С.Л. Шварцев, В.Т. Хрюкин, Е.В. Домрочева, К.И. Кузеванов, Н.М. Рассказов, Т.С. Попова, О.Е. Лепокурова, Е.В. Швачко // *Геология и геофизика.* – 2006. – Вып. 47. – № 7. – С. 878–889.
27. Домрочева Е.В., Лепокурова О.Е., Сизиков Д.А. Геохимическая характеристика подземных вод Нарыкско-Осташкинской площади (Кузбасс) // *Известия Томского политехнического университета.* – 2014. – Т. 325. – № 2. – С. 94–101.
28. Гидрогеологические условия Нарыкско-Осташкинской площади Ерунаковского района Кузбасса / Е.В. Домрочева, К.И. Кузеванов, А.Г. Гридасов, Д.А. Сизиков // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов.* – 2018. – Т. 329. – № 9. – С. 134–142.
29. Лепокурова О.Е., Домрочева Е.В. Гуминовые вещества в природных водах Нарыкско-Осташкинской площади (Кузбасс) // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов.* – 2020. – Т. 331. – № 3. – С. 197–206.
30. Лепокурова О.Е., Домрочева Е.В. Элементный состав природных вод и вмещающих отложений Кузбасса с оценкой водной миграции (на примере Нарыкско-Осташкинской площади) // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов.* – 2021. – Т. 332. – № 2. – С. 200–213.
31. Лепокурова О.Е., Трифонов Н.С., Домрочева Е.В. Миграционные формы основных ионов подземных вод угленосных отложений Кузбасса с акцентом на соединения с гумусовыми кислотами (по результатам моделирования) // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов.* – 2022. – Т. 333. – № 3. – С. 76–89.
32. Домрочева Е.В. Геохимия и формирование химического состава природных вод на территории Тутуянской площади (Кемеровская область) // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов.* – 2022. – Т. 333. – № 8. – С. 46–59.
33. Craig H. Isotopic variations in meteoric waters // *Science.* – 1961. – Vol. 133. – P. 1702–1703.
34. Изотопные исследования подземных вод на полигоне «Томский» / В.А. Поляков, В.Т. Дубинчук, Е.В. Голубкова, В.А. Лыготин, Ю.В. Макушин, К.М. Макарова // *Разведка и охрана недр.* – 2008. – Т. 11. – С. 47–52.
35. Hoefs J. Stable isotope geochemistry. – Berlin: Springer, 2004. – 244 p.
36. Clark I. Groundwater Geochemistry and Isotopes. – Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2015. – 456 p.
37. Hiscok K. Hydrogeology. Principles and Practice. – Malden, Oxford, Carlton: Blackwell Publishing, 2005. – 389 p.
38. Галимов Э.М. Геохимия стабильных изотопов углерода / под ред. А.П. Виноградова. – М.: Недра, 1968. – 226 с.
39. Романов В.В., Соيفер В.Н. Применение природного трития в гидрогеологических исследованиях // *Труды ВНИИЯГГ.* – 1968. – Вып. 4. – С. 289–304.

40. First radiocarbon measurements at binn AMS / S.A. Rastigeev, A.R. Frolov, A.D. Goncharov, V.F. Klyuev, S.G. Konstantinov, E.S. Konstantinov, L.A. Kutnykova, V.V. Parkhomchuk, M.V. Petrichenkov, A.V. Petrozhitskii // *Proceedings of RuPAC*. – 2010. – P. 1068–1072.
41. Исследование подземных вод в отдельных районах Карелии изотопно-геохимическими методами / И.В. Токарев, Г.С. Бородулина, Е.П. Каюкова, В.А. Поляков, Ю.В. Варнакова, С.В. Жданов, Т.В. Маркова // *Вестник Санкт-Петербургского университета*. – 2008. – Сер. 7. – Вып. 2. – С. 25–36.
42. Using stable isotopes to assess surface water source dynamics and hydrological connectivity in a high-latitude wetland and permafrost influenced landscape / P. Ala-Aho, C. Soulsby, O.S. Pokrovsky, S.N. Kirpotin, J. Karlsson, S. Serikova, S.N. Vorobyev, R.M. Manasypov, S. Loiko, D. Tetzlaff // *Journal of Hydrology*. – 2018. – Vol. 556. – P. 279–293.
43. Распределение стабильных изотопов Н, О и С в природных водах района Тазовского нефтегазоконденсатного месторождения (Ямало-Ненецкий автономный округ) / О.Е. Лепокурова, И.С. Иванова, А.Н. Пырьев, О.А. Исмагулов // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2024. – Т. 335. – № 2. – С. 157–169.
44. Transit time estimation of drying springs in Uttarakhand region using environmental tritium concentration / S. Chatterjee, V. Khatri, A.J. Kumar, V.M. Hemant, U.S. Kumar, J.P. Harish // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2023. – Vol. 11. – P. 266–267.
45. Тритий–гелий метод и его применение для датирования подземных вод (на примере Кировского горнопромышленного района, Мурманская область) / А.В. Гудков, И.Л. Каменский, Г.С. Мелихова, В.И. Скиба, И.В. Токарев, И.Н. Толстихин // *Геохимия*. – 2014. – № 7. – С. 646–653.
46. Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation // *Tellus XVI*. – 1964. – Vol. 16. – № 4. – P. 436–468.
47. An astronomically dated record of Earth's climate and its predictability over the last 66 million years / T. Westerhold, N. Marwan, A.J. Drury, D. Liebrand, C. Agnini, E. Anagnostou, J.S. Barnet, S.M. Bohaty, D. De Vleeschouwer, F. Florindo, T. Frederichs, D.A. Hodell, A.E. Holbourn, D. Kroon, V. Lauretano, K. Littler, L.J. Lourens, M. Lyle, H. Pälike, U. Röhl, J. Tian, R.H. Wilkens, P.A. Wilson, J.C. Zachos // *Science*. – 2020. – Vol. 369 (6509). – P. 1383–1387. DOI: 10.1126/science.aba6853.
48. Волкова В.С., Михайлова И.В. Природная обстановка и климат в эпоху последнего (Сартанского) оледенения Западной Сибири (по палинологическим данным) // *Геология и геофизика*. – 2001. – Вып. 4. – Т. 42. – С. 678–689.
49. Тимошина И.Д., Фомин А.Н., Конторович А.Э. Геохимия органического вещества бурых углей Барзасского месторождения Кузбасса // *Геология нефти и газа*. – 2024. – № 2. – С. 73–86.
50. Craig H. The geochemistry of the stable carbon isotopes // *Geochim. et cosmochim. Acta*. – 1953. – Vol. 3. – № 1. – P. 53–92.
51. Блохин М.Г., Арбузов С.И., Чекрызов И.Ю. Исследование изотопных отношений кислорода и водорода как показателей природных условий формирования каолинита тонштейнов, кор выветривания и аргиллизита // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2022. – Т. 333. – № 12. – С. 46–60.
52. Carothers W.W., Kharaka Y.K. Stable carbon isotopes of HCO_3^- in oil-field waters – implications for the origin of CO_2 // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1980. – Vol. 44. – № 2. – P. 323–332.
53. Methoxyl stable isotopic constraints on the origins and limits of coal-bed methane / M.K. Lloyd, E. Trembath-Reichert, K.S. Dawson, J. Feakins, M. Mastalerz, V.J. Orphan, L. Sessions, J.M. Eiler // *Science*. – 2021. – Vol. 374. – Iss. 6569. – № 11. – P. 894–897. DOI: 10.1126/science.abg0241.
54. Biogeochemical controls on methane generation: a review on Indian coal resources / T. Adsul, S. Ghosh, S. Kumar, B. Tiwari, S. Dutta, A.K. Varma // *Minerals*. – 2023. – Vol. 13. – P. 695–703. DOI: 10.3390/min13050695.
55. Geological control on carbon isotope equilibrium and kinetic fractionation of $\text{CH}_4\text{-CO}_2\text{-HCO}_3^-$ in microbial coalbed and shale gas systems / X. Chen, M. Tao, Z. Zhou, G. Holland, Y. Wang // *Chemical Geology*. – 2023. – Vol. 635. – 121609. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2023.121609.
56. Coexistence of psychrophilic, mesophilic, and thermophilic sulfate-reducing bacteria in a deep subsurface aquifer associated with coal-bed methane production / O.V. Karnachuk, I.A. Panova, I.I. Rusanov, L. Schetinina, O.Y. Lepokurova, E.V. Domrocheva, V.V. Kadnikov, M.R. Avakyan, A.P. Lukina, L.B. Glukhova, N.V. Pimenov, N.V. Ravin // *Microbial Ecology*. – 2023. – Vol. 86. – № 3. – P. 1–13. DOI: 10.1007/s00248-023-02196-9.
57. Ivanov M.V., Lein A.Yu. Fractionation of stable isotopes of carbon and sulfur during biological processes in the Black Sea // *Past and present water column anoxia*. Amsterdam: Springer. – 2006. – Vol. 64. – P. 373–417.

Информация об авторах

Олеся Евгеньевна Лепокурова, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник Томского филиала Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 4; профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; LepokurovaOY@ipgg.sbras.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0252-197X>

Евгения Витальевна Домрочева, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник Томского филиала Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 4. DomrochevaYV@ipgg.sbras.ru

Поступила в редакцию: 16.07.2024

Поступила после рецензирования: 06.09.2024

Принята к публикации: 10.09.2024

REFERENCES

1. Islamov D. Coalbed methane production: Kuzbass experience. *Neftegazovaya vertikal*, 2022, vol. 12. (In Russ.) Available at: https://ngv.ru/articles/dobycha-ugolnogo-metana-opyt-kuzbassa-/?sphrase_id=4547987 (accessed 10 July 2024).
2. Kudinov E.V. Commercial extraction of coalbed methane in Kuzbass as a method of reducing threats to the ecosystem. *Current problems of oil and gas*, 2018, vol. 4 (23). (In Russ.) DOI: 10.29222/ipng.2078-5712.2018-23.art84.
3. Karasevich A.M., Storonskii N.M., Khryukin V.T., Shvachko E.V. The main directions of the development strategy of OJSC Gazprom for the industrial production of methane from coal seams. *Spetsvyпуск zhurnala «Gazovaya promyshlennost» – Metan ugolnykh plastov*, 2012, no. 672, pp. 125–137. (In Russ.)
4. Brinck E.L., Drever J.I., Frost C.D. The geochemical evolution of water coproduced with coalbed natural gas in the Powder River Basin, Wyoming. *Environmental Geosciences*, 2008, vol. 15, no. 4, pp. 153–171. DOI: 10.1016/S1001-0742(10)60463-9.
5. Bates B.L., McIntosh J.C., Lohse K.A., Brooks P.D. Influence of groundwater flowpaths, residence times and nutrients on the extent of microbial methanogenesis in coal beds: Powder River Basin, USA. *Chem. Geol.*, 2011, vol. 284, pp. 45–61. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2011.02.004.
6. Pashin J.C., McIntyre-Redden M.R., Mann S.D., Kopaska-Merkel D.C., Varonka M., Orem W. Relationships between water and gas chemistry in mature coalbed methane reservoirs of the Black Warrior Basin. *Int J Coal Geol*, 2014, vol. 126, pp. 92–105. DOI: 10.1016/j.coal.2013.10.002.
7. Kinnon E., Golding S.D., Boreham C.J., Baublys K.A., Esterle J.S. Stable isotope and water quality analysis of coal bed methane production waters and gases from the Bowen Basin, Australia. *Int. J Coal Geol*, 2010, vol. 82, pp. 219–231. DOI: 10.1016/j.coal.2009.10.014.
8. Bao Y., Hao Y., Guo Z., Hu Y., Li J., Meng J., Wang F. Hydrogeochemical disparities and constraints of water produced from various oil seams in the Baode Block, Ordos Basin, China. *ACS Omega*, 2024, vol. 17, no. 9 (4), pp. 4905–4919. DOI: 10.1021/acsomega.3c08525. PMID: 38313488; PMCID: PMC10831859.
9. Yang L., Shuheng T., Chen J., Zhang S., Xi Z. Geochemical characteristics and development significances of constant and trace elements from coalbed methane co-produced water: a case study of the Shizhuangnan Block, the Southern Qinshui Basin. *Journal of Earth Science*, 2024, vol. 35 (1), pp. 51–61. DOI: 10.1007/s12583-022-1628-y.
10. Tu M., Xiaoming W., Hou S., Chen W., Dang Z. Identification of interwell interference based on hydrogeochemical characteristics of produced water from coalbed methane wells: a case study in the Southern Qinshui Basin, China. *SPE Journal*, 2024. DOI: 10.2118/219759-PA.
11. Mendhe V.A., Mishra S., Varma A.K. Coalbed methane-produced water quality and its management options in Raniganj Basin, West Bengal, India. *Appl. Water Sci.*, 2017, vol. 7, pp. 1359–1367. DOI: 10.1007/s13201-015-0326-7.
12. Van W.A. Geochemical signature of formation waters associated with coalbed methane. *AAPG Bulletin*, 2003, vol. 87, no. 4, pp. 667–676. DOI: 10.1306/10300201079.
13. Zhang Z., Yan D., Zhuang X. Hydrogeochemistry signatures of produced waters associated with coalbed methane production in the Southern Junggar Basin, NW China. *Environ Sci. Pollut. Res.*, 2019, vol. 26, pp. 31956–31980. DOI: 10.1007/s11356-019-06350-0.
14. Golding S.D., Boreham C.J., Esterle J.S. Stable isotope geochemistry of coal bed and shale gas and related production waters: a review. *International Journal of Coal Geology*, 2013, vol. 120, pp. 24–40. DOI: 10.1016/j.coal.2013.09.001.
15. Ghosh S., Golding S.D., Varma A.K., Baublys K.A. Stable isotopic composition of coal bed gas and associated formation water samples from Raniganj Basin, West Bengal, India. *International Journal of Coal Geology*, 2018, vol. 191, pp. 1–6.
16. Sepulveda-Castaneda V.M., Esterle J.S., Golding S.D., Gonzalez S. Isotopic and hydrogeochemical evidence for biogenic gas in Cuervos Formation coal beds, Cesar Rancheria Basin, Colombia. *International Journal of Coal Geology*, 2022, vol. 249 (4), pp. 103882. DOI: 10.1016/j.coal.2021.103882.
17. Chen X., Wang Y., Tao M., Zhou Z., He Z., Song K. Tracing the origin and formation mechanisms of coalbed gas from the Fuxin Basin in China using geochemical and isotopic signatures of the gas and coproduced water. *International journal of coal geology*, 2023, vol. 267, pp. 104185. DOI: 10.1016/j.coal.2023.104185.
18. Rice C.A., Flores R.M., Stricker G.D., Ellis M.S. Chemical and stable isotopic evidence for water/rock interaction and biogenic origin of coalbed methane, Fort Union Formation, Powder River Basin, Wyoming and Montana U.S.A. *International Journal of Coal Geology*, 2018, vol. 76, pp. 76–85. DOI: 10.1016/j.coal.2008.05.002.
19. Li Y., Tang S.H., Zhang S.H. Biogeochemistry and water-rock interactions of coalbed methane co-produced water in the Shizhuangnan Block of the Southern Qinshui Basin, China. *Water*, 2020, vol. 12 (1), pp. 130–148. DOI: 10.3390/w12010130.
20. Shvartsev S.L., Lepokurova O.E., Domrocheva E.V., Ponomarchuk V.A., Sizikov D.A. Anomalous composition of carbon isotopes in underground alkaline waters of Kuzbass. *Reports of the Academy of Sciences*, 2016, vol. 469, no. 6, pp. 724–728. (In Russ.)
21. Lepokurova O.E., Pyryaev A.N., Shvartsev S.L. Stable carbon isotopes of water-dissolved gases of coal-bearing deposits of the Narynsko-Ostashkinskaya area (Kuzbass). *Geological evolution of the interaction of water with rocks: Materials of the Second All-Russian Conference with international participation*. Vladivostok, Dalnauka Publ., 2015. pp. 393–396. (In Russ.)
22. Lepokurova O.E. Soda groundwater in the south of Kuzbass: isotope-chemical features and formation conditions. *Geochemistry*, 2018, no. 9, pp. 904–919. (In Russ.)
23. Pokrovskii D.S. On the issue of groundwater regime in the Yerunakovsky district of Kuzbass. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic Institute*, 1967, vol. 167, pp. 32–35. (In Russ.)
24. Postnikova O.V. *Hydrogeology of the USSR. Vol. XVII. Kemerovo region and Altai region*. Moscow, Nedra Publ., 1972. 398 p. (In Russ.)
25. Rogov G.M. *Hydrogeology and geoecology of the Kuznetsk coal basin*. Tomsk, TGASU Publ., 2000. 166 p. (In Russ.)
26. Shvartsev S.L., Khryukin V.T., Domrocheva E.V., Kuzevanov K.I., Rasskazov N.M., Popova T.S., Lepokurova O.E., Shvachko E.V. Hydrogeology and geoecology of the Kuznetsk coal basin. *Geology and Geophysics*, 2006, vol. 47, no. 7, pp. 878–889. (In Russ.)

27. Domrocheva E.V., Lepokurova O.E., Sizikov D.A. Geochemical characteristics of groundwater in the Naryksko-Ostashkinskaya area (Kuzbass). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 325, no. 2, pp. 94–101. (In Russ.)
28. Domrocheva E.V., Kuzevanov K.I., Gridasov A.G., Sizikov D.A. Hydrogeological conditions of the Naryksko-Ostashkinskaya area of the Yerunakovsky district of Kuzbass. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 9, pp. 134–142. (In Russ.)
29. Lepokurova O.E., Domrocheva E.V. Humic substances in natural waters of the Naryksko-Ostashkinskaya area (Kuzbass). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 3, pp. 197–206. (In Russ.)
30. Lepokurova O.E., Domrocheva E.V. Elemental composition of natural waters and host deposits of Kuzbass with assessment of water migration (on the example of Naryksko-Ostashkinskaya square). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 2, pp. 200–213. (In Russ.)
31. Lepokurova O.E., Trifonov N.S., Domrocheva E.V. Migration forms of the main ions of groundwater in coal-bearing sediments of Kuzbass with an emphasis on compounds with humic acids (based on modeling results). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 3, pp. 76–89. (In Russ.)
32. Domrocheva E.V. Geochemistry and formation of the chemical composition of natural waters on the territory of the Tutuyasskaya area (Kemerovo region). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 8, pp. 46–59. (In Russ.)
33. Craig H. Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 1961, vol. 133, pp. 1702–1703.
34. Polyakov V.A., Dubinchuk V.T., Golubkova E.V., Lgotin V.A., Makushin Yu.V., Makarova K.M. Isotope studies of groundwater at the Tomsky test site. *Razvedka i okhrana nedr*, 2008, vol. 11, pp. 47–52. (In Russ.)
35. Hoefs J. *Stable isotope geochemistry*. Berlin, Springer, 2004. 244 p.
36. Clark I. *Groundwater geochemistry and isotopes*. Boca Raton, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2015. 456 p.
37. Hiscock K. *Hydrogeology. Principles and practice*. Malden, Oxford, Carlton, Blackwell Publishing, 2005. 389 p.
38. Galimov E.M. *Geochemistry of stable carbon isotopes*. Moscow, Nedra Publ., 1968. 226 p. (In Russ.)
39. Romanov V.V., Soifer V.N. Application of natural tritium in hydrogeological research. *VNIYaGG*, 1968, vol. 4, pp. 289–304. (In Russ.)
40. Rastigeev S.A., Frolov A.R., Goncharov A.D., Klyuev V.F., Konstantinov S.G., Konstantinov E.S., Kutnykova L.A., Parkhomchuk V.V., Petrichenkov M.V., Petrozhitskii A.V. First radiocarbon measurements at BINP AMS. *Proceedings of RuPAC*, 2010. pp. 1068–1072. (In Russ.)
41. Tokarev I.V., Borodulina G.S., Kayukova E.P., Polyakov V.A., Varnakova Yu.V., Zhdanov S.V., Markova T.V. Study of groundwater in certain areas of Karelia using isotope-geochemical methods. *Bulletin of St. Petersburg University*, 2008, vol. 7, no. 2, pp. 25–36. (In Russ.)
42. Ala-Aho P., Soulsby C., Pokrovsky O.S., Kirpotin S.N., Karlsson J., Serikova S., Vorobyev S.N., Manasypov R.M., Loiko S., Tetzlaff D. Using stable isotopes to assess surface water source dynamics and hydrological connectivity in a high-latitude wetland and permafrost influenced landscape. *Journal of Hydrology*, 2018, vol. 556, pp. 279–293.
43. Lepokurova O.E., Ivanova I.S., Pyryaev A.N., Ismagulov O.A. Distribution of stable isotopes H, O and C in natural waters of the Tazovskoe oil and gas condensate field (Yamalo-Nenets Autonomous Okrug). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 2, pp. 157–169. (In Russ.)
44. Chatterjee S., Khati V., Kumar J.A., Hemant V.M., Kumar U.S., Harish J.P. Transit time estimation of drying springs in Uttarakhand region using environmental tritium concentration. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2023, vol. 11, pp. 266–267.
45. Gudkov A.V., Kamenskii I.L., Melikhova G.S., Skiba V.I., Tokarev I.V., Tolstikhin I.N. Tritium–helium method and its application for dating groundwater (on the example of the Kirov mining region, Murmansk region). *Geochemistry*, 2014, no. 7, pp. 646–653. (In Russ.)
46. Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation. *Tellus XVI*, 1964, vol. 16, no. 4, pp. 436–468.
47. Westerhold T., Marwan N., Drury A.J., Liebrand D., Agnini C., Anagnostou E., Barnett J.S., Bohaty S.M., De Vleeschouwer D., Florindo F., Fredericks T., Hodell D.A., Holbourn A.E., Kroon D., Lauretano V., Littler K., Lourens L.J., Lyle M., Pälike H., Röhl U., Tian J., Wilkens R.H., Wilson P.A., Zachos J.C. An astronomically dated record of Earth's climate and its predictability over the last 66 million years. *Science*, 2020, vol. 369 (6509), pp. 1383–1387. DOI: 10.1126/science.aba6853.
48. Volkova V.S., Mikhailova I.V. Natural situation and climate during the era of the last (Sartan) glaciation of Western Siberia (according to palynological data). *Geology and Geophysics*, 2001, vol. 4, no. 42, pp. 678–689. (In Russ.)
49. Timoshina I.D., Fomin A.N., Kontorovich A.E. Geochemistry of organic matter of brown coals of the Barzas deposit of Kuzbass. *Geology of oil and gas*, 2024, no. 2, pp. 73–86. (In Russ.)
50. Craig H. The geochemistry of the stable carbon isotopes. *Geochim. et cosmochim. Acta*, 1953, vol. 3, no. 1, pp. 53–92.
51. Blokhin M.G., Arbuzov S.I., Chekryzhov I.Yu. Study of isotope ratios of oxygen and hydrogen as indicators of the natural conditions for the formation of kaolinite, tonsteins, weathering crusts and argillite. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 12, pp. 46–60. (In Russ.)
52. Carothers W.W., Kharaka Y.K. Stable carbon isotopes of HCO_3^- in oil-field waters –implications for the origin of CO_2 . *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1980, vol. 44, no. 2, pp. 323–332.
53. Lloyd M.K., Trembath-Reichert E., Dawson K.S., Feakins J., Mastalerz M., Orphan V.J., Sessions L., Eiler J.M. Methoxyl stable isotopic constraints on the origins and limits of coal-bed methane. *Science*, 2021, vol. 374, Iss. 6569, no. 11, pp. 894–897. DOI: 10.1126/science.abg0241.
54. Adsul T., Ghosh S., Kumar S., Tiwari B., Dutta S., Varma A.K. Biogeochemical controls on methane generation: a review on Indian coal resources. *Minerals*, 2023, vol. 13, pp. 695–703. DOI:10.3390/min13050695.
55. Chen X., Tao M., Zhou Z., Holland G., Wang Y. Geological control on carbon isotope equilibrium and kinetic fractionation of $\text{CH}_4\text{-CO}_2\text{-HCO}_3^-$ in microbial coalbed and shale gas systems. *Chemical Geology*, 2023, vol. 635. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2023.121609.

56. Karnachuk O.V., Panova I.A., Rusanov I.I., Schetinina L., Lepokurova O.Y., Domrocheva E.V., Kadnikov V.V., Avakyan M.R., Lukina A.P., Glukhova L.B., Pimenov N.V., Ravin N.V. Coexistence of psychrophilic, mesophilic, and thermophilic sulfate-reducing bacteria in a deep subsurface aquifer associated with coal-bed methane production. *Microbial Ecology*, 2023, vol. 86, no. 3, pp. 1–13. DOI: 10.1007/s00248-023-02196-9.
57. Ivanov M.V., Lein A.Yu. Fractionation of stable isotopes of carbon and sulfur during biological processes in the Black Sea. *Past and present water column anoxia*, 2006, vol. 64, pp. 373–417.

Information about the authors

Olesya E. Lepokurova, Dr. Sc., Leading Researcher, Tomsk Branch of the Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of SB RAS, 4, Academicheskoy avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; LepokurovaOY@ipgg.sbras.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0252-197X>

Evgeniya V. Domrocheva, Cand. Sc., Senior Researcher, Tomsk Branch of the Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of SB RAS, 4, Academicheskoy avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation Tomsk, Russian Federation; DomrochevaYV@ipgg.sbras.ru

Received: 16.07.2024

Revised: 06.09.2024

Accepted: 10.09.2024

УДК 620.9.662.92.001.5

DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4498

Шифр специальности ВАК: 2.4.6

Теплотехника и химическая кинетика процесса торрефикации древесных пеллет

А.А. Валинеева✉, С.К. Попов

Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия, г. Москва

✉valineevaaa@mpei.ru

Аннотация. Актуальность. Широкое распространение и доступность биомассы в регионах России позволяют рассматривать ее как возобновляемый источник энергии с меньшим негативным воздействием на окружающую среду по сравнению с ископаемым топливом, поскольку биомасса признается углеродно-нейтральным топливом. Возрастают масштабы использования биомассы как топлива в виде пеллет, что обеспечивает повышенную плотность и теплоту сгорания. Вместе с тем пеллеты как топливо или как технологическое сырье имеют существенный недостаток – низкую гидрофобность. Указанная проблема решается посредством торрефикации – низкотемпературного пиролиза при температуре 200–300 °С с получением биоугля. Исследование процесса торрефикации древесных пеллет с целью его совершенствования является актуальной задачей. **Цель:** выявление влияния параметров торрефикации древесных пеллет на теплотехнические характеристики продукта (высшая теплота сгорания биоугля) и режимные параметры процесса (массовый и энергетический выходы), а также определение параметров химической кинетики низкотемпературного пиролиза как основы математического моделирования и разработки эффективных реакторов торрефикации. **Объект:** подвергаемые торрефикации древесные пеллеты хвойных пород отечественного производства (Московская область). **Методы:** экспериментальное исследование теплотехнических характеристик процесса низкотемпературного пиролиза; синхронный термический анализ в инертной среде. **Результаты.** Установлено, что при торрефикации древесных пеллет в инертной атмосфере изменение времени выдержки в интервале 30–60 минут несущественно влияет на высшую теплоту сгорания, массовый и энергетический выход биоугля, в то время как повышение температуры с 250 до 300 °С снижает массовый и энергетический выход, а высшая теплота сгорания возрастает на 26 %. Посредством синхронного термического анализа определены динамика потери массы и тепловые эффекты при нагреве до 600 °С со скоростью 10 К/мин. Установлено, что химическая кинетика процесса описывается обобщенной реакцией порядка $n=1,507$, в уравнении Аррениуса энергия активации $E=71,25$ кДж/моль, предэкспоненциальный множитель $A=4772$ с⁻¹.

Ключевые слова: биомасса, возобновляемые источники энергии, торрефикация, низкотемпературный пиролиз, методы анализа кинетики, термогравиметрия

Для цитирования: Валинеева А.А., Попов С.К. Теплотехника и химическая кинетика процесса торрефикации древесных пеллет // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 10. – С. 87–100. DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4498

UDC 620.9.662.92.001.5

DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4498

Thermal engineering and chemical kinetics of wood pellets torrefication

A.A. Valineeva✉, S.K. Popov

National Research University «MPEI», Moscow, Russian Federation

✉valineevaaa@mpei.ru

Abstract. Relevance. The widespread distribution and availability of biomass in the regions of Russian Federation make it possible to consider it as a renewable energy source with a lower negative impact on the environment compared to fossil fuels, since biomass is recognized as a carbon-neutral fuel. The use of biomass as a fuel in the form of pellets is increasing,

which provides increased density and heat value. At the same time, pellets as a fuel or as a technological raw material have a significant disadvantage – low hydrophobicity. This problem is solved by torrefaction – low-temperature pyrolysis at a temperature of 200–300°C to produce bio-carbon. The study of the wood pellets torrefaction in order to improve it is an urgent task. **Aim.** To identify the impact of the parameters of the torrefaction of wood pellets on the thermal characteristics of the product (the highest heat value of bio-coal) and the regime parameters of the process (mass and energy yields), as well as to determine the parameters of the chemical kinetics of low-temperature pyrolysis as the basis for mathematical modeling and development of efficient torrefaction reactors. **Object.** Torrefied coniferous wood pellets of domestic production (Moscow region). **Methods.** Experimental study of the low-temperature pyrolysis thermal characteristics; synchronous thermal analysis in an inert atmosphere. **Results.** It was found that during the torrefaction of wood pellets in an inert atmosphere, a change in the holding time in the range of 30–60 minutes does not significantly affect the higher heat value, mass and energy yield of bio-coal, while an increase in temperature from 250 to 300°C reduces mass and energy yield, and the higher heat value increases by 26%. The dynamics of mass loss and thermal effects when heated to 600°C at a rate of 10 K/min are determined by means of the synchronous thermal analysis. It is established that the chemical kinetics of the process is described by a generalized reaction of the order $n=1.507$, in the Arrhenius equation the activation energy $E=71.25$ kJ/mol, the pre-exponential factor $A=4772$ s⁻¹.

Keywords: biomass, renewable energy sources, torrefaction, low-temperature pyrolysis, methods of kinetic analysis, thermogravimetry

For citation: Valineeva A.A., Popov S.K. Thermal engineering and chemical kinetics of wood pellets torrefaction. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 10, pp. 87–100. DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4498

Введение

Доля возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в мировом топливно-энергетическом балансе постоянно растёт. В структуре установленной мощности ВИЭ по виду генерации на июль 2023 г. лидируют ветро- и солнечные электростанции, на которые приходится 2,5 и 2,2 ГВт мощности соответственно. Эксплуатируются электростанции, работающие на биомассе, биогазе, свалочном газе, энергии приливов и геотермальной энергии, совокупной мощностью более 100 МВт [1]. В России в период с 2007 по 2022 гг. введены и эксплуатируются станции на основе возобновляемых источников энергии общей установленной мощностью 23,47 МВт [2].

Биомасса признается углеродно-нейтральным топливом. Стабильный мировой рост использования биомассы для производства энергии наблюдается с 2010 г. и составляет 2,5 % в год [3]. В необработанном виде биомасса имеет сравнительно низкую теплоту сгорания, высокую влажность, большой удельный объем. Предварительно обработанная биомасса может быть использована в теплотехнологических и энергетических установках как дополнительное либо основное топливо.

Возрастают масштабы использования обработанной биомассы в виде пеллет, что обеспечивает повышенную плотность и теплоту сгорания. На европейском пеллетном рынке Россия уверенно удерживает третье место [4] с объемом производства на 2021 г. 2,37 млн т [5]. В настоящее время в России действует более 250 производителей пеллет, при этом объемы производства уверенно растут [4]. Вместе с тем пеллеты как топливо или как сырье для теплотехнологий, основанных на конверсии (пиролиз, газификация), имеют существен-

ный недостаток – низкую гидрофобность [6]. Указанная проблема решается посредством торрефикации – низкотемпературного пиролиза при температуре 200–300 °С. Торрефицированные пеллеты (биоуголь, торрефикат) приобретают низкую гигроскопичность, повышенную теплоту сгорания по сравнению с необработанными, а также высокую насыпную плотность и хорошую измельчаемость [6], что существенно повышает их конкурентоспособность на рынке. Исследование процесса торрефикации древесных пеллет с целью его совершенствования является актуальной задачей.

Важными теплотехническими и режимными характеристиками процесса торрефикации являются высшая теплота сгорания торрефиката, его массовый и энергетический выходы. Эти характеристики зависят от режимных параметров процесса – температурного уровня и длительности выдержки.

Изучение процесса торрефикации древесных пеллет проводилось рядом исследователей. В работе [7] образцы подвергались торрефикации в диапазоне температур 270–350 °С с выдержкой 60 минут в среде продуктов сгорания от газопоршневого двигателя. Установлено, что дальнейшая выдержка не является целесообразной, поскольку термодеструкция органической составляющей образцов существенно замедляется после достижения температуры торрефикации. В работе [8] хвойные пеллеты подвергались пиролизу в среде азота при температурах 230, 250 и 280 °С в течение одного, двух и трех часов, расход азота составлял от 5 до 10 л/ч. В исследовании не обнаружено заметного влияния расхода инертного газа на характеристики продуктов торрефикации. Авторы работы [9] показали, что проводить торрефикацию при температурах ниже 220 °С нерационально, поскольку состав дре-

весных брикетов не претерпевает существенных изменений, при этом время выдержки несущественно влияет на состав обработанных брикетов. При температуре процесса свыше 300 °С за счет резкого роста выхода СО и углеводородов существенно падает массовый и энергетический выход торрефиката [10].

Разработка эффективных реакторов торрефикации требует знания не только теплотехнических характеристик процесса, но и математического описания его химической кинетики. Математическая модель пиролиза древесных пеллет должна включать в себя совокупность уравнений скоростей химических реакций, для каждой из которых необходимо знать ее параметры: порядок реакции, предэкспоненциальный множитель в уравнении Аррениуса и энергию активации. Изучению указанных кинетических параметров пиролиза древесины посвящено значительное количество экспериментальных и расчетно-теоретических исследований.

В экспериментальном исследовании процессов пиролиза используются: термогравиметрический анализ (ТГА) [7, 11]; дифференциальный термогравиметрический анализ (ДТГА) [7, 11]; дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК) [7, 12, 13]; синхронный термический анализ (СТА), который совмещает ТГА и ДСК [7, 14]; инфракрасная спектроскопия [11]; масс-спектрометрия газовых смесей [15].

Разработан и применяется ряд методов анализа экспериментальных данных по кинетике пиролиза с целью получения кинетических параметров. К ним относятся метод Ozawa, Flynn, Wall (OFW, в русской литературе ОФУ) [16]; метод Kissinger-Akahira-Sunose (KAS) [17]; метод Фридмана (Friedman) [16]; метод Вязовкина [18], метод Broido [19], метод Coats-Redfern [20], метод ИГИ [21] и другие. Преимущества и недостатки некоторых упомянутых методов проанализированы в [21–23].

В работе [24] из обработки результатов ТГА и ДТГА определен порядок реакции пиролиза, предэкспоненциальный множитель и энергия активации для каждого из трех компонентов древесины: лигнина, целлюлозы и гемицеллюлозы. В [16] проведен кинетический анализ на основе ТГА разложения различных видов древесины (сосна, береза, ель) с использованием методов Фридмана и ОФУ. В [25] исследована кинетика пиролиза рисовой соломы. Для анализа результатов ТГА выбраны методы Киссинджера [26], ОФУ и KAS. Установлено, что значения кинетических параметров, полученные с помощью трех различных методов, хорошо согласуются.

В связи с развитием производства древесных пеллет в России представляет интерес исследова-

ние теплотехнических, режимных и кинетических характеристик торрефикации пеллет хвойных пород отечественного производства. Объектом исследования выбрана продукция предприятия в Московской области. Пеллеты цилиндрической формы диаметром 6 мм, длиной 20–50 мм, плотностью 1100 кг/м³. Высшая теплота сгорания, измеренная авторами, составляет 19,201 МДж/кг.

Данная работа посвящена исследованию влияния параметров торрефикации древесных пеллет на теплотехнические характеристики продукта (высшая теплота сгорания биоугля) и режимные параметры процесса (массовый и энергетический выход), а также определению параметров химической кинетики низкотемпературного пиролиза как основы математического моделирования и разработки эффективных реакторов торрефикации.

Экспериментальное исследование теплотехнических характеристик процесса торрефикации древесных пеллет

Экспериментальное исследование процесса торрефикации древесных пеллет выполнено на кафедре инновационных технологий наукоемких отраслей Национального исследовательского университета «МЭИ» в электропечи Nabatherm HT 08/17 в среде азота. Для измерения высшей теплоты сгорания использован калориметр IKA C 2000 с относительным стандартным отклонением (relative standart deviation – RSD) для динамического режима (1 г бензойной кислоты NBS 39i) RSD=0,1 %.

Исходя из обзора аналогичных работ, для экспериментального исследования выбраны уровни температуры торрефикации 250 и 300 °С, время выдержки 30 и 60 минут. Нагрев до выхода на режим проводился в течение 20 минут. Перед включением электропечи осуществлялась продувка азотом со скоростью 16 л/мин. В процессе нагрева и выдержки подачу азота уменьшали до 5 л/мин.

При каждом испытании пеллеты помещались в 4 тигля, фиксировалась масса каждой навески (диапазон – 6,865–7,150 г). Печь с загруженными тиглями выводилась на выбранный температурный уровень и выдерживалась заданное время. После охлаждения в азотной среде производилось повторное взвешивание на весах марки Масса-К ВК-150.1 с пределом допускаемой первичной погрешности ±0,005 г. Из тиглей последовательно бралось по три пробы торрефицированных пеллет, которые загружались в бомбовый калориметр для определения высшей теплоты сгорания. Всего было проведено 4 серии экспериментов, результаты которых представлены в табл. 1.

Массовый и энергетический выходы (соответственно *MY* и *EY*) определены согласно [6] по формулам

$$MY = \frac{m_{\text{top}}}{m_{\text{исх}}} 100; \quad EY = \frac{Q_{\text{в}}^{\text{top}}}{Q_{\text{в}}^{\text{исх}}}.$$

Здесь $m_{\text{исх}}$, m_{top} – масса образца до и после торрефикации; $Q_{\text{в}}^{\text{top}}$ – высшая теплота сгорания (HHV) торрефицированного образца; $Q_{\text{в}}^{\text{исх}}$ – высшая теплота сгорания исходного образца, равная 19,201 МДж/кг.

Таблица 1. Массовый выход (MY), энергетический выход (EY) и высшая теплота сгорания (HHV) для пеллет, подвергнутых торрефикации

Table 1. Mass yield (MY), energy yield (EY) and higher heating value (HHV) for pellets subjected to torrefaction

Температура Temperature, °C	Параметр Parameter	250			Параметр Parameter	300		
		Среднее по тиглам 1–2 Average for crucibles 1–2	Среднее по тиглам 3–4 Average for crucibles 3–4			Среднее по тиглам 1–2 Average for crucibles 1–2	Среднее по тиглам 3–4 Average for crucibles 3–4	
30 минут 30 minutes	MY	59,04	54,30		MY	35,71	33,47	
	EY	73,43	66,54		EY	50,35	47,58	
	HHV	23,88	23,53		HHV	27,07	27,30	
60 минут 60 minutes	MY	59,79	56,30		MY	36,65	31,57	
	EY	70,42	72,07		EY	52,07	43,99	
	HHV	22,62	24,58		HHV	27,28	26,76	

По результатам экспериментов построены графики зависимостей высшей теплоты сгорания, массового и энергетического выхода от температуры торрефикации для двух вариантов времени выдержки (рис. 1).

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что изменение времени выдержки в интервале 30–60 минут несущественно влияет на

высшую теплоту сгорания, массовый и энергетический выход, в то время как повышение температуры с 250 до 300 °C снижает массовый выход с 59 до 32 %, энергетический выход с 73 до 50 %, а высшая теплота сгорания возрастает с 22,6 до 27,3 МДж/кг, то есть на 26 %.

Представленные результаты соответствуют опубликованным данным других авторов. Например, в работах [10, 27] установлено, что влияние времени выдержки менее выражено, чем влияние температуры. В [27] показано, что массовый выход снижается с 73,76 до 41,08 % при одинаковой скорости нагрева, теплота сгорания при температуре выдержки 300 °C возрастает до 28 МДж/кг. Расхождение объясняется иным типом древесной биомассы, использованной в экспериментах, но тенденции аналогичны.

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что для исследованных пеллет рациональными режимными параметрами являются температура торрефикации 300 °C, длительность процесса торрефикации 30 минут.

Выбор температурного уровня торрефикации 300 °C как рационального основан на том, что:

- для рядового потребителя биоугля определяющей характеристикой является его теплота сгорания;
- при выбранном температурном уровне характеристики торрефицированных пеллет приближаются к ископаемому углю, что позволяет сжигать их совместно без модификации оборудования на действующих станциях. Подобной практики придерживается компания Henan Sinovo Machinery Engineering Co., Ltd (SIMEC), которая производит линии торрефикации и считает, что оптимальный температурный уровень процесса – 275–300 °C [28].

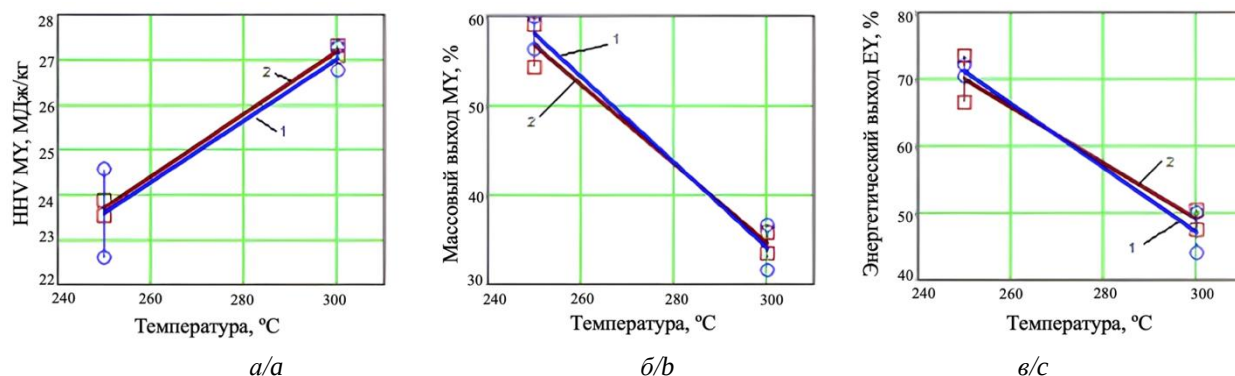


Рис. 1. Зависимость высшей теплоты сгорания (а), массового выхода (б) и энергетического выхода (в) от температуры и времени выдержки: 1 – 60 минут; 2 – 30 минут

Fig. 1. Dependence of the higher heating value (a), mass yield (b) and energy yield (c) on the temperature and holding time: 1 – 60 min; 2 – 30 min

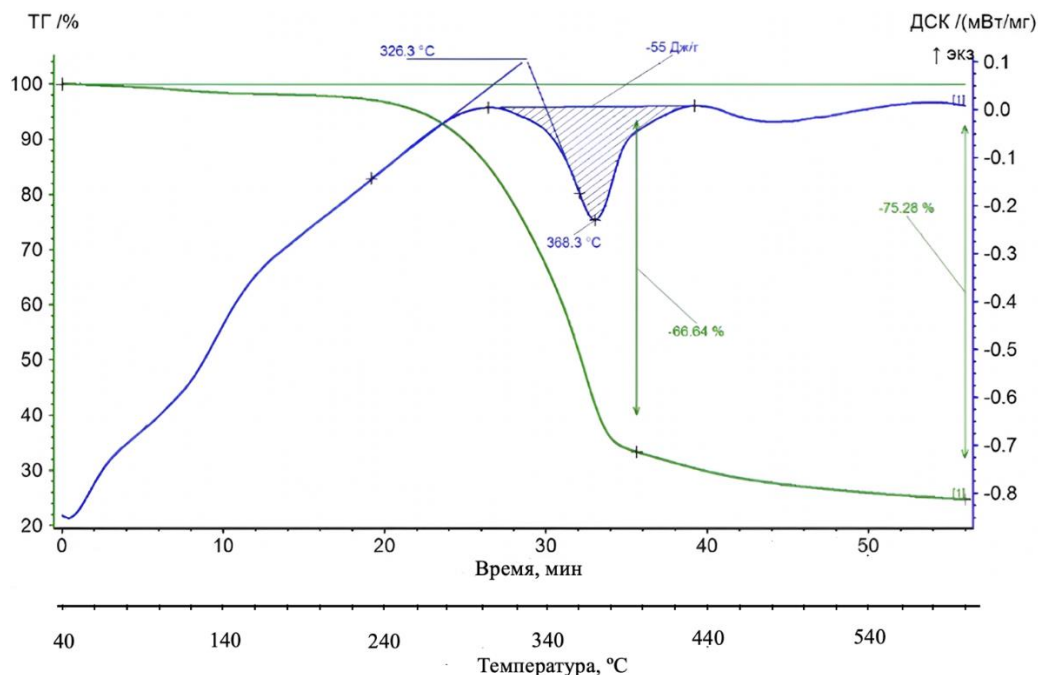


Рис. 2. Термограмма образца сосновой пеллеты

Fig. 2. Thermogram of a pine pellet sample

Экспериментальное исследование кинетики процесса низкотемпературного пиролиза

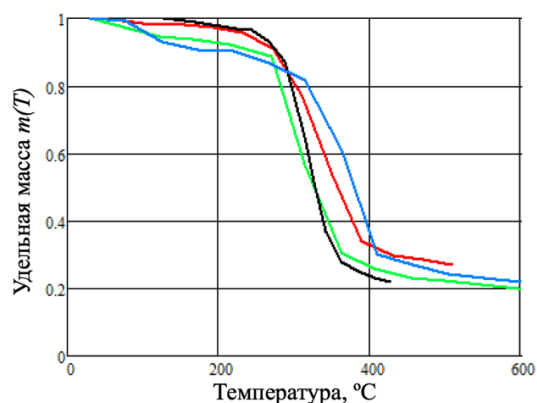
Экспериментальное исследование кинетики проведено на установке синхронного термического анализа NETZCH STA 409F1 Jupiter с относительной погрешностью измерения: для температуры $\pm 1,5$ %, для удельной теплоты ± 3 %, для массы ± 1 %.

Образец сосновой пеллеты исследован методом СТА в среде азота. Испытания проведены в интервале температур от 20 до 600 °C со скоростью нагрева 10 К/мин, масса навески 15,03 мг. Навеска бралась из предварительно измельченной и перемешанной массы образца. Полученные результаты ТГА и ДСК представлены на рис. 2.

Поведение кривой ТГА исследованного образца имеет типичный характер для древесной биомассы. Полученные результаты сопоставимы с данными российских и зарубежных ученых [7, 10, 29] (рис. 3). Для кривых ТГА на рис. 3 характерно резкое снижение массы после достижения 300 °C.

Согласно данным [30], скорость процесса разложения гемицеллюлозы имеет максимум при температурах 200–260 °C, процесс разложения целлюлозы протекает при 240–350 °C, а лигнина – при 200–540 °C [7]. На кривой ТГА, полученной в эксперименте (рис. 2), на уровне 360 °C завершается резкая потеря массы в связи, предположительно, с практически полным завершением первых двух реакций и продолжается частичное разложение лигнина. Это согласуется с данными [6], где говорится о том, что удельный вес двух составляющих

биомассы – гемицеллюлозы и целлюлозы – более 65 %. По итогам эксперимента образец потерял 75,28 % массы, что также согласуется с вышеприведенными исследованиями.



— эксперимент/experiment;
— [7]; — [31]; — [29]

Рис. 3. Сопоставление термограмм образцов древесины

Fig. 3. Comparison of thermograms of wood samples

Согласно данным ДСК, результирующий тепловой эффект, наблюдающийся в области температуры 326,3 °C и выше, является эндотермическим и составляет 55 кДж/кг.

Полученные результаты ТГА использованы для определения параметров химической кинетики процесса торрефикации.

Методика определения параметров уравнения Аррениуса на основе данных термогравиметрического анализа процесса пиролиза древесных пеллет

Принимаем, что процесс пиролиза описывается уравнением химической реакции первого порядка

$$\frac{da}{d\tau} = k(1-a); \quad k = A \exp\left(-\frac{E}{R_u T}\right), \quad (1)$$

где $a = \frac{w_0 - w}{w_0 - w_\infty}$ – степень конверсии, т. е. массовая

доля вещества частицы, подвергшегося пиролизу; k – константа скорости, описываемая уравнением Аррениуса, с^{-1} ; A – предэкспоненциальный множитель, с^{-1} ; E – энергия активации, Дж/моль; R_u – универсальная газовая постоянная, Дж/моль/К; T – температура, К; τ – время, с; w_0, w_∞ – начальная и конечная масса вещества, подвергаемого пиролизу; w – текущее значение массы в момент τ .

Для реакции n -го порядка скорость реакции пиролиза

$$\frac{da}{d\tau} = k(1-a)^n. \quad (2)$$

Параметры уравнения Аррениуса A и E могут быть найдены обработкой результатов ТГА [21, 24, 32, 33].

Первоначально рассмотрим способ определения параметров A и E для реакции пиролиза древесных пеллет на основе данных ТГА в предположении, что реакция первого порядка, т. е. подчиняется уравнению (1).

В период выполнения ТГА скорость подъема температуры неизменна и равна Φ , К/с:

$$\frac{dT}{d\tau} = \Phi. \quad (3)$$

Подставив (3) в (1), получаем

$$\begin{aligned} \frac{da}{dT} \frac{dT}{d\tau} &= A \exp\left(-\frac{E}{R_u T}\right) (1-a); \\ \frac{da}{dT} &= \frac{A}{\Phi} \exp\left(-\frac{E}{R_u T}\right) (1-a); \\ \frac{da}{1-a} &= \frac{A}{\Phi} \exp\left(-\frac{E}{R_u T}\right) dT. \end{aligned} \quad (4)$$

Интегрируя обе части уравнения, получаем

$$\int_{a_0}^a \frac{da}{1-a} = \frac{A}{\Phi} \int_{T_0}^T \exp\left(-\frac{E}{R_u T}\right) dT. \quad (5)$$

Интеграл левой части уравнения (5)

$$\begin{aligned} I_{left} &= \int_{a_0}^a \frac{da}{1-a} = -\ln(1-a) \Big|_{a_0}^a = \\ &= -\ln(1-a) + \ln(1-a_0). \end{aligned} \quad (6)$$

В начале процесса пиролиза при проведении ТГА можно принять $a_0=0$, поэтому $\ln(1-a_0)=0$ и выражение (6) приводится к виду

$$I_{left} = \int_{a_0}^a \frac{da}{1-a} = -\ln(1-a). \quad (7)$$

Рассмотрим интеграл в правой части уравнения (5)

$$I_{right} = \frac{A}{\Phi} \int_{T_0}^T \exp\left(-\frac{E}{R_u T}\right) dT. \quad (8)$$

Согласно [34], введем переменную $x = -\frac{E}{R_u T}$ и подставим ее в (8). Получаем

$$\begin{aligned} I_{right} &= \frac{A}{\Phi} \int_{T_0}^T \exp\left(-\frac{E}{R_u T}\right) dT = \\ &= \frac{AE}{\Phi R_u} \int_{T_0}^T \exp\left(-\frac{E}{R_u T}\right) d\left(\frac{R_u T}{E}\right); \\ I_{right} &= \frac{AE}{\Phi R_u} \int_{T_0}^T e^x d\left(-\frac{1}{x}\right). \end{aligned} \quad (9)$$

Если T_0 ниже температуры, при которой скорость реакции становится измеряемой (заметно отличной от нуля), то нижним пределом температурного интеграла можно пренебречь [34].

Применяя интегрирование по частям ($\int u dv = uv - \int v du$) к I_{right} в (9), получаем

$$\begin{aligned} u &= e^x; \quad v = -\frac{1}{x}; \quad du = e^x dx; \\ I_{right} &= \frac{AE}{\Phi R_u} \left(-\frac{e^x}{x} + \int_{-\infty}^x \frac{e^x}{x} dx \right) = \frac{AE}{\Phi R_u} p(x). \end{aligned} \quad (10)$$

Функция $p(x)$, содержащая экспоненциальный интеграл, не может быть проинтегрирована в конечном виде. Doyle [35] впервые обнаружил приблизительную линейность логарифма этой функции и предложил аппроксимационное выражение

$$\ln p(x) \approx -5,3305 + 1,052x \quad (-60 < x < -20). \quad (11)$$

Это уравнение, на котором Ozawa, Flynn и Wall основывают метод определения энергии активации. В отечественной литературе он называется методом ОФУ (Озава–Флинн–Уолл). Из (10) и (11) следует

$$\begin{aligned}\ln I_{right} &= \ln \frac{AE}{\Phi R_u} + \ln p(x) = \\ &= \ln \frac{AE}{\Phi R_u} - 5,3305 + 1,052x = \\ &= \ln \frac{AE}{\Phi R_u} - 5,3305 + 1,052 \left(-\frac{E}{R_u T} \right) = \\ &= \ln \frac{AE}{\Phi R_u} - 5,3305 - 1,052 \frac{E}{R_u T}.\end{aligned}\quad (12)$$

Представив уравнение (5) в виде $\ln I_{left} = \ln I_{right}$, с учетом (7) и (12) получаем

$$\ln(-\ln(1-a)) = \ln \frac{AE}{\Phi R_u} - 5,3305 - 1,052 \frac{E}{R_u T}.$$

Обозначим

$$\begin{aligned}X &= \frac{1}{T}; \quad Y = \ln(-\ln(1-a)), \\ a_1 &= -1,052 \frac{E}{R_u}; \quad b_1 = \ln \frac{AE}{\Phi R_u} - 5,3305.\end{aligned}\quad (13)$$

В таком случае выражение (12) приобретает вид линейной функции

$$Y = a_1 X + b_1, \quad (14)$$

коэффициенты которой a_1 и b_1 могут быть найдены методом наименьших квадратов. После этого на основе уравнений (13) рассчитываются искомые величины A и E .

Степень конверсии (степень пиролизованности) a изменяется от 0 до 1 и рассчитывается по формуле

$$a = \frac{1 - m(\tau)}{1 - m_\infty}, \quad (15)$$

где $m(\tau)$ – удельная остаточная масса (отношение текущей массы к начальной) пиролизуемой частицы в текущий момент τ , m_∞ – удельная остаточная масса пиролизуемой частицы при бесконечно большой длительности процесса. Величина m_∞ характеризует зольность материала частицы и количество непрореагировавшего углерода, оставшегося в твердой массе частицы. Из (15) следует, что

$$m(\tau) = 1 - a(1 - m_\infty). \quad (16)$$

Результат ТГА иллюстрируется графиком, отображающим зависимость $m(\tau)$ либо температурную зависимость $m(T)$, связь между которыми устанавливается условием (3) постоянства Φ – скорости подъема температуры.

Результаты ТГА процесса пиролиза древесины в инертной среде с $\Phi = 5$ К/мин [29] представлены на рис. 4. Согласно [29], при условии, что уравнение

химической реакции пиролиза первого порядка, для этого процесса получено:

$$A = 2980 \text{ с}^{-1}, E = 73,10 \text{ кДж/моль } (n = 1). \quad (17)$$

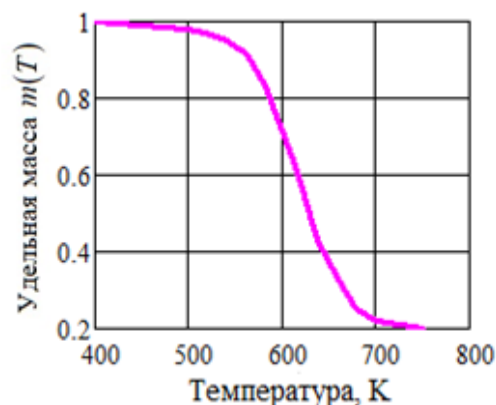


Рис. 4. График ТГА [29]

Fig. 4. TGA plot [29]

Положим, что значения параметров A и E уравнения Аррениуса тем или иным методом найдены. Возникает вопрос: как оценить достоверность полученных значений?

В данной работе используется следующий подход:

- 1) зная параметры A и E , рассчитывается $m_{расч}(T)$ – температурная зависимость удельной массы пиролизуемой частицы;
- 2) достоверность найденных параметров A и E оценивается на основе сопоставления расчетной зависимости $m_{расч}(T)$ с результатами ТГА – экспериментальной зависимостью $m(T)$.

С целью установления зависимости $m_{расч}(T)$ подставим в интегральное уравнение $I_{left} = I_{right}$ выражения из (7) и (8). Получаем

$$\ln(1-a) = -\frac{A}{\Phi} \int_{T_0}^T \exp\left(-\frac{E}{R_u T}\right) dT,$$

откуда с учетом (16) следует

$$\begin{aligned}a &= a(T) = 1 - \exp\left(-\frac{A}{\Phi} \int_{T_0}^T \exp\left(-\frac{E}{R_u T}\right) dT\right); \\ m_{расч}(T) &= 1 - a(T)(1 - m_\infty).\end{aligned}$$

Реализация методов обработки данных ТГА и сопоставительный анализ результатов Метод ОФУ

Программная реализация метода ОФУ для данных ТГА [29], показанных на рис. 4, выполнена в среде Mathcad. Зависимость (14) $Y=f(X)$ и результаты ее линейной аппроксимации представлены на рис. 5.

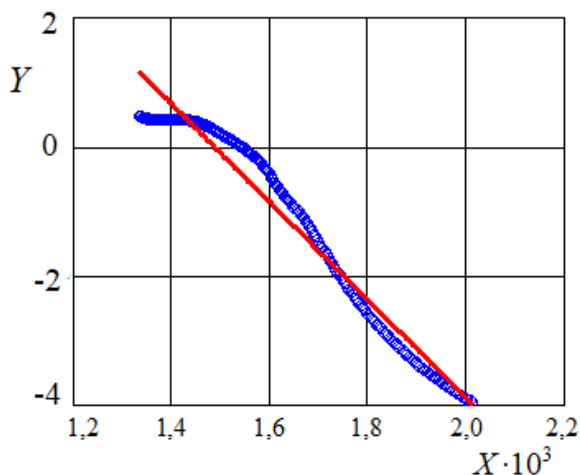


Рис. 5. Зависимость (14) $Y=f(X)$ (синяя линия) и ее линейная аппроксимация (красная линия)

Fig. 5. Dependence (14) $Y=f(X)$ (blue line) and its linear approximation (red line)

Методом наименьших квадратов получено, что $a_1 = -7,593 \cdot 10^3$, $b_1 = 11,299$, соответственно

$$A = 192,6 \text{ с}^{-1}, E = 60,01 \text{ кДж/моль } (n = 1). \quad (18)$$

На рис. 6 проиллюстрированы результаты сопоставления расчетных кривых ТГА с экспериментом.

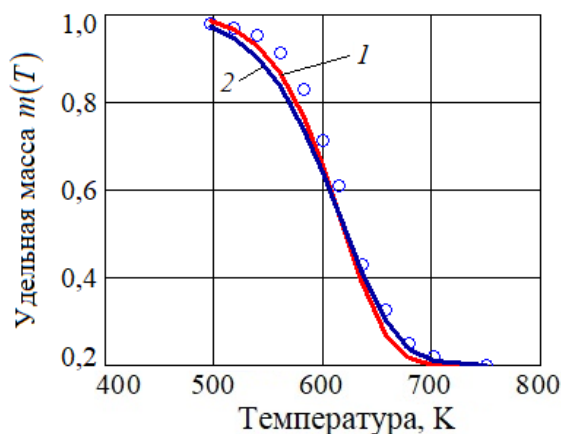


Рис. 6. Температурные зависимости удельной массы пиролизующей частицы для условий ТГА [29]: 1 – расчетная зависимость $m_{\text{расч}}(T)$ с параметрами A и E (17) [29]; 2 – расчетная зависимость $m_{\text{расч}}(T)$ с параметрами A и E (18), полученными методом ОФУ; кружки – экспериментальные точки, снятые с кривой ТГА (рис. 4)

Fig. 6. Temperature dependences of the specific mass of the pyrolyzed particle for the conditions of TGA [29]: 1 – calculated dependence $m_{\text{calct}}(T)$ with parameters A and E (17) [29]; 2 – calculated dependence $m_{\text{calct}}(T)$ with the parameters A and E (18) obtained by the OFW method; hollow points are experimental points taken from the TGA curve (Fig. 4)

Анализ представленных результатов приводит к следующим выводам:

- 1) расчетная зависимость $m_{\text{расч}}(T)$ с параметрами A и E [29] (кривая 1) не полностью совпадает с экспериментальными данными из того же источника, но достаточно к ним близка: средне-квадратичное отклонение $\text{СКО} = 0,044$;
- 2) аналогичная расчетная зависимость, но с параметрами A и E (18), полученными методом ОФУ (кривая 2), характеризуется ненамного большей величиной $\text{СКО} = 0,051$;
- 3) различия между совокупностью параметров A и E , опубликованной в [29] и приведенной в (17) с одной стороны, и полученной выше методом ОФУ в данной работе (18) с другой стороны, могут объясняться тем, что для определения A и E в [29] использован не метод ОФУ, а иной метод;
- 4) коэффициент детерминации [36] между кривыми 1 и 2 составляет $R^2 = 0,999$, то есть близок к 1,0. На этом основании можно сделать вывод, что выполненная реализация метода ОФУ дает результаты, близкие к данным других авторов.

Метод ИГИ

В работе [21], посвященной 70-летию образования Института горючих ископаемых (ИГИ), изложен иной, отличный от ОФУ, метод получения кинетических параметров термического разложения по результатам ТГА. В данном исследовании этот метод сокращенно назван методом ИГИ. Он распространяется на процессы, описываемые как реакциями первого порядка (1), так и реакциями с порядком, отличным от 1 (2).

В работе [24] с использованием метода ИГИ исследована кинетика пиролиза древесины сосны, получены параметры уравнения Аррениуса для компонентов, составляющих древесину, – целлюлозы, гемицеллюлозы и лигнина (табл. 2). Для каждого компонента принято, что реакция пиролиза – n -го порядка, т. е. описывается уравнением (2).

Таблица 2. Кинетические параметры процесса пиролиза компонентов древесины сосны

Table 2. Kinetic parameters of the pyrolysis of pine wood components

Компонент Component	Гемицеллюлоза Hemicellulose	Целлюлоза Cellulose	Лигнин Lignin
Предэкспоненциальный множитель $\ln A$ Pre-exponential factor $\ln A$	16,56	49,08	0,001
Энергия активации E , кДж/моль Activation energy E , kJ/mol	122,9	299,6	69,25
Порядок реакции n Reaction order n	2,21	1,001	2,864

Согласно методу ИГИ, для реакции пиролиза i -го компонента текущая концентрация компонента описывается уравнением

$$C_i = \exp \left(\frac{1}{1-n_i} \ln \left(1 - \frac{A_i E_i (1-n_i) (1-\Pi(x))}{\Phi R x^2 \exp(x)} \right) \right), \quad (19)$$

где $x=E_i/(RT)$; A_i – предэкспоненциальный множитель в уравнении Аррениуса, с^{-1} ; E_i – энергия активации, Дж/моль; $n_i > 1$ – порядок реакции; $\Pi(x)$ – регрессионная зависимость с коэффициентом детерминации $R^2=0,99995$:

$$\Pi(x) = 0,0096 + 1,576/x - 0,9896/x^2.$$

Уравнение (19) описывает изменение величины C_i от 1 до 0 с ростом температуры.

В применении к задаче, рассматриваемой в данной работе (однокомпонентный материал), концентрация C в уравнении (19) – это удельная остаточная масса $m_{\text{расч}}$. Для случая, когда $m_{\text{расч}}$ изменяется от 1 до m_∞ , адаптированная формула (19) приобретает вид

$$m_{\text{расч}}(T) = \exp \times \left(\frac{1}{1-n} \ln \left(1 - \frac{AE(1-n)(1-\Pi(x))}{\Phi R x^2 \exp(x)} \right) \right) \times (1-m_\infty) + m_\infty. \quad (20)$$

Согласно методу ИГИ, в [21] для определения n , A , E наряду с ТГА используются координаты точек перегиба на кривой ДТГА. В данной работе используется модифицированный метод ИГИ, основанный на использовании только кривой ТГА.

Методом наименьших квадратов средствами среды Mathcad выполнен поиск параметров n , A , E , обеспечивающих минимум дисперсии

$$s^2 = \frac{1}{k-1} \sum_{j=1}^k \left(m_{\text{расч}}(T_j) - m_{\text{экс}}(T_j) \right)^2,$$

где k – количество точек, снятых с кривой ТГА, представленной в [29]; $m_{\text{экс}}(T_j)$ – ордината j -й точки на кривой ТГА; $m_{\text{расч}}(T_j)$ – удельная остаточная масса, рассчитанная по формуле (20). Получены следующие результаты:

$$n = 1,121; A = 5375 \text{ с}^{-1} (\ln A = 8,589);$$

$$E = 76,89 \text{ кДж/моль}. \quad (21)$$

Проанализируем, ожидаемы ли существенные расхождения результатов применения методов ОФУ и ИГИ. Согласно (2), для реакции n -го порядка скорость реакции пиролиза

$$\frac{da}{dt} = k(1-a)^n.$$

Выполняя с данным уравнением преобразования, аналогичные изложенным выше, и интегрируя обе части уравнения, получаем

$$\int_{a_0}^a \frac{da}{(1-a)^n} = \frac{A}{\Phi} \int_{T_0}^T \exp \left(-\frac{E}{R_u T} \right) dT. \quad (22)$$

Интеграл левой части уравнения (22) с учетом того, что $a_0=0$,

$$I_{\text{left}} = \int_{a_0}^a \frac{da}{(1-a)^n} = \frac{(1-a)^{1-n} - 1}{n-1}.$$

Интеграл в правой части уравнения (22)

$$I_{\text{right}} = \frac{A}{\Phi} \int_{T_0}^T \exp \left(-\frac{E}{R_u T} \right) dT$$

такой же, как в правой части уравнения (4). В работе [35] с использованием аппроксимационного выражения

$$\ln p(x) \approx -5,3305 + 1,052x; \quad x = -\frac{E}{R_u T}; \quad -60 < x < -20$$

получено

$$I_{\text{right}} = \frac{AE}{\Phi R_u} p(x),$$

что и используется в методе ОФУ.

Анализ уравнения (19), взятого из работы [21], приводит к выводу, что для вычисления этого же интеграла в методе ИГИ используется формула с иной аппроксимационной функцией $\Pi(\tilde{x})$:

$$I_{\text{right}} = \frac{AE}{\Phi R_u} \frac{1 - \Pi(\tilde{x})}{\tilde{x}^2 e^{\tilde{x}}};$$

$$\Pi(\tilde{x}) = 0,0096 + 1,576/\tilde{x} - 0,9896/\tilde{x}^2,$$

$$\tilde{x} = \frac{E}{R_u T}, \quad 1 \leq \tilde{x} \leq 80.$$

Несложно заметить, что переменные x и $\tilde{x}$ различаются только знаком.

Целесообразно оценить, насколько разнятся два подхода к вычислению одной и той же величины. Для этого следует сопоставить две функции $Z_1(y)$ и $Z_2(y)$, определяемые следующим образом:

$$Z_1(y) = \ln p(y) = -5,3305 + 1,052y;$$

$$Z_2(y) = \ln \frac{1 - \Pi(y)}{y^2 e^{-y}};$$

$$\Pi(y) = 0,0096 - 1,576/y - 0,9896/y^2;$$

$$y = -\frac{E}{R_u T}; \quad -80 \leq y \leq -1.$$

Расчет показывает, что функции $Z_1(y)$ и $Z_2(y)$ практически совпадают на отрезке $y \in [-80, -1]$. Следовательно, применение методов ОФУ и ИГИ должно приводить к одинаково достоверным результатам.

Сопоставительный анализ результатов применения методов

Температурные зависимости константы скорости, вычисленные с использованием кинетических параметров (17) из [29] и найденных выше (21), практически совпадают.

На рис. 7 проиллюстрировано сопоставление экспериментальных данных и расчетных кривых ТГА, полученных различными методами.

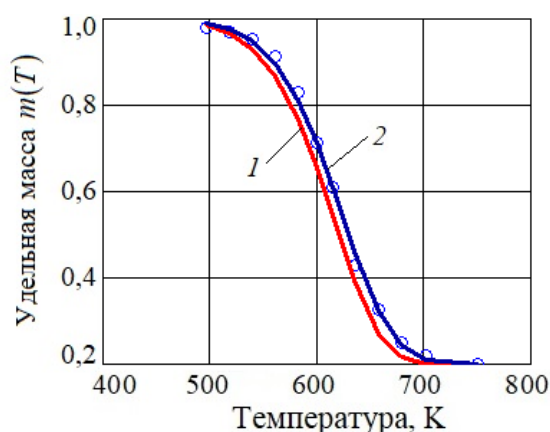


Рис. 7. Температурные зависимости удельной массы пиролизующей частицы по данным ТГА [29]: 1 – расчетная зависимость $m_{расч}(T)$ с параметрами A и E (17) [29]; 2 – расчетная зависимость $m_{расч}(T)$ с параметрами A и E (21), полученными по методу ИГИ; кружки – экспериментальные точки, снятые с кривой ТГА (рис. 4)

Fig. 7. Temperature dependences of the specific mass of the pyrolyzed particle according to TGA data [29]: 1 – calculated dependence $m_{calct}(T)$ with parameters A and E (17) [29]; 2 – calculated dependence $m_{calct}(T)$ with the parameters A and E (21) obtained by the IGI method; hollow points are experimental points taken from the TGA curve (Fig. 4)

Модифицированный метод ИГИ дает значения кинетических параметров, обеспечивающие наилучшее воспроизведение экспериментальных данных. Это подтверждается количественными характеристиками: для кривой 2 СКО=0,011 (в 4 раза меньше, чем для кривой 1). На этом основании предпочтение в выборе методов обработки данных ТГА отдается методу ИГИ [21]. Результаты применения модифицированного метода ИГИ к обработке полученных авторами экспериментальных данных изложены далее.

Результаты обработки экспериментальных данных термогравиметрического анализа

Методика поиска кинетических параметров n , A , E по методу ИГИ применена в обработке данных ТГА пиролиза древесных пеллет (рис. 2). Получены следующие результаты:

$$n = 1,507; A = 4772 \text{ с}^{-1} (\ln A = 8,47); \\ E = 71,25 \text{ кДж/моль.} \quad (23)$$

Как следует из анализа рис. 8, найденные значения кинетических параметров обеспечивают адекватное воспроизведение опытных данных, что подтверждается низким уровнем СКО: 0,016, при этом коэффициент детерминации $R^2=0,999$.

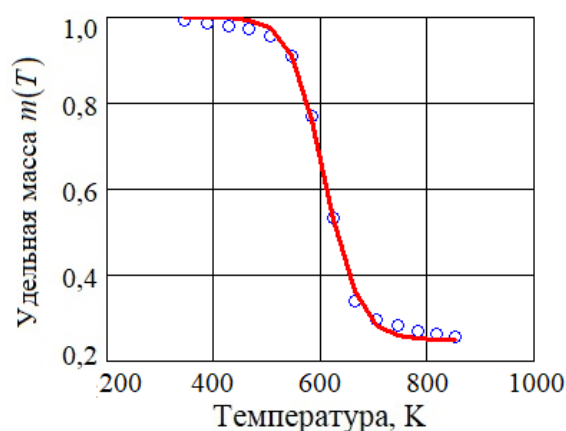


Рис. 8. Температурные зависимости удельной массы пиролизующей пеллеты по данным ТГА, полученным авторами: кривая – расчетная зависимость с параметрами A и E (23); кружки – экспериментальные точки, снятые с кривой ТГА (рис. 2)

Fig. 8. Temperature dependences of the specific gravity of the pyrolyzed pellet according to the TGA data obtained by the authors: the curve is a calculated dependence with the parameters A and E (23); hollow points are experimental points taken from the TGA curve (Fig. 2)

Из сравнения с данными табл. 2 следует, что найденные значения $E=71,25$ кДж/моль и $\ln A=8,47$ лежат в диапазонах соответствующих величин для гемицеллюлозы и лигнина, а порядок реакции $n=1,507$ – в диапазоне данной величины для целлюлозы и гемицеллюлозы. Таким образом, полученные результаты согласуются с данными других авторов.

Заключение

По итогам проведенных исследований получены следующие результаты:

1. Проведено экспериментальное исследование теплотехнических и кинетических характери-

стик процесса торрефикации древесных пеллет. Полученный массовый и энергетический выход, высшая теплота сгорания и характер кривой ТГА согласуются с исследованиями других авторов. Изменение времени выдержки в интервале 30–60 минут несущественно влияет на массовый и энергетический выход и высшую теплоту сгорания, в то время как повышение температуры с 250 до 300 °С снижает массовый выход с 59 до 32 %, энергетический выход с 73 до 50 %, а высшая теплота сгорания возрастает с 22,6 до 27,3 МДж/кг, то есть на 26 %.

2. Установлено, что применение методов ОФУ и ИГИ для обработки данных ТГА приводит к

одинаково достоверным результатам. Вместе с тем модифицированный метод ИГИ дает значения кинетических параметров, обеспечивающие лучшее приближение к экспериментальным данным.

3. Найденные по методу ИГИ значения $E=71,25$ кДж/моль и $\ln A=8,47$ лежат в диапазонах соответствующих величин для гемицеллюлозы и лигнина, а порядок реакции $n=1,507$ – в диапазоне данной величины для целлюлозы и гемицеллюлозы. Таким образом, полученные результаты согласуются с данными других авторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рынок возобновляемой энергетики России, текущий статус и перспективы развития. Информационный бюллетень. Ассоциация развития возобновляемой энергетики. Июль 2023. URL: https://treda.ru/upload/iblock/719/b1283yr9mdg1n7bzzf5f01jzqx3ku48l/202307_RREDA_Annual_RES_report_v4.pdf (дата обращения: 02.12.2023).
2. Ассоциация «НП Совет рынка». URL: <https://www.np-sr.ru/ru/market/vie/index.htm> (дата обращения: 02.12.2023).
3. Стратегическая Программа Исследований по биоэнергетике. (Редакция 6, переработанная и дополненная). Технологическая Платформа «БИОЭНЕРГЕТИКА» – М., 2021. URL: https://tp-bioenergy.ru/upload/file/spi_bioenergy_2021.pdf (дата обращения: 02.12.2023).
4. Report. EU Wood Pellet Annual. Department of Agriculture (USDA). July 13, 2022. Report Number: E42022-0049. URL: https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/Report/DownloadReportByFileName?fileName=EU%20Wood%20Pellet%20Annual_The%20Hague_European%20Union_E42022-0049 (дата обращения: 02.12.2023).
5. Маркетинговое исследование мирового и российского рынка пеллет 2017–2022 гг. с прогнозом до 2030 г. Экспертно-консультационный центр «Инвест-Проект». – М., 2022 URL: <https://expertcc.ru/projects/proizvodstvo/marketingovoe-issledovanie-rynka-pellet-v-2014-2019-gg-prognoz-na-2020-2024-gg-s-uchetom-vliyaniya-p/?ysclid=lp8nuk6nfw768286945> (дата обращения: 02.12.2023).
6. Торрефикация – ресурсосберегающее направление термохимической переработки биомассы / А.А. Валинеева, В.А. Масловский, С.К. Попов, И.Н. Свистунов // Вестник МЭИ. – 2021. – № 4. – С. 22–36. DOI: 10.24160/1993-6982-2021-4-22-36
7. Сычев Г.А. Экспериментальные исследования особенностей процесса торрефикации биомассы растительного происхождения: дис...канд. техн. наук. – М., 2020. – 125 с. URL: https://jiht.ru/science/dissert-council/diss_texts/Sychev.pdf?ysclid=lowv7vv5e1775805060 (дата обращения: 02.12.2023)
8. Torrefied biomass a substitute for wood and charcoal / M. Pach, M. Pach, Z. Zanzi, E. Bjornbom // 6th Asia-Pacific International Symposium on Combustion and Energy Utilization. – Kuala Lumpur, 2002. URL: <https://www.researchgate.net/publication/235704606> (дата обращения: 02.12.2023)
9. Fellli F.F. Wood briquette torrefaction // Energy Sustain Develop. – 2005. – Vol. 9 (3). – P. 19–22. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0973-0826\(08\)60519-0](https://doi.org/10.1016/S0973-0826(08)60519-0)
10. Jeeban Poudel, Tae-In Ohm, Sea Cheon Oh. A study on torrefaction of food waste // Fuel. 2015. – Vol. 140. – P. 275–281. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2014.09.120>
11. Torrefaction of microalgal biochar as potential coal fuel and application as bio-adsorbent / Yong Yang Gan, Hwai Chyuan Ong, Pau Loke Show, Tau Chuan Ling, Wei Hsin Chen, Kai Ling Yu, Rosazlin Abdullah // Energy Conversion and Management. – 2018. – Vol. 165. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.03.046>
12. Жуйков А.В. Предварительная оценка возможности применения коксозольного остатка в качестве энергетического топлива на объектах теплоэнергетики // Вестник МЭИ. – 2022. – № 6. – С. 104–109. DOI: 10.24160/1993-6982-2022-6-104-109
13. Жуйков А.В. Возможность применения твердотопливных смесей на основе бурого угля марки ЗБ и древесных отходов в теплоэнергетике // Промышленная энергетика. – 2023. – № 7. – С. 37–43. DOI: 10.34831/EP.2023.88.64.005
14. Хорева П.В. Повышение эффективности термической переработки осадков сточных вод: автореф. дис...канд. техн. наук. – М., 2022. – 20 с.
15. Экспериментальное исследование окислительного пиролиза твердых бытовых отходов / Р.Н. Габитов, О.Б. Колибаба, К.В. Аксенчик, В.А. Артемьева // Вестник ИГЭУ. – 2013. – № 3. – С. 14–19.
16. Марьяндышев П.А., Чернов А.А., Любов В.К. Анализ термогравиметрических и кинетических данных различных видов древесного биотоплива Северо-Западного региона Российской Федерации // Лесной журнал. – 2016. – № 1. – С. 167–182.
17. Kinetic analysis of rice husk pyrolysis using Kissinger-Akahira-Sunose (KAS) method / Aaron Chee Ren Lim, Bridgid Lai Fui Chin, Zeinab Abbas Jawad, Kiew Ling Hii // Procedia Engineering. – 2016. – Vol. 148. – P. 124–125.
18. Vyazovkin S. Advanced isoconversional method // J. Therm. Anal. – 1997. – Vol. 49. – № 3. – P. 1493–1499.
19. Петрунина Е.А., Лоскутов С.Р., Шишкин А.С. Термический анализ затопленной древесины // Лесной вестник. – 2017. – Т. 21. – № 1. – С. 54–63.

20. Малько М.В., Василевич С.В., Митрофанов А.В. Новый метод анализа термогравиметрических данных // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. – 2021. – Т. 64 (3) – С. 24–32. DOI: /10.6060/ivkkt.20216403.6348
21. Гюльмалиев А.М., Головин Г.С., Гладун Т.Г. Теоретические основы химии угля. – М.: Изд-во Моск. гос. гор. ун-та, 2003. – 556 с.
22. Model-Free (Isoconversional) Analysis Methods in Kinetics Neo. URL: <https://kinetics.netzsch.com/en/features/model-free-analysis> (дата обращения: 02.12.2023)
23. Фетисова О.Ю., Микова Н.М., Чесноков Н.В. Кинетическое исследование термического разложения этаноллигнинов пихты и осины // Кинетика и катализ. – 2019. – Т. 60. – № 3. – С. 289–297. URL: <https://sciencejournals.ru/cgi/getPDF.pl?jid=kinkat&year=2019&vol=60&iss=3&file=KinKat1903005Fetisova.pdf> (дата обращения: 02.12.2023).
24. Федюхин А.В. Разработка систем комбинированной выработки тепловой и электрической энергии на основе исследования процессов пиролиза и газификации биомассы: дис...канд. техн. наук. – М., 2014. – 157 с. URL: https://studylib.ru/doc/2383055/nacional._nyj-issledovatel._skij-universitet-moskovskij-e-n...?ysclid=lowyd1hqah864132327 (дата обращения: 02.12.2023).
25. Kongkaew N., Pruksakit W., Patumsawad S. Thermogravimetric kinetic analysis of the pyrolysis of rice straw // Energy Procedia. – 2015. – Vol. 79. – P. 663–670. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.11.552
26. Kissinger H. Variation of peak temperature with heating rate in differential thermal analysis // Journal Research of the National Bureau of Standards. – 1956. – Vol. 57. – P. 217–221. URL: https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/jres/057/jresv57n4p217_A1b.pdf (дата обращения: 02.12.2023).
27. Попова Е.И. Совершенствование технологии торрефикации вторичных древесных ресурсов: автореф. дис...канд. техн. наук. – Архангельск, 2018. – 24 с. URL: <https://narfu.ru/upload/iblock/964/AVTOREFERT.pdf?ysclid=lowy8zfde9132473105> (дата обращения: 02.12.2023).
28. Critical parameters of biomass torrefaction process. URL: <https://simecpellet.com/blog/critical-parameters-of-biomass-torrefaction-process.html> (дата обращения: 02.12.2023).
29. Wardach-Swiecicka I., Kardas D. Modelling thermal behaviour of a single solid particle pyrolysing in a hot gas flow // Energy. – 2021. – Vol. 221. – 119802. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.119802>
30. Ермоченков М.Г. Моделирование интенсивного теплового воздействия при сушке, термомодифицировании и торрефикации древесины, прогнозирование ее свойств: дис...д-ра техн. наук. – Мытищи, 2018. – 386 с. URL: <https://narfu.ru/upload/iblock/903/DISSERTATSIYA-Ermochenkov.pdf?ysclid=lowyfbf2fj373210362> (дата обращения: 02.12.2023).
31. Астафьев А.В. Обоснование условий реализации автотермического пиролиза органической биомассы применительно к теплотехнологическому оборудованию: дис...канд. техн. наук. – Томск, 2021. – 179 с. URL: https://portal.tpu.ru/portal/pls/portal/f?p=ds_view_bknd.download_doc?fileid=8554 (дата обращения: 02.12.2023).
32. Liu R., Morrell J.J., Yan L. Thermogravimetric analysis studies of thermally-treated glycerol impregnated poplar wood // BioResources. – 2018. – Vol. 13. – P. 1563–1575. DOI: 10.15376/biores.13.1.1563-1575
33. Effect of wet torrefaction on pyrolysis kinetics and conversion of microalgae carbohydrates, proteins, and lipids / Yong Yang Gan, Wei-Hsin Chen, Hwai Chyuan Ong, Yu-Ying Lin, Herng-Kuang Sheen, Jo-Shu Chang, Tau Chuan Ling // Energy Conversion and Management. – 2021. – Vol. 227. – 113609. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113609>
34. Flynn J.H. The isoconversional method for determination of energy of activation at constant heating rates. Corrections for the Doyle approximation // Journal of Thermal Analysis. – 1983. – Vol. 27. – P. 95–102. URL: <https://www.sci-hub.ru/10.1007/bf01907325?ysclid=lowyuk625c222762668> (дата обращения: 02.12.2023).
35. Doyle C.D. Estimating isothermal life from thermogravimetric data // Journal of Applied Polymer Science. – 1962. – Vol. 6. – P. 639–642. DOI: [doi/10.1002/app.1962.070062406](https://doi.org/10.1002/app.1962.070062406)
36. Касьянов В.А. Эконометрика. – Екатеринбург, ГОУ ВПО УГТУ–УПИ, 2008. URL: <https://study.urfu.ru/Aid/Publication/8688/1/Kasyanov.pdf> (дата обращения: 02.12.2023).

Информация об авторах

Анна Александровна Валинеева, старший преподаватель кафедры инновационных технологий наукоемких отраслей Национального исследовательского университета «МЭИ», Россия, 111250, г. Москва, вн. тер. г. муниципальный округ Лефортово, ул. Красноказарменная, 14, стр. 1. valineevaaa@mpei.ru, <https://orcid.org/0009-0002-9660-9795>,

Станислав Константинович Попов, доктор технических наук, профессор кафедры инновационных технологий наукоемких отраслей Национального исследовательского университета «МЭИ», Россия, 111250, г. Москва, вн. тер. г. муниципальный округ Лефортово, ул. Красноказарменная, 14, стр. 1. porovsk@mpei.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2320-7261>

Поступила в редакцию: 18.12.2023

Поступила после рецензирования: 24.01.2024

Принята к публикации: 10.09.2024

REFERENCES

1. Russian renewable energy market, current status and development prospects. The newsletter. Association for the Development of Renewable Energy. July 2023. (In Russ.) Available at: https://rreda.ru/upload/iblock/719/b1283yr9mdg1n7bzzf5f01jzqx3ku48l/02307_RREDA_Annual_RES_report_v4.pdf (accessed 2 December 2023).

2. *Association of «NP Market Council»*. (In Russ.) Available at: <https://www.np-sr.ru/ru/market/vie/index.htm> (accessed 2 December 2023).
3. *Strategic Bioenergy Research Program. (Revision 6, revised and expanded). BIOENERGY Technology Platform*. Moscow, 2021. (In Russ.) Available at: https://tp-bioenergy.ru/upload/file/spi_bioenergy_2021.pdf (accessed 2 December 2023).
4. *Report. EU Wood Pellet Annual. Department of Agriculture (USDA)*. July 13, 2022. Report Number: E42022-0049. Available at: https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/Report/DownloadReportByFileName?fileName=EU%20Wood%20Pellet%20Annual_The%20Hague_European%20Union_E42022-0049 (accessed 2 December 2023).
5. *Marketing research of the global and Russian pellet market 2017-2022 with a forecast up to 2030. Expert Consulting Center "Invest-Project"*. Moscow, 2022 (In Russ.) Available at: <https://expertcc.ru/projects/proizvodstvo/marketingovoe-issledovanie-rynka-pellet-v-2014-2019-gg-prognoz-na-2020-2024-gg-s-uchetom-vliyaniya-p/?ysclid=lp8nuk6nfw768286945> (accessed 2 December 2023).
6. Valineeva A.A., Maslovskiy V.A., Popov S.K., Svistunov I.N. Torrefaction: a resource saving biomass thermochemical processing technology. *Bulletin of MPEI*, 2021, no. 4, pp. 22–36. (In Russ.) DOI: 10.24160/1993-6982-2021-4-22-36.
7. Sychev G.A. *Experimental studies of the process of torrefication peculiarities of biomass of plant origin*. Cand. Dis. Moscow, 2020. 125 p. (In Russ.) Available at: https://jiht.ru/science/dissert-council/diss_texts/Sythev.pdf?ysclid=lowv7vv5e1775805060 (accessed 2 December 2023).
8. Pach M., Pach M., Zanzi Z., Bjornbom E. Torrefied biomass a substitute for wood and charcoal. *6-th Asia-Pacific International Symposium on Combustion and Energy Utilization*. Kuala Lumpur, 2002. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/235704606> (accessed 2 December 2023).
9. Felfli F.F. Wood briquette torrefaction. *Energy Sustain Develop*, 2005, vol. 9 (3). pp. 19–22. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0973-0826\(08\)60519-0](https://doi.org/10.1016/S0973-0826(08)60519-0)
10. Jeeban Poudel, Tae-In Ohm, Sea Cheon Oh. A study on torrefaction of food waste. *Fuel*, 2015, vol. 140, pp. 275–281. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2014.09.120>
11. Yong Yang Gan, Hwai Chyuan Ong, Pau Loke Show, Tau Chuan Ling, Wei Hsin Chen, Kai Ling Yu, Rosazlin Abdullah. Torrefaction of microalgal biochar as potential coal fuel and application as bio-adsorbent. *Energy Conversion and Management*, 2018, vol. 165. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.03.046>
12. Zhuikov A.V. Preliminary assessment of the possibility of using coke ash residue as an energy fuel at thermal power facilities. *Bulletin of the MPEI*, 2022, no. 6, pp. 104–109. (In Russ.) DOI: 10.24160/1993-6982-2022-6-104-109
13. Zhuikov A.V. The possibility of using solid fuel mixtures based on brown coal grade 3B and wood waste in thermal power engineering. *Industrial power engineering*, 2023, no. 7, pp. 37–43. (In Russ.) DOI: 10.34831/EP.2023.88.64.005
14. Khoreva P.V. *Improving the efficiency of thermal processing of sewage sludge*. Cand. Dis. Abstract. Moscow, 2022. 20 p. (In Russ.)
15. Gabitov R.N., Kolibaba O.B., Aksenchik K.V., Artemyeva V.A. Experimental study of oxidative pyrolysis of solid household waste. *Bulletin of IGPEU*, 2013, no. 3, pp. 14–19. (In Russ.)
16. Maryandyshev P.A., Chernov A.A., Lyubov V.K. Analysis of thermogravimetric and kinetic data of various types of wood biofuels in the Northwestern region of the Russian Federation. *Forest Bulletin*, 2016, no. 1, pp. 167–182. (In Russ.)
17. Aaron Chee Ren Lim, Bridgid Lai Fui Chin, Zeinab Abbas Jawad, Kiew Ling Hii. Kinetic analysis of rice husk pyrolysis using Kissinger-Akahira-Sunose (KAS) method. *Procedia Engineering*, 2016, vol. 148, pp. 124–125.
18. Vyazovkin S. Advanced isoconversional method. *J. Therm. Anal.*, 1997, vol. 49, no. 3, pp. 1493–1499.
19. Petrunina E.A., Loskutov S.R., Shishikin A.S. Thermal analysis of flooded wood. *Forest bulletin*, 2022, vol. 21, no. 1, pp. 54–63. (In Russ.)
20. Malko M.V., Vasilevich S.V., Mitrofanov A.V. A new method of analysis of thermogravimetric data. *Izvestia of higher educational institutions. Chemistry and chemical technology*, 2021, vol. 64 (3), pp. 24–32. (In Russ.)
21. Gylmaliev A.M., Golovin G.S., Gladun T.G. *Theoretical grounds of chemistry coal*. Moscow, Moscow Mining University Publ., 2003. 556 p. (In Russ.)
22. *Model-Free (Isoconversional) Analysis Methods in Kinetics Neo*. Available at: <https://kinetics.netzsch.com/en/features/model-free-analysis> (accessed 2 December 2023).
23. Fetisova O.Yu., Mikova N.M., Chesnokov N.V. Kinetic study of thermal decomposition of ethanolignins of fir and aspen. *Kinetics and catalysis*, 2019, vol. 60, no. 3, pp. 289–297. (In Russ.) Available at: <https://sciencejournals.ru/cgi/getPDF.pl?jid=kinkat&year=2019&vol=60&iss=3&file=KinKat1903005Fetisova.pdf> (accessed 2 December 2023).
24. Fedyukhin A.V. *Development of combined heat and electric energy generation systems based on the study of pyrolysis and gasification processes of biomass*. Cand. Dis. Moscow, 2014. 157 p. (In Russ.) Available at: https://studylib.ru/doc/2383055/nacional_nyj-issledovatel_skiy-universitet-moskovskij-e-n...?ysclid=lowyd1hqah864132327 (accessed 2 December 2023).
25. Kongkaew N., Pruksakit W., Patumsawad S. Thermogravimetric kinetic analysis of the pyrolysis of rice straw. *Energy Procedia*, 2015, vol. 79, pp. 663–670. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.11.552
26. Kissinger H. Variation of peak temperature with heating rate in differential thermal analysis. *Journal Research of the National Bureau of Standards*, 1956, vol. 57, pp. 217–221. Available at: https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/jres/057/jresv57n4p217_A1b.pdf (accessed 2 December 2023).
27. Popova E.I. *Improving the technology of torrefication of secondary wood resources*. Cand. Diss. Arkhangelsk, 2018. 24 p. (In Russ.) Available at: <https://narfu.ru/upload/iblock/964/AVTOREFERT.pdf?ysclid=lowy8zfde9132473105> (accessed 2 December 2023).
28. *Critical parameters of biomass torrefaction process*. Available at: <https://simecpellet.com/blog/critical-parameters-of-biomass-torrefaction-process.html> (accessed 2 December 2023).
29. Wardach-Swiecicka I., Kardas D. Modelling thermal behaviour of a single solid particle pyrolysing in a hot gas flow. *Energy*, 2021, vol. 221, 119802. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.119802>

30. Ermochenkova M.G. *Modeling of intensive thermal effects during drying, thermomodification and torrefication of wood, forecasting its properties*. Dr. Diss. Mitishchi, 2018. 147 p. (In Russ.) Available at: <https://narfu.ru/upload/iblock/903/DISSERTATSIYA-Ermochenkova.pdf?ysclid=lowyfbj2fj373210362> (accessed 2 December 2023).
31. Astafyev A.V. *Substantiation of the conditions for the implementation of autothermal pyrolysis of organic biomass in relation to thermal technology equipment*. Cand. Diss. Tomsk, 2021. 179 p. (In Russ.) Available at: https://portal.tpu.ru/portal/pls/portal/app_ds.ds_view_bknd.download_doc?fileid=8554 (accessed 2 December 2023).
32. Liu R., Morrell J.J., Yan L. Thermogravimetric analysis studies of thermally-treated glycerol impregnated poplar wood. *BioResources*, 2018, vol. 13, pp. 1563–1575. DOI: 10.15376/biores.13.1.1563-1575
33. Yong Yang Gan, Wei-Hsin Chen, Hwai Chyuan Ong, Yu-Ying Lin, Heng-Kuang Sheen, Jo-Shu Chang, Tau Chuan Ling. Effect of wet torrefaction on pyrolysis kinetics and conversion of microalgae carbohydrates, proteins, and lipids. *Energy Conversion and Management*, 2021, vol. 227, 113609. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113609>
34. Flynn J.H. The isoconversional method for determination of energy of activation at constant heating rates. Corrections for the Doyle approximation. *Journal of Thermal Analysis*, 1983, vol. 27, pp. 95–102. Available at: <https://www.sci-hub.ru/10.1007/bf01907325?ysclid=lowyuk625c222762668> (accessed 2 December 2023).
35. Doyle C.D., Estimating isothermal life from thermogravimetric data. *Journal of Applied Polymer Science*, 1962, vol. 6, pp. 639–642. DOI: [doi/10.1002/app.1962.070062406](https://doi.org/10.1002/app.1962.070062406)
36. Kasyanov V.A. *Econometrica*. Ekaterinburg, GOU VPO UGTU–UPI Publ, 2008. Available at: <https://study.urfu.ru/Aid/Publication/8688/1/Kasyanov.pdf> (accessed 2 December 2023).

Information about the authors

Anna A. Valineeva, Senior Lecturer, National Research University «MPEI», bld. 1, 14, Krasnokazarmennaya street, Moscow, 111250, Russian Federation. valineevaaa@mpei.ru, <https://orcid.org/0009-0002-9660-9795>

Stanislav K. Popov, Dr. Sc., Professor, National Research University «MPEI», bld. 1, 14, Krasnokazarmennaya street, Moscow, 111250, Russian Federation. popovsk@mpei.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2320-7261>

Received: 18.12.2023

Revised: 24.01.2024

Accepted: 10.09.2024

УДК 622.245.01

DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4499

Шифр специальности ВАК: 1.6.21, 1.6.6, 2.8.6

Численное моделирование напряженно-деформированного состояния вблизи нагнетательной скважины на пунктах глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов

С.Н. Попов¹, О.Н. Кокорев^{2✉}, Т.Ю. Заведий³, А.И. Маневич⁴

¹ Институт проблем нефти и газа Российской академии наук, Россия, г. Москва

² Филиал «Северский», Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами, Россия, г. Северск

³ АО «Сибирский химический комбинат», Россия, г. Северск

⁴ Геофизический Центр РАН, Россия, г. Москва

✉ Kokorev.podzemgazprom@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность* исследования обусловлена необходимостью прогноза деформаций земной поверхности вблизи нагнетательных скважин, закачивающих жидкие радиоактивные отходы, а также их устойчивости при изменении давления в скважине в процессе закачки. *Цель:* с помощью метода конечных элементов произвести численный анализ напряженно-деформированного состояния конструктивных элементов нагнетательной скважины, а также окружающего массива горных пород, определить величины деформаций земной поверхности и оценить устойчивости скважины и прочности цементного камня при максимальном давлении нагнетания жидких радиоактивных отходов. *Объекты:* околоскважинная зона одной из нагнетательных скважин, расположенных на пунктах или полигонах глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов. *Методы:* численный конечно-элементный метод расчета напряженно-деформированного состояния околоскважинной зоны с учетом распределения упругих свойств пород по моделируемому разрезу и основных конструктивных элементов скважины. *Результаты.* Разработана численная конечно-элементная схема одной из нагнетательных скважин с учетом ее основных конструктивных элементов, позволяющая задавать распределение давления внутри эксплуатационного горизонта в процессе закачки отходов. В модели задавалось распределение упругих свойств пород по разрезу с учетом их литологических особенностей. Проведен анализ гидродинамических показателей работы скважины и определено максимальное давление на устье скважины при закачке жидких радиоактивных отходов, равное 1,71 МПа. Выполнено численное моделирование напряженно-деформированного состояния околоскважинной зоны в два этапа: для условий неработающей скважины и с учетом распределения давления при максимальном давлении нагнетания отходов. Получено распределение вертикальных перемещений на уровне земной поверхности, а также на кровле эксплуатационного горизонта при максимальном давлении закачки жидких радиоактивных отходов. Показано, что при таком давлении наибольшие поднятия составят: на земной поверхности – 4,5 см, на кровле эксплуатационного горизонта – 11 см. Оценка устойчивости конструктивных элементов скважины на максимальной глубине нагнетания отходов 280 м, соответствующей максимальному давлению, показала, что напряжения в скважине и цементном камне гораздо ниже значений, которые могут привести к их нарушению. Для цементного камня коэффициент запаса прочности при максимальном давлении 1,71 МПа составил 7,8.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, метод конечных элементов, нагнетательная скважина, жидкие радиоактивные отходы, околоскважинная зона, вертикальные перемещения, коэффициент запаса прочности

Благодарности: Авторы благодарят главного геолога Акционерного общества «Сибирский химический комбинат» Андрея Александровича Зубкова, сотрудников лаборатории геоинформационных технологий Института мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук Сергея Юрьевича Малышкова, Виталия Игоревича Поливач и Андрея Викторовича Зуева, специалистов службы по ремонту и обслуживанию контрольно-измерительных приборов и автоматики цеха эксплуатации филиала «Северский» Федерального государственного унитарного предприятия «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами» Дмитрия Николаевича Кузнецова и Павла Александровича Каткова за помощь, консультацию и предоставление материалов и методических рекомендаций при написании статьи.

Для цитирования: Численное моделирование напряженно-деформированного состояния вблизи нагнетательной скважины на пунктах глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов / С.Н. Попов, О.Н. Кокорев, Т.Ю. Заведий, А.И. Маневич // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 10. – С. 101–110. DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4499

UDC 622.245.01

DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4499

Numerical simulation of the stress-strain state near the injection well at deep disposal facilities for liquid radioactive waste

S.N. Popov¹, O.N. Kokorev²✉, T.Y. Zavedy³, A.I. Manevich⁴

¹ Oil and Gas Research Institute of Russian Academy of Science, Moscow, Russian Federation

² "Seversky" branch, National operator for radioactive waste management, Seversk, Russian Federation
Siberian chemical plant, Seversk, Russian Federation

⁴ Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

✉ Kokorev.podzemgazprom@yandex.ru

Abstract. Relevance. The need to predict deformations of the earth's surface near injection wells pumping liquid radioactive waste, as well as their stability when pressure changes in the well during injection. **Aim.** To perform a numerical analysis of the stress-strain state of the structural elements of the injection well and the surrounding rock mass using the finite element method, to determine the magnitude of the deformations of the earth's surface and define the stability of the well and the strength of the cement stone at the maximum injection pressure of liquid radioactive waste. **Objects.** Near-wellbore zone of one of the injection wells located at the liquid radioactive waste injection site. **Methods.** Numerical finite element method for calculating the stress-strain state of the near-wellbore zone, taking into account the distribution of the elastic properties of rocks along the simulated section and the main structural elements of the well. **Results.** The authors have developed the numerical finite element scheme of one of the injection wells, taking into account its main structural elements, as well as allowing you to set the pressure distribution within the exploited horizon during the injection of waste. In the model, the distribution of the elastic properties of rocks along the section was set, taking into account their lithological features. The authors carried out the analysis of the hydrodynamic parameters of the well operation and determined the maximum pressure at the wellhead during the injection of liquid radioactive waste, equal to 1.71 MPa. Numerical modeling of the stress-strain state of the near-wellbore zone was performed in two stages: for the conditions of an idle well and taking into account the pressure distribution at the maximum waste injection pressure. The distribution of vertical displacements at the level of the earth's surface, as well as at the top of the operational horizon at the maximum pressure of liquid radioactive waste injection, is obtained. It is shown that at such a pressure, the largest uplifts will be: on the earth's surface – 4.5 cm, on the top of the production horizon – 11 cm. An assessment of the stability of the well structural elements at a maximum waste injection depth of 280 m, corresponding to the maximum pressure, showed that the stresses in the well and cement stone are much lower than the values that can lead to their violation. For cement stone, the safety factor at a maximum pressure of 1.71 MPa was equal to 7.8.

Keywords: stress-strain state, finite element method, injection well, liquid radioactive waste, near-wellbore zone, vertical displacements, safety factor

Acknowledgements: The authors thank Andrey A. Zubkov, the chief geologist of the Joint-Stock Company «Siberian Chemical Plant», Sergey Yu. Malyshkov, Vitaly I. Polivach and Andrey V. Zuev, employees of the laboratory of geoinformation technologies of the Institute for Monitoring of Climate and Ecological Systems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Dmitry N. Kuznetsov and Pavel A. Katkov, specialists of the service for repair and maintenance of control and measuring instruments and automation of the operation shop of the «Seversky» branch of the National Operator for Radioactive Waste Management for assistance, consultation and provision of materials and methodological recommendations when writing the article.

For citation: Popov S.N., Kokorev O.N., Zavedy T.Yu., Manevich A.I. Numerical simulation of the stress-strain state near the injection well at deep disposal facilities for liquid radioactive waste. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 10, pp. 101–110. DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4499

Введение

Одним из наиболее безопасных и распространенных способов изоляции жидких радиоактивных отходов (ЖРО) является их глубинное захоронение в геологические формации [1–3]. Для таких целей используются нагнетательные скважины, вскрывающие фильтром эксплуатационные горизонты. Для

контроля за закачкой ЖРО и физико-химическими процессами, происходящими в пласте, выполняется геотехнологический мониторинг [3–7]. При захоронении жидкие отходы закачиваются в целевые пласты, при этом на устье скважины может создаваться давление до нескольких МПа. В таком случае аналогичный перепад давления будет иметь

место и в околоскважинной зоне в эксплуатационном горизонте, что приведет к трансформации напряженно-деформированного состояния (НДС) самого пласта, окружающего массива пород и земной поверхности. Для прогноза возможных деформаций земной поверхности на территории эксплуатационных объектов, на которых происходит изменение давления в пласте, обычно прибегают к методам аналитического или численного моделирования. Одним из таких методов является метод конечных элементов, позволяющий учесть неоднородность физико-механических свойств пород, связанных с геологическим строением разреза вблизи скважин, а также распределение давления в исследуемом пласте [8–10]. На основе полученных результатов численных расчетов делается вывод о целесообразности применения различных методов мониторинга деформаций земной поверхности на территории пункта глубинного захоронения.

Изменение давления в скважине может также привести к существенному увеличению напряжений в ее конструктивных элементах – колонне и цементном камне [11–15]. Для анализа НДС в околоскважинной зоне в последнее время применяют 1D геомеханическое моделирование скважин [16–18], однако данные модели предназначены для определения напряжений только в открытом стволе скважины и не учитывают напряженное состояние колонны и цементного камня. В таком случае требуется анализ поля распределения напряжений в элементах конструкции скважины для предотвращения аварийных ситуаций, способных привести к деформации скважины, заколонным перетокам и проникновению ЖРО на земную поверхность. В рамках данной работы была проведена оценка поля напряжений и деформаций на примере одной из скважин пункта глубинного захоронения (ПГЗ) ЖРО.

Численная модель для расчета напряжений в околоскважинной зоне

Моделирование НДС околоскважинной зоны осуществлялось в программном комплексе ANSYS, в котором реализовано численное решение дифференциальных уравнений, описывающих линейно-упругое поведение твердого тела, подробно рассмотренных в работах [19–21]:

- уравнения движения (моментов):

$$\sum_j \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho f_i = 0; i, j = 1, 2, 3,$$

где σ_{ji} – компоненты тензора напряжений; ∂x_j – производная по j-й координате; ρf_i – массовые силы;

- геометрические соотношения:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right); i, j = 1, 2, 3,$$

где ε_{ji} – компоненты тензора деформаций; u – компоненты вектора перемещений;

- физические соотношения (в данном случае закон линейной упругости Гука):

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\},$$

где $\{\sigma\}$ – тензор напряжений; $[D]$ – матрица упругих констант; $\{\varepsilon\}$ – тензор деформаций.

Для расчета НДС в околоскважинной зоне была разработана осесимметричная конечно-элементная модель разреза вблизи нагнетательной скважины Н-33 радиусом 500 м. Для рассматриваемой скважины фиксировалась наибольшая величина давления при нагнетании жидких радиоактивных отходов, равная 1,71 МПа. Разрез модели включал основные геологические пласты, разделенные на основе литологической характеристики пород, а также основные конструктивные элементы скважины (рис. 1, 2, табл. 1).

Конструкция скважины задавалась согласно данным, приведенным в деле и в паспорте скважины, которая состояла из следующих элементов: направление, спущенное до глубины 1,9 м; кондуктор, спущенный до глубины 160 м; колонна, спущенная до глубины 280 м; фильтр, находящийся в интервале глубин 272,8–357,8 м (рис. 1).

На рис. 2 представлена осесимметричная конечно-элементная схема, использованная для численного анализа поля распределения напряжений в околоскважинной зоне в процессе закачки ЖРО. Как видно из рисунка, в разрезе были учтены пласты, имеющие различные литологические свойства. Для каждого из выделенных интервалов задавались упругие свойства, приведенные в табл. 2, в которой также указаны интервалы разбиения модели по разрезу. В связи с тем, что отсутствовали данные об экспериментальных исследованиях упругих свойств пород в разрезе скважины, такие данные определялись на основе справочных данных [22–24] и на основе опыта моделирования подобных задач геомеханики авторов данной публикации. Так как деформации земной поверхности в наибольшей степени зависят от упругих свойств эксплуатационного горизонта, по данному пласту такие свойства адаптировались на основе результатов измерений деформаций геофизическим методом [2].

В расчетах использовались четырехугольные конечные элементы plane183, имеющие восемь узлов для большей точности интерполяции определяемых характеристик. Для данных элементов включалась опция осесимметричного моделирования.

При численных расчетах использовались следующие граничные условия:

- на правой (внешней) границе модели закреплялись перемещения вдоль горизонтальной оси;
- на нижней границе модели закреплялись перемещения вдоль вертикальной оси;

- в скважине задавалось давление, увеличивающееся по линейной зависимости с глубиной начиная с давления на ее устье.

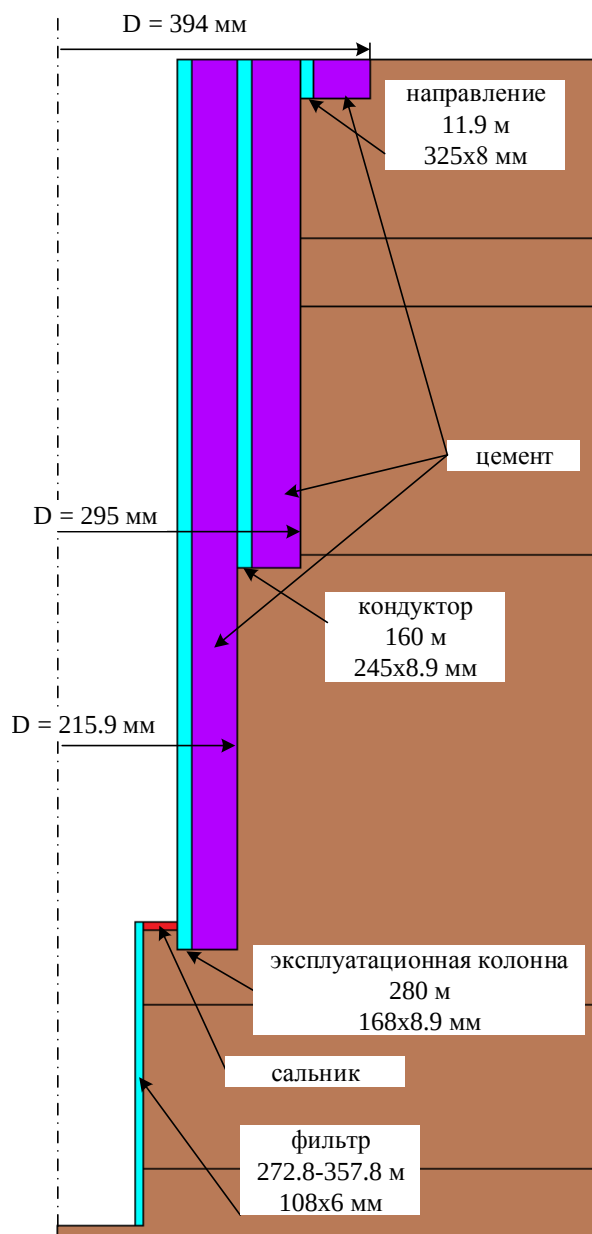


Рис. 1. Схема конструкции нагнетательной скважины, использованная в расчетах

Fig. 1. Scheme of the design of the injection well used in the calculations

Для всех элементов модели задавалось влияние объемных сил в виде силы тяжести. Моделирование проводилось в два этапа. На первом этапе расчет проводился при исходном состоянии пласта без учета нагнетания. В скважине задавалось линейное распределение давления по глубине с учетом того, что давление на устье равно атмосферному.

Таблица 1. Упруго-прочностные и геометрические характеристики конструктивных элементов скважины, использованные в расчетах

Table 1. Elastic-strength and geometric characteristics of the structural elements of the well, used in the calculations

Характеристика Characteristic	Единицы измерения Units	Элемент конструкции Structural element				
		направление direction	кондуктор conductor	экспл. колонна casing	фильтр filter	сальник wall packer
глубина спуска descent depth	м m	11,9	160	280	272,8–357,8	272,8–274
внешний диаметр outer diameter	мм mm	325	245	168	108	150,2
толщина стенки wall thickness	мм mm	8	8,9	8,9	6	21,1
модуль Юнга стали Young modulus of steel	ГПа GPa	200				100
коэффициент Пуассона стали Poisson's ratio of steel	д.е. u.f.	0,2				0,3
предел текучести стали yield strength of steel	МПа MPa	352				–
модуль Юнга цемента Young modulus of cement	ГПа GPa	12,2				–
коэффициент Пуассона цемента Poisson's ratio of steel	д.е. u.f.	0,104				–
предел прочно- сти цемента при сжатии compressive strength of cement	МПа MPa	42				–
угол внутреннего трения цемента angle of internal friction of cement	градусы degrees	28				–

На втором этапе на верхней и нижней границе эксплуатационного горизонта задавался прирост давления в виде нижеприведенной логарифмической зависимости с максимальным значением 1,71 МПа, при этом радиус зоны изменения давления был равен 250 м:

$$p = p_b - \Delta p \frac{\ln\left(\frac{r}{r_b}\right)}{\ln\left(\frac{r_w}{r_b}\right)},$$

где p – определяемая величина давления; p_b – давление на удалении от скважины; Δp – величина перепада давления; r_b – радиус, на котором определялось давление на удалении от скважины; r_w – радиус скважины; r – радиус от оси скважины, для которого определяется величина давления.

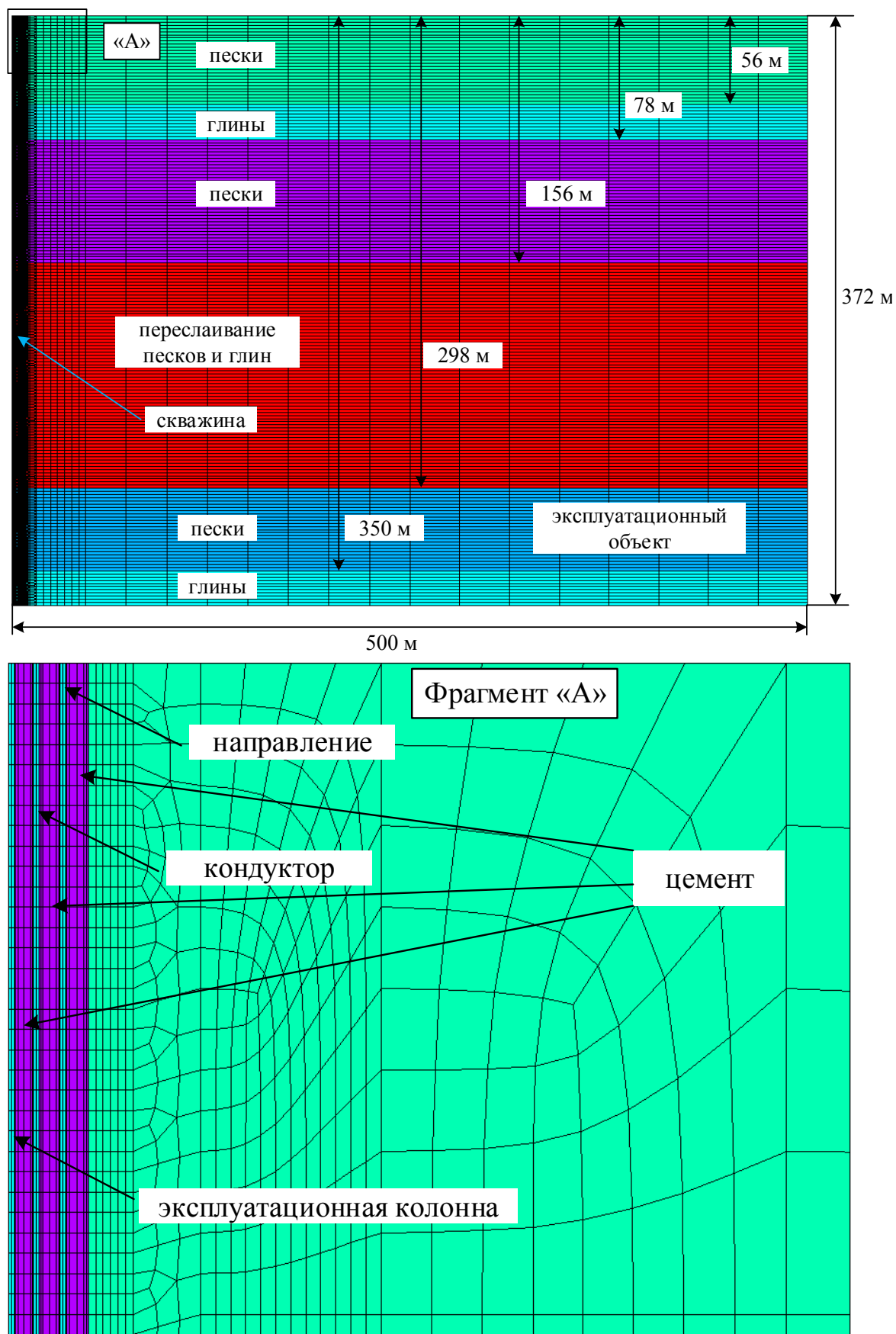


Рис. 2. Осесимметричная конечно-элементная схема для расчета НДС околоскважинной зоны
Fig. 2. Axisymmetric finite element scheme for calculating the stress-strain state of the near-wellbore zone

Таблица 2. Геомеханические свойства окружающего массива пород, использованные в расчетной модели

Table 2. Geomechanical properties of the surrounding rock mass used in the calculation model

Интервал залегания Occurrence interval, м/м	Литология Lithology	Модуль Юнга Young modulus, МПа/МПа	Коэффициент Пуассона Poisson's ratio, д.е./u.f.
0–56	преимущественно пески predominantly sands	100	0,3
56–78	преимущественно глины predominantly sands	300	0,4
78–156	преимущественно пески predominantly sands	200	0,3
156–298	переслаивание песков и глин interbedding of sands and clays	500	0,4
298–350 (экспл. объект operational deposit)	преимущественно пески predominantly sands	100	0,3
350–372	глины/clay	600	0,4

Давление в скважине прикладывалось по линейной зависимости от глубины залегания пород с учетом того, что давление на устье стало равно давлению 1,71 МПа.

Результаты численного моделирования НДС скважины и околоскважинной зоны

На рис. 3 приведено распределение изменения вертикальных напряжений, полученное при увеличении давления на устье скважины на 1,71 МПа.

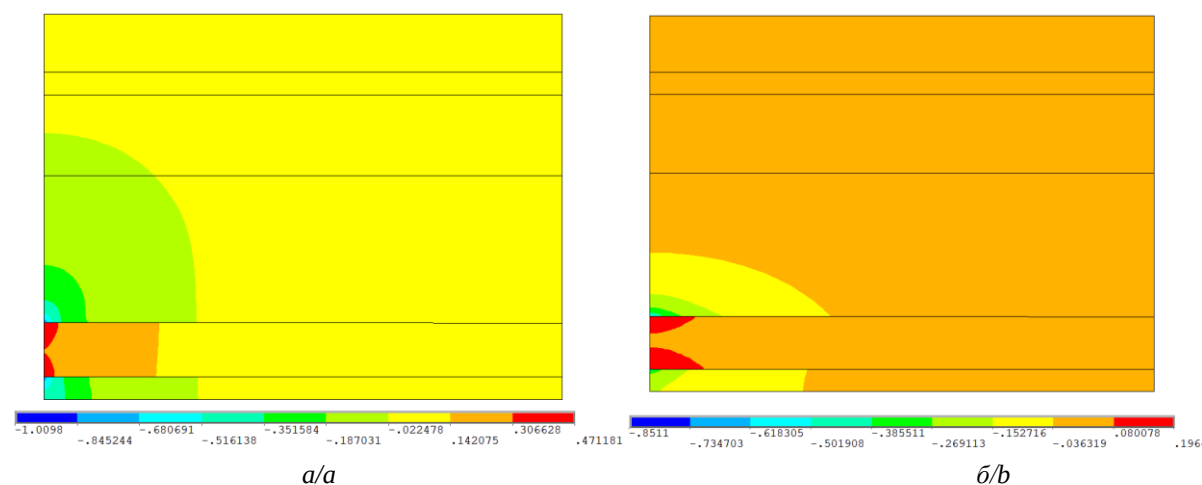


Рис. 3. Изменение величины вертикальных (а) и горизонтальных (б) напряжений (МПа) при увеличении давления на устье скважины от 0 до 1,71 МПа

Fig. 3. Change in the value of vertical (a) and horizontal (b) stresses (MPa) with increasing pressure at the wellhead from 0 to 1,71 MPa

Как видно из рисунка, в эксплуатационном горизонте происходит увеличение вертикальных напряжений на 0,47 МПа, горизонтальные напряжения увеличиваются на гораздо меньшее значение, равное 0,2 МПа. Следствием роста напряжений в рассматриваемом пласте должно быть его расширение и поднятие земной поверхности.

В выше- и нижележащих пластах происходит уменьшение напряжений: вертикальных – на 1 МПа, горизонтальных – на 0,85 МПа. Вышеприведенные значения трансформации напряжений говорят о том, что конструктивные элементы скважины, находящиеся в данном интервале, не подвергаются существенному увеличению нагрузок и должны сохранить свою устойчивость.

Для того чтобы определить перемещения пласта и земной поверхности, производилось вычитание результатов расчета первого расчетного шага (без учета давления нагнетания) из второго расчета (при давлении на устье скважины 1,71 МПа). В итоге было получено распределение вертикальных перемещений вблизи нагнетательной скважины на уровне кровли эксплуатационного горизонта, а также поднятия земной поверхности (рис. 4). Как показали расчеты, величина максимального значения деформаций земной поверхности (вблизи устья скважины) составляет примерно 2,5 см/МПа и при давлении 1,71 МПа равно 4,5 см. В целом полученные результаты численного моделирования совпадают с результатами дополнительных геофизических исследований, проведенных на исследуемом полигоне ЖРО [4].

Как видно из рис. 4, величина максимальных вертикальных перемещений на кровле эксплуатационного горизонта почти в 2 раза больше, чем на земной поверхности, и составила около 11 см.

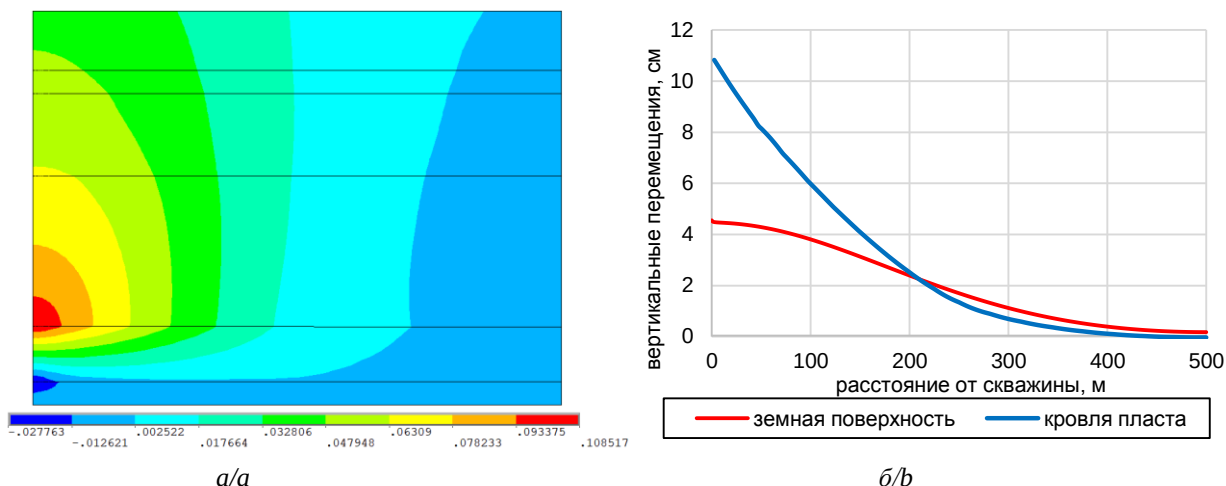


Рис. 4. Распределение вертикальных перемещений вблизи скважины по всему разрезу в метрах (а) (положительное направление вертикальной оси соответствует положительным вертикальным перемещениям), а также на уровне кровли эксплуатационного объекта и земной поверхности (б) при давлении на устье скважины 1,71 МПа

Fig. 4. Distribution of vertical displacements near the well over the entire section (a) and at the top surface of the operation deposit and the earth's surface (b) at a pressure at the wellhead of 1,71 MPa

На следующем этапе была произведена оценка сохранности эксплуатационной колонны и цементного камня нагнетательной скважины. В связи с тем, что наибольшее давление в скважине и напряжения в околоскважинной зоне действуют на максимальной глубине, оценка проводилась для цементного камня эксплуатационной колонны и ее максимальной глубины 280 м. Предварительный анализ напряжений в эксплуатационной колонне показал очень высокий коэффициент ее запаса прочности, поэтому ниже приведены результаты определения запаса прочности только для цементного камня.

Возможность разрушения цементного камня оценивалась на основе критерия Кулона–Мора в следующем виде:

$$k_{zap} = \frac{\sigma_3 \frac{(1+\sin\varphi)}{(1-\sin\varphi)} + \sigma_{USC}}{\sigma_1}, \quad (1)$$

где k_{zap} – коэффициент запаса прочности цемента; σ_1 , σ_3 – максимальное и минимальное главное напряжение в цементе; σ_{USC} – предел прочности цемента при одноосном сжатии; φ – угол внутреннего трения цемента.

Согласно формуле (1), если коэффициент запаса прочности больше 1, цемент находится в сохранности, если данный параметр меньше 1, происходит его разрушение. На рис. 5 показано распределение коэффициента запаса прочности цементной крепи эксплуатационной колонны на глубине 280 м. Как видно из рисунка, цементное кольцо на данной глубине обладает достаточно хорошей устойчивостью. Так, если закачка жидких радиоактивных отходов не осуществляется, коэффициент запаса

прочности изменяется от 9,2 до 11, при этом максимальное его значение наблюдается на контакте цемента с породой, наименьшее – на контакте колонны и цемента.

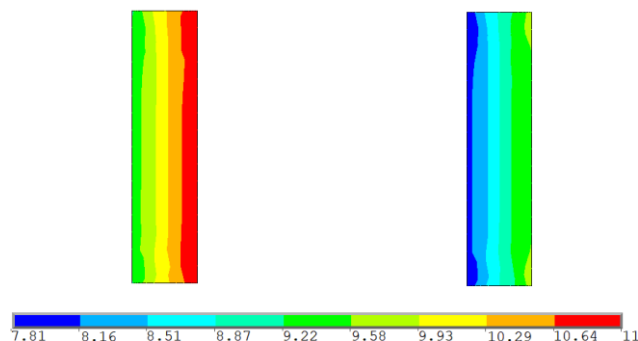


Рис. 5. Распределение коэффициента запаса прочности цементной крепи эксплуатационной колонны на глубине 280 м до начала закачки (а) и при закачке жидких радиоактивных отходов с давлением на устье скважины 1,71 МПа (б)

Fig. 5. Distribution of the safety factor of the cement stone of the casing at a depth of 280 m before the start of injection (a), and during injection of liquid radioactive waste with a pressure at the wellhead of 1,71 MPa (b)

При нагнетании ЖРО при максимальном давлении на устье 1,71 МПа коэффициент запаса прочности несколько уменьшается и находится в интервале 7,8–9,7. Высокий коэффициент запаса прочности цемента связан с небольшой максимальной глубиной спуска колонны, а также с небольшими величинами давления скважины.

В заключение следует отметить, что для более достоверного моделирования НДС на полигонах и пунктах глубинного захоронения ЖРО требуется проведение экспериментальных исследований по изучению механических свойств массива пород и, в особенности, эксплуатационного горизонта, а также образцов тампонажных материалов, применяемых при цементировании скважины.

Выводы

В рамках работы рассмотрены результаты численного моделирования НДС одной из нагнетательных скважин и окружающего массива горных пород на полигоне захоронения ЖРО. На основе анализа результатов моделирования можно сделать следующие основные выводы:

1. На примере нагнетательной скважины для закачки низкоактивных отходов, расположенной на площадке 18 ПГЗ ЖРО филиала «Северский» ФГУП «НО РАО», разработана численная конечно-элементная модель, включающая основные конструктивные элементы скважины и окружающего массива пород с учетом его литологических неоднородностей.
2. Проведен численный анализ распределения напряжений вблизи скважины, который показал, что при нагнетании ЖРО в скважину в интервале эксплу-

тационного объекта возникают растягивающие напряжения, которые приводят к его расширению и возникновению поднятий на земной поверхности. Так, при максимальном давлении нагнетания на устье скважины 1,71 МПа, наибольшие вертикальные перемещения кровли пласта составят 11 см, земной поверхности – 4,5 см.

3. Анализ напряжений в цементном камне эксплуатационной колонны на уровне эксплуатационного объекта с помощью критерия разрушения Кулона–Мора показал, что крепь скважины в данном интервале обладает очень высоким коэффициентом запаса прочности. Так, при отсутствии нагнетания данная величина находится в интервале 9,2–11. При максимальном зафиксированном давлении нагнетания на устье скважины в 1,71 МПа коэффициент запаса прочности цемента снизится незначительно – до интервала его изменения 7,8–9,7.
4. Разработанная численная конечно-элементная модель и научно-методические подходы могут быть использованы в дальнейшем для расчета НДС в других скважинах пунктов и ПГЗ ЖРО и при учете различных значений давления закачки и литологических особенностей геологического разреза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рыбальченко А.И., Курочкин В.М. Опыт исследований и практических работ в области захоронения жидких радиоактивных отходов и промышленных сточных вод предприятий атомной промышленности // Горный журнал. – 2021. – № 3. – С. 99–103.
2. Оценка влияния нагнетания жидких радиоактивных отходов на изменение напряженно-деформированного состояния массива горных пород / С.Ю. Малышков, О.Н. Кокорев, В.Ф. Гордеев, Т.Ю. Заведий, В.И. Поливач, А.И. Маневич // Разведка и охрана недр. – 2023. – № 4. – С. 43–47.
3. Анализ системы геотехнологического мониторинга полигона подземного захоронения жидких радиоактивных отходов СХК / А.А. Зубков, А.И. Рыбальченко, И.В. Токарев, В.В. Данилов // Разведка и охрана недр. – 2007. – № 11. – С. 56–61.
4. Автоматизированная система гидродинамического мониторинга для обеспечения экологической безопасности пункта глубинного захоронения ЖРО / О.Н. Кокорев, Н.Р. Адонин, М.Д. Носков, Т.Ю. Заведий, А.А. Щипков // Изв. вузов. Физика. – 2021. – Т. 64. – № 2-2. – С. 46–51.
5. Подход к мониторингу состояния недр и подземных сооружений и результаты мониторинга пунктов глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов / И.А. Пронь, А.В. Ткаченко, В.В. Мартыанов, Ю.В. Трофимова, И.В. Яковлева // Радиоактивные отходы. – 2018. – № 4 (5). – С. 42–48.
6. Создание автоматизированных систем радиационного мониторинга на объектах, связанных с утилизацией А\ПЛ, обращением с ОЯТ и РАО / Р.В. Арутюнян, С.А. Богатов, С.Л. Гаврилов, М.Е. Егорова, В.П. Киселев, А.В. Коноплев, В.Н. Кузьмин, Б.В. Одинок, С.А. Шикин // Изв. РАН. Энергетика. – 2009. – № 6. – С. 78–86.
7. Ranjbar A., Hassani H., Kourosh S. 3D geomechanical modelling and estimating the compaction and subsidence of Fahlian reservoir formation // Arabian journal of geoscience. – 2017. – Vol. 10:116. – P. 1–12.
8. Implementation of an elasto-viscoplastic constitutive law in Abaqus/Standard for an improved characterization of rock materials / S.K. Nguyen, G. Volonte, G. Musso, M. Brignoli, F. Gemelli, S. Mantica // Science in the age of experience. – 2016. – P. 1–15.
9. Modeling of waste injection in heterogeneous sand clay formations / S.P. Pozdnyakov, V.A. Bakshevskaia, A.A. Zubkov, V.V. Danilov, A.I. Rybalchenko, C.-F. Tsang // Underground Injection science and technology. – Berkeley, California, 2005. – P. 203–209.
10. Попов С.Н., Чернышов С.Е., Кривошеков С.Н. Сопоставительный анализ аналитического и численного методов расчета напряженно-деформированного состояния околоскважинной зоны на основе упругой модели с учетом основных конструктивных элементов скважины // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 5. – С. 94–102.
11. Попов С.Н. Определение коэффициента запаса прочности цементного камня на основе численного моделирования напряженно-деформированного состояния околоскважинной зоны с учетом изменения упруго-прочностных свойств цемента в процессе его твердения и под воздействием кислотного реагента // SOCAR Proceeding. – 2021. – SI № 2. – С. 8–16.

12. Попова М.С., Харитонов А.Ю. Компьютерное моделирование процессов, протекающих при бурении скважин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 12. – С. 18–27.
13. Хабибуллин М.А. Исследование механизма разрушения призабойной зоны фильтрационным потоком пластовой жидкости и предотвращение пробкообразования в скважине // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 10. – С. 86–94.
14. Zoback M. D. Reservoir geomechanics. – Cambridge, U.K.: Cambridge University press, 2007. – 505 p.
15. Petroleum related rock mechanics / E. Fjear, R.M. Holt, P. Horsrud, A.M. Raaen, R. Risnes. – Amsterdam: Elsevier, 2008. – 492 p.
16. Расчет устойчивости ствола скважины для предотвращения осложнений при бурении / С.В. Лукин, С.В. Есипов, В.В. Жуков, Ю.В. Овчаренко, А.Ю. Хомутов, Т.Н. Шевчук, И.В. Сусляков // Нефтяное хозяйство. – 2016. – № 6. – С. 70–73.
17. Развитие комплексного геомеханического моделирования в ПАО «Газпром нефть» / А.А. Вашкевич, В.В. Жуков, Ю.В. Овчаренко, А.С. Бочков, С.В. Лукин // Нефтяное хозяйство. – 2016. – № 12. – С. 16–19.
18. Talreja R., Bahuguna S., Havelia K. Merits of 3D numerical over 1D analytical geomechanics solution for a complex subsurface // SPE oil and gas conference and Exhibition. – Mumbai, 2019. – P. 1–16. SPE 194693.
19. Zienkiewicz O.C. The finite element method. – London: McGraw-Hill, 1977. – 787 p.
20. Settari A., Walters D. A. Advances in coupled geomechanical and reservoir modeling with applications to reservoir compaction // SPE Reservoir Simulation Symposium: Proceedings. – Houston, 1999. – P. 1–13. SPE-51927-MS.
21. Charlez Ph. Rock mechanics: petroleum applications. – Paris: Editions Technip, 1997. – Vol. 2. – 661 p.
22. Справочник по механике и динамике грунтов / В.Б. Шве́ц, Л.К. Гинзбург, В.М. Гольдштейн, В.К. Капустин, В.И. Фелкин, Н.С. Шве́ц. – К.: Будівельник, 1987. – 232 с.
23. Распределение и корреляция показателей физических свойств горных пород / Н.В. Мельников, В.В. Ржевская, М.М. Протодяконов, Р.И. Тедер. – М.: Недра, 1981. – 192 с.
24. Budhu M. Soil mechanics fundamental. – Chichester: John Wiley & Sons, 2015. – 342 p.

Информация об авторах

Сергей Николаевич Попов, доктор технических наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией нефтегазовой механики и физико-химии пласта Института проблем нефти и газа Российской академии наук, Россия, 119333, г. Москва, ул. Губкина, 3. porov@ipng.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1110-7802>

Олег Николаевич Кокорев, главный специалист-гидрогеолог филиала «Северский», Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами, Россия, 636035, г. Северск, пр. Коммунистический, 8. Kokorev.podzemgazprom@yandex.ru

Тарас Юрьевич Заведий, кандидат геолого-минералогических наук, инженер-технолог отдела экологического контроля АО «Сибирский химический комбинат», Россия, 636039, г. Северск, ул. Курчатова, 1. TYZavedy@rosatom.ru

Александр Ильич Маневич, научный сотрудник лаборатории геодинамики Геофизического Центра РАН, Россия, 119296, г. Москва, ул. Молодежная, 3. ai.manevich@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7486-6104>

Поступила в редакцию: 13.12.2023

Поступила после рецензирования: 09.01.2024

Принята к публикации: 19.09.2024

REFERENCES

1. Rybalchenko A.I., Kurochkin V.M. Experience of research and practical work in the field of disposal of liquid radioactive waste and industrial wastewater from nuclear industry enterprises. *Gornyi Zhurnal*, 2021, no. 3, pp. 99–103.
2. Malyshev S.Yu., Kokorev O.N., Gordeev V.F., Zavediy T.Yu., Polivach V.I., Manevich A.I. Evaluation of the impact of injection of liquid radioactive waste on the change in the stress-strain state of a rock mass. *Prospect and Protection of Mineral Resources*, 2023, no. 4, pp. 43–48. (In Russ.)
3. Zubkov A.A., Rybalchenko A.I., Rumynin V.G., Tokarev I.V., Danilov V.V., Sukhorukov V.A., Zakharova E.V., Aleksandrova L.N. Analysis of the system of geotechnological monitoring of the underground disposal ground of liquid radioactive waste of the SCP. *Prospect and Protection of Mineral Resources*, 2007, no. 11, pp. 56–61. (In Russ.)
4. Kokorev O.N., Adonin N.R., Noskov M.D., Zavediy T.Y., Schipkov A.A. An automated system of hydrodynamic monitoring for the environmental safety of a geological repository of LRW. *Russian Physics Journal*, 2021, no. 2-2 (759), pp. 46–51. (In Russ.)
5. Pron L.A., Tkachenko A.V., Martyanov V.V., Trofimova Iu.V., Yakovleva I.V. An approach to monitoring of the geosphere and underground engineer barrier system of deep geological injection facilities and some results of monitoring. *Radioactive Waste*, 2018, no. 4 (5), pp. 42–48. (In Russ.)
6. Arutyunyan R.V., Bogatov S.A., Gavrilov S.L., Egorova M.E., Kiselev V.P., Konoplev A.V., Kuzmin V.N., Odionov B.V., Shikin S.A. Development of automated radiation monitoring system for facilities involved in complex decommissioning of nuclear submarines and spent nuclear fuel and radwaste management. *Thermal Engineering*, 2009, no. 6, pp. 78–86. (In Russ.)
7. Ranjbar A., Hassani H., Kourosh S. 3D geomechanical modelling and estimating the compaction and subsidence of Fahlian reservoir formation. *Arabian Journal of Geoscience*, 2017, no. 10 (116), pp. 1–12.

8. Nguyen S.K., Volonte G., Musso G., Brignoli M., Gemelli F., Mantica S. Implementation of an elasto-viscoplastic constitutive law in Abaqus/Standard for an improved characterization of rock materials. *Science in the age of experience (Conference paper)*. 2016. pp. 1–15.
9. Pozdnyakov S.P., Bakshevskaya V.A., Zubkov A.A., Danilov V.V., Rybalchenko A.I., Tsang C.-F. Modeling of waste injection in heterogeneous sand clay formations. *Underground Injection science and technology*. Berkeley, 2005. pp. 203–209.
10. Popov S.N., Chernyshov S.E., Krivoshchekov S.N. Comparative analysis of the analytical and numerical methods for calculating the stress-strain state of the near-wellbore zone based on the elastic model taking into account the main structural elements of the well. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 5, pp. 94–102. (In Russ.)
11. Popov S.N. Geomechanical modeling and the casing stability analysis in conditions of partial absence of cement stone. *SOCAR Proceeding*, 2021, S.I. no. 2, pp. 34–40. (In Russ.)
12. Popova V.S., Kharitonov A.Yu. Computer simulation of processes at well drilling. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 12, pp. 18–27. (In Russ.)
13. Khabibullin M.Ya. Research of a reservoir bottom zone destruction by filtering flow of the formation liquid and prevention of call formation in the well. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 10, pp. 86–94. (In Russ.)
14. Zoback M. D. *Reservoir geomechanics*. Cambridge, U.K., Cambridge University press, 2007. 505 p.
15. Fjear E., Holt R.M., Horsrud P., Raaen A.M., Risnes R. *Petroleum related rock mechanics*. Amsterdam, Elsevier, 2008. 492 p.
16. Lukin S.V., Esipov S.V., Zhukov V.V., Ovcharenko Yu.V., Khomutov A.Yu., Shevchuk T.N., Suslyakov I.V. Borehole stability prediction to avoid drilling failures. *Neftyanoe Khozyaystvo – Oil Industry*, 2016, no. 6, pp. 70–73. (In Russ.)
17. Vashkevich A.A., Zhukov V.V., Ovcharenko Yu.V., Bochkov A.S., Lukin S.V. Development of integrated geomechanical modeling in Gazprom нефть PJSC. *Neftyanoe Khozyaystvo – Oil Industry*, 2016, no. 12, pp. 16–19. (In Russ.)
18. Talreja R., Bahuguna S., Havelia K. Merits of 3D numerical over 1D analytical geomechanics solution for a complex subsurface. *SPE oil and gas conference and Exhibition*. Mumbai, 2019. pp. 1–16. SPE 194693.
19. Zienkiewicz O. C. *The finite element method*. London, McGraw-Hill, 1977. 787 p.
20. Settari A., Walters D.A. Advances in coupled geomechanical and reservoir modeling with applications to reservoir compaction. *SPE Reservoir Simulation Symposium: Proceedings*. Houston, 1999. pp. 1–13. SPE-51927-MS.
21. Charlez Ph. *Rock mechanics: petroleum applications*. Paris, Editions Technip, 1997. Vol. 2, 661 p.
22. Shvets V.B., Ginzburg L.K., Goldstein V.M., Kapustin V.K., Felkin V.I., Shvets N.S. *Handbook of soil mechanics and dynamics*. Kiev, Budivelnik Publ., 1987. 232 p. (In Russ.)
23. Melnikov N.V., Rzhetskaya V.V., Protodyakonov M.M., Teder R.I. *Distribution and correlation of indicators of physical properties of rocks*. Moscow, Nedra Publ., 1981. 192 p. (In Russ.)
24. Budhu M. *Soil mechanics fundamental*. Chichester, John Wiley & Sons, 2015. 342 p.

Information about the authors

Sergey N. Popov, Dr. Sc., Chief Researcher, Head of the Laboratory, Oil and Gas Research Institute of Russian Academy of Science, 3, Gubkin street, Moscow, 119333, Russian Federation. popov@ipng.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1110-7802>

Oleg N. Kokorev, Chief Specialist-Hydrogeologist, “Seversky” branch, National operator for radioactive waste management, 8, Kommunistichesky avenue, Seversk, 636035, Russian Federation. Kokorev.podzemgazprom@yandex.ru

Taras Y. Zavedy, Cand. Sc., Engineer-Technologist, Siberian chemical plant, 1, Kurchatov street, Seversk, 636039, Russian Federation. TYZavedy@rosatom.ru

Alexander I. Manevich, Researcher, Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences, 3, Molodezhnaya street, Moscow, 119296, Russia. ai.manevich@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7486-6104>

Received: 13.12.2023

Revised: 09.01.2024

Accepted: 19.09.2024

УДК 622.279
DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4474
Шифр специальности ВАК: 25.00.17

Устройство для предотвращения формирования жидкостных пробок в системе сбора газа или в непрямолинейной газовой скважине

Д.Р. Муктасипов[✉], Е.У. Сафиуллина

Санкт-Петербургский горный университет, Россия, г. Санкт-Петербург

[✉]chuxarev96@mail.ru

Аннотация. Актуальность. Практически все газовые месторождения как в России, так и в мире разрабатываются в условиях водонапорного режима, а значит рано или поздно оператор месторождения сталкивается с проблемой обводнения скважин и накопления жидкости на их забое. Предлагаемые на данном этапе развития науки и техники способы борьбы и используемые для этого полезные модели и изобретения хоть и показывают свою эффективность по выносу капельной жидкости из ствола добывающей скважины, но не способствуют дальнейшему продвижению вынесенного флюида по системе сбора и подготовки продукции. Из-за этого возникает ряд проблем, например, формирование местных сопротивлений в виде ледяных или гидратных пробок, причиной возникновения которых является вынесенная из ствола скважины жидкость. **Цель.** Разработка универсального устройства, которое может быть использовано как в системе сбора и подготовки продукции, так и внутри добывающих скважин, способное инжектировать попутно добываемую воду в поток газа с целью предотвращения образования «застойных зон» жидкости. **Методы.** Оценка и анализ существующих устройств для предотвращения формирования жидкостных пробок в системе сбора газа с выявлением их основных недостатков, а также математическое моделирование предлагаемой модели, в которой эти недостатки устранены. **Результаты и выводы.** Дана краткая характеристика исследуемой проблемы; изучены и рассмотрены основные способы предотвращения формирования жидкостных пробок, применяемые на газовых месторождениях как в России, так и в других странах; предложена конструкция универсального устройства, которое лишено основных выделенных недостатков устройств-аналогов, а также произведен его упрощенный математический расчет.

Ключевые слова: замерзание системы сбора газа, обводнение газовых скважин, жидкостные пробки, диспергатор, турбулизатор потока, потери напора газа, вынос жидкости из ствола газовой скважины

Для цитирования: Муктасипов Д.Р., Сафиуллина Е.У. Устройство для предотвращения формирования жидкостных пробок в системе сбора газа или в непрямолинейной газовой скважине // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 10. – С. 111–119. DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4474

UDC 622.279
DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4474

Device for preventing the formation of liquid plugs in a gas collection system or in a non-straight gas well

D.R. Muktasipov[✉], E.U. Safiullina

St. Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russian Federation

[✉]chuxarev96@mail.ru

Abstract. Relevance. Almost all gas fields, both in Russia and in the world, are developed under water-pressure conditions, which means that sooner or later the field operator is faced with the problem of well watering and liquid accumulation at their bottom. The control methods proposed at this stage of development of science and technology and the useful models and inventions applied for this, although they show their effectiveness in removing droplet liquid from the production well-bore, do not contribute to the further advancement of the removed fluid through the system for collecting and preparing

products. Because of this fact, a number of problems arise, for example, the formation of local resistance in the form of ice or hydrate plugs, the cause of which is the fluid removed from the wellbore. **Aim.** Development of a universal device that can be used both in the production collection and preparation system and inside production wells, capable of injecting produced water into the gas flow in order to prevent the formation of “stagnant zones” of liquid. **Objects.** Flooded gas wells, the gas pressure in which is not enough to remove droplet liquid from the wellbore or transport this liquid to the place of product preparation. **Methods.** Assessment and analysis of existing devices to prevent the formation of liquid plugs in a gas collection system, identifying their main shortcomings, as well as mathematical modeling of the proposed model, in which these shortcomings are eliminated. **Results and conclusions.** The paper introduces a brief description of the problem under study and studies and discusses the main methods of preventing the formation of liquid plugs, used in gas fields both in Russia and in other countries. The authors have proposed the design of a universal device, which is devoid of the main identified disadvantages of analogue devices, and carried out its simplified mathematical calculation.

Keywords: freezing of a gas collection system, watering of gas wells, liquid plugs, dispersant, flow turbulator, gas pressure loss, liquid removal from a gas wellbore

For citation: Muktasipov D.R., Safiullina E.U. Device for preventing the formation of liquid plugs in a gas collection system or in a non-straight gas well. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 10, pp. 111–119. DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4474

Введение

Современные условия разработки газовых и газоконденсатных месторождений характеризуются значительными трудностями: распространением преимущественно низкопроницаемых коллекторов [1], падением добычи газа и конденсата, выработкой значительной части запасов, трудностями в подборе жидкости глушения с минимальной кольматацией призабойной зоны [2], снижением пластового давления, изношенностью эксплуатационного фонда [3], необходимостью минимизации углеродного следа [4], истощением сырьевой базы Российской Федерации [5]. Так как по мере отбора газа из продуктивного пласта газодоянный контакт (ГВК) поднимается и увеличивается относительная фазовая проницаемость по воде [6], оператор месторождения неизбежно сталкивается с процессом обводнения практически всего фонда газовых скважин [7]. Это значительно усложняет условия эксплуатации, требует значительных затрат для очистки и подготовки попутно добываемой воды [8], удорожает себестоимость добычи и вызывает ряд сопутствующих проблем, связанных с добычей и транспортировкой полезного ископаемого (например, увеличивается вероятность образования газовых гидратов как внутри скважины, так и в системе устьевых трубопроводов [9]). Поэтому в современной промышленной практике известны разнообразные по своей природе способы удаления жидкости с забоя газовых скважин, среди которых [10]:

- продувка скважины в атмосферу или в горизонтальную факельную установку;
- введение газа в затрубное пространство добывающей скважины (газлифт) [11];
- применение концентрических лифтовых колонн (КЛК);
- применение твердых и жидких поверхностно-активных веществ (ПАВ) [12];

- плунжерный лифт [13];
- использование глубинного насоса [14].

Большинство из применяемых способов не раз доказали свою эффективность по выносу капельной жидкости из ствола скважины на разных газовых промыслах по всей территории России [15]. Но перечисленные выше способы лишь доставляют скопившуюся на забое жидкость до устья скважины, которое зачастую не оборудовано специальными устройствами для приема или утилизации попутной воды, поэтому поднимаемая жидкость поступает в систему трубопроводов вместе с добываемым газом и транспортируется до установки комплексной подготовки газа (УКПГ) [16]. В связи с этим возникает ряд трудностей, связанных, например, с обмерзанием внутрипромысловых трубопроводов и манифольдов скважин, мониторинг которых требует высокотехнологичного оборудования и значительных затрат [17]. Это становится возможным из-за того, что зачастую расстояния от устья скважины до УКПГ являются значительными, а напора добываемого газа не хватает для транспортировки всей выносимой жидкости, так как она не диспергирована в потоке добываемого флюида. То же самое можно сказать для непрямолинейного участка газовой скважины, где иногда случается так, что напора газа не хватает для выноса жидкости из ствола скважины [18]. В результате образуются локальные скопления капельной жидкости (застойные зоны), которая в условиях низких температур быстро замерзает с образованием «ледяных пробок» (внутри скважины же вырастает вероятность образования газовых гидратов), препятствующих нормальной разработке газовой залежи (проходное сечение трубопроводов или участка скважины сужается вплоть до полного перекрытия потока). В результате компания должна тратить значительные средства на поиск таких пробок и их устранение [19].

Существующие способы решения проблемы

Для того чтобы предложить рациональное решение существующей проблемы, необходимо провести детальный анализ существующих на данный момент устройств. Укрупненно все современные решения можно поделить на две большие группы: внутрискважинные (хорошо реализуемые именно в вертикальных трубопроводах) и поверхностные (лучше показывают свою эффективность именно в горизонтальных трубопроводах).

Что касается внутрискважинных устройств, можно сказать, что они не получили широкого распространения. Одним из наиболее известных устройств такого типа является диспергатор для выноса водных скоплений из газовых скважин. Общий вид представлен на рис. 1 [20].

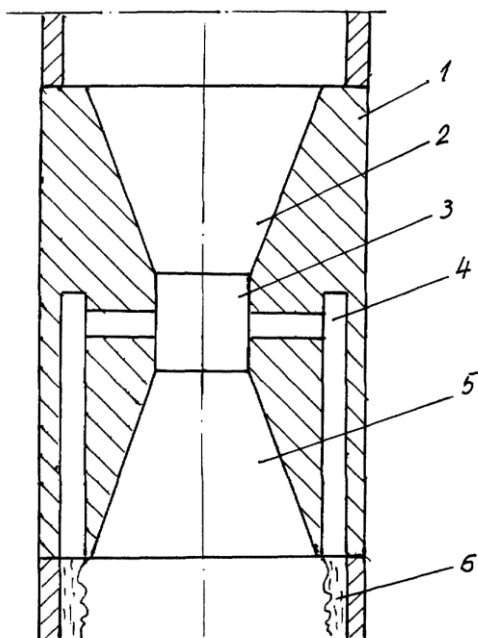


Рис. 1. Диспергатор для выноса водных скоплений из газовых скважин [20] (1 – корпус; 2, 5 – усеченные конусы; 3 – цилиндрическая вставка; 4 – каналы)

Fig. 1. Dispersant for removing water accumulations from gas wells [20] (1 – body; 2, 5 – truncated cones; 3 – cylindrical insert; 4 – channels)

Принцип работы устройства основан на законе Бернулли: в широкой части скорость потока газа ниже, но давление выше, а в цилиндрической вставке – 3, наоборот, скоростной напор газа становится выше с некоторым снижением пьезометрического напора. В результате образуется разность давлений, благодаря которой скопившаяся жидкость по каналам – 4 поступает в цилиндрическую вставку – 3, где происходит впрыскивание. Недостатком данного устройства является низкое качество смешивания жидкости и газа ввиду сла-

бой турбулизации потока. Более того, расположенные по всей окружности каналы для впрыскивания жидкости значительно уменьшают эффективную площадь трубопровода, что приводит к значительным потерям напора газа [21].

Другим не менее известным внутрискважинным устройством является диспергатор в виде кольца с конусообразной поверхностью, который устанавливается каждые 200–250 м внутри основной лифтовой колонны (ОЛК) при эксплуатации скважины по технологии КЛК. Общий вид представлен на рис. 2 [22].

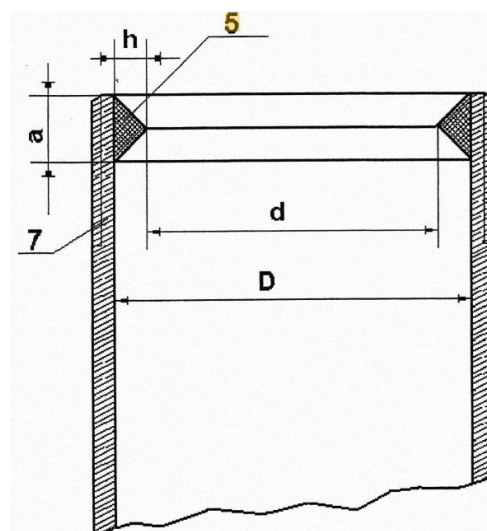


Рис. 2. Диспергатор в виде кольца с конусообразной поверхностью [22] (5 – диспергаторное кольцо; 7 – торец ОЛК; а – ширина кольца; h – высота конуса кольца; D, d – внутренний и внешний диаметры кольца соответственно)

Fig. 2. Dispersant in the form of a ring with a cone-shaped surface [22] (5 – dispersant ring; 7 – MPS end; a – ring width; h – ring cone height; D, d – inner and outer diameters of the ring, respectively)

Принцип работы диспергаторного кольца основан на явлении гидродинамической неустойчивости Рэлея–Тейлора и связанного с ней турбулентного перемешивания. Такое кольцо позволяет вернуть в поток восходящего газа стекающую по стенкам вниз жидкость, тем самым обеспечив ее полное извлечение из ствола скважины. Очевидным недостатком данного устройства является невозможность его применения на горизонтальных участках скважины и трубопроводах, а также значительные потери давления при большой глубине залежи.

Говоря о поверхностных устройствах, наибольшее распространение из них получили устройства вихревого типа (рис. 3, слева [23]), различные варианты миксеров (рис. 3, справа [24]), а также обору-

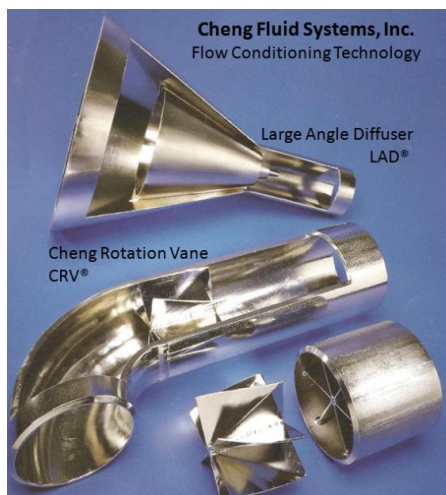


Рис. 3. Устройства для преобразования расслоенного потока в дисперсный [23, 24]

Fig. 3. Devices for converting stratified flow into dispersed flow [23, 24]

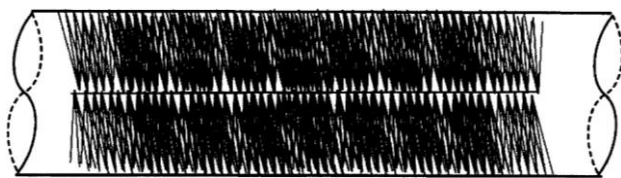


Рис. 4. Устройство в виде вращающейся щетки [24]

Fig. 4. Device in the form of a rotating brush [24]

Принцип работы всех представленных выше устройств схож: они предназначены для турбулизации потока с целью перемешивания газовой и жидких фаз. Общий недостаток всех турбулизаторов такого типа – большая площадь соприкосновения с потоком добываемого флюида и, как следствие, значительные потери напора на этом участке.

Исходя из анализа существующих решений, можно кратко сформулировать требования, предъявляемые к универсальному устройству для предотвращения формирования жидкостных про-

бок в системе сбора газа или в непрямолинейной газовой скважине:

- 1) предлагаемое устройство должно быть применимо на горизонтальных участках скважин и наземных трубопроводах системы сбора газа;
- 2) устройство должно хорошо турбулизировать поток, чтобы обеспечить диспергирование капель жидкости в потоке газа;
- 3) потери напора на устройстве не должны быть значительными.

Предлагаемое устройство

Основываясь на приведенных требованиях, предлагается использовать запатентованное авторами устройство [25], которое представлено на рис. 5.

Устройство работает следующим образом. Корпус устройства – 1 устанавливается вместо участка трубопровода системы сбора газа или как участок горизонтального окончания газовой скважины. Для предотвращения излишних потерь напора рекомендуется принимать длину устройства $l_y \geq 5d_{тр}$, где $d_{тр}$ – наружный диаметр трубопровода (скважины) [26]. Поток газа из скважины попадает во входную часть – 2. Ее наибольший линейный размер $l_{вх} \geq 0,85d_{тр}$ выбирается также из соображения минимизации потерь напора газа.

Для описания работы устройства необходимо применить закон Бернулли к данному случаю (потери напора по длине здесь пренебрежимо малы [27], поэтому они не учитываются):

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{u_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{u_2^2}{2g} + \frac{\xi u_2^2}{2g}, \quad (1)$$

где p_1 – избыточное давление потока газа во входной части, Па; u_1^2 – скорость газа во входной части, $\frac{м}{с}$; p_2 – избыточное давление потока газа в узкой части, Па; u_2^2 – скорость газа в узкой части, $\frac{м}{с}$; ρ – плотность газа (ввиду малого изменения давления принимается постоянной), $\frac{кг}{м^3}$; ξ – коэффициент местных потерь давления [28].

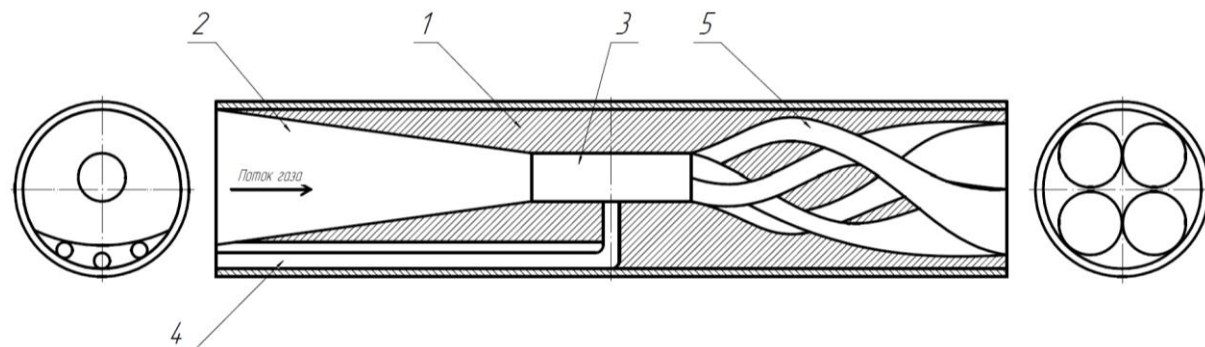


Рис. 5. Предлагаемое устройство (1 – корпус; 2 – входная часть; 3 – узкая часть; 4 – каналы для впрыскивания жидкости; 5 – турбулизирующие каналы)

Fig. 5. Proposed device (1 – body; 2 – inlet part; 3 – narrow part; 4 – channels for liquid injection; 5 – turbulizing channels)

Согласно этому закону, при движении газа во входной части – 2 его давление уменьшается, а скорость увеличивается. Максимальную скорость u_2^2 и минимальное давление p_2 поток газа будет иметь как раз в узкой части – 3. В результате этого образуется некоторая разность давлений Δp :

$$\Delta p = p_1 - p_2. \quad (2)$$

Эта разность давлений заставит двигаться скопившуюся в трубопроводе (скважине) жидкость по каналам для впрыскивания жидкости – 4, в конце которых эта жидкость инжектируется в поток газа в узкой части – 3 [29]. Каналы для впрыскивания жидкости – 4 расположены в нижней части устройства, так как внутри трубопровода существует гравитационное расслоение потока газа и жидкости. Их количество зависит от суточного объема вынесенной из скважины жидкости (в представленном примере их три).

После этого поток газа вместе с впрыснутой в него жидкостью попадают в турбулизирующие каналы – 5, где происходит их взаимное перемешивание для более надежной диспергации капель жидкости в потоке газа и предотвращения дальнейшего расслоения. Турбулизирующие каналы представляют собой расширяющиеся винтовые трубопроводы, которые в конце соединяются в один поток. В приведенном примере устройство содержит четыре таких турбулизирующих канала. Такое количество каналов обусловлено необходимостью минимизации пульсации трубопроводов в условиях их прокладки на участках с мерзлыми грунтами [30].

После прохождения через представленное устройство поток газа с диспергированной в нем жидкостью доходит до УКПГ, где происходит их разделение.

Далее необходимо провести расчет устройства. Для примера использована скважина с устойчивым выносом жидкости на Ямбургском нефтегазоконденсатном месторождении [31]. Подразумевается установка устройства в качестве участка газосборного коллектора (ГСК) на кусте скважин. Исходные данные: давление в ГСК – $p_{\text{ГСК}}=2$ МПа; $T_{\text{ГСК}}=273$ К; $T_{\text{кр}}=190,49$ К; $p_{\text{кр}}=4,572$ МПа; $\rho_{\text{Г}}=0,677 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, $\rho_{\text{В}}=1017 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; $d_{\text{ГСК}}=0,2$ м, $Q_{\text{Г}}=4160 \frac{\text{м}^3}{\text{ч}}$, $Q_{\text{В}}=20 \frac{\text{м}^3}{\text{сут}}$.

Суть расчета сводится к вычислению разности давлений Δp по формуле (2), чтобы оценить эффективность инъекции жидкости в поток газа. Для этого необходимо рассчитать давление в узкой части – 3, что можно сделать при помощи уравнения (1). Скорость газа в трубопроводе определяется по формуле [32]:

$$u = 0,1273 \frac{QzT}{Pd^2}, \quad (3)$$

где u – скорость потока, $\frac{\text{м}}{\text{с}}$; Q – дебит газа, $\frac{\text{м}^3}{\text{ч}}$; T – температура газа, К; z – коэффициент сверхсжимаемости газа; P – давление газа, МПа; d – внутренний диаметр трубопровода, мм.

Коэффициент сверхсжимаемости газа определяется по зависимости Платонова–Гуревича [33]:

$$z = (0,4 \cdot \lg(T_{\text{пр}}) + 0,73)^{P_{\text{пр}}} + 0,1 \cdot P_{\text{пр}},$$

где $T_{\text{пр}}$ – приведенная температура,

$$T_{\text{пр}} = \frac{T_{\text{Г}}}{T_{\text{кр.см}}} = \frac{273}{190,49} = 1,433;$$

$P_{\text{пр}}$ – приведенное давление,

$$P_{\text{пр}} = \frac{P_{\text{Г}}}{P_{\text{кр.см}}} = \frac{2}{4,572} = 0,437;$$

$$z = (0,4 \cdot \lg T_{\text{пр}} + 0,73)^{P_{\text{пр}}} + 0,1 \cdot P_{\text{пр}} = 0,947;$$

$$u_2 = 0,1273 \frac{QzT}{P_2 d^2} = 0,1273 \frac{4160 \cdot 0,947 \cdot 273}{2 \cdot 200^2} = 1,78 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Таким образом, скорость в ГСК потока газа равна $1,78 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Известно, что максимально допустимая скорость газа в газопроводах составляет $25 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ [34]. Зная этот параметр и приняв его за максимально допустимую скорость в узкой части – 3, при помощи формулы (3) можно рассчитать диаметр узкой части – 3. Он равен $d_2=60$ мм.

Значение коэффициента местных сопротивлений ξ выбирается исходя из рекомендаций, основанных на изменении диаметров сечений и плавности их изменения [35], и определяется $\xi = 0,1$.

Плотность газа рассчитывается через уравнения состояния реального газа. При заданных термобарических условиях она равна $\rho_{\text{Г}}=12,631 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

Подставляя имеющиеся значения в уравнение Бернулли, можно найти давление в узкой части – 3:

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{u_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{u_2^2}{2g} + \frac{\xi u_2^2}{2g} \Rightarrow p_2 = \left(\frac{p_1}{\rho g} + \frac{u_1^2}{2g} - \frac{u_2^2}{2g} - \frac{\xi u_2^2}{2g} \right) \cdot \rho g = 1,997 \text{ МПа}.$$

Имеющаяся разность давлений:

$$\Delta p = p_1 - p_2 = 2758,88 \text{ Па}.$$

Применив же уравнение Бернулли к скопившейся жидкости, можно рассчитать, с какой скоростью она будет двигаться по каналам всасывания – 4, и, как следствие, какой расход будет через эти каналы. Это уравнение запишется в виде (потери напора на местное сопротивление в каналах всасывания – 4 можно пренебречь ввиду малой величины):

$$\frac{p_1}{\rho_{\text{ж}} g} = 0,5 \cdot d_{\text{ГСК}} + \frac{p_2}{\rho_{\text{ж}} g} + \frac{u_{\text{в}}^2}{2g} + h_{\text{дл}},$$

где $h_{\text{дл}}$ – потери напора по длине, м; $u_{\text{в}}$ – скорость жидкости в узкой части – 3, $\frac{\text{м}}{\text{с}}$.

Пропуская промежуточные вычисления, рассчитывается скорость жидкости в узкой части – 3:

$$u_b = 0,313 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Тогда суточный расход воды через один канал всасывания жидкости:

$$q = u \cdot 0,25 \cdot \pi \cdot d^2$$

$$q = u \cdot 0,25 \cdot \pi \cdot d^2 = 8,51 \frac{\text{м}^3}{\text{сут}}$$

Тогда три канала всасывания жидкости способны инжектировать:

$$Q = 3 \cdot q = 25,53 \frac{\text{м}^3}{\text{сут}}$$

Таким образом, предлагаемое устройство способно инжектировать $25,53 \frac{\text{м}^3}{\text{сут}}$ выносимой жидкости в сутки, что больше заданного значения суточного дебита по жидкости, а значит оно работает эффективно.

Заключение

Проблема обводнения газовых скважин наблюдается повсеместно, поэтому разрабатыва-

ется все больше способов освобождения ствола газовой скважины от пластовой жидкости. Большинство из них действительно эффективны и способны продлить жизнь скважине, позволяя выносить капельную жидкость с их забоя. Но в то же время практически ни один из существующих способов не учитывает возможность дальнейшего продвижения вынесенной жидкости по системе сбора и подготовки продукции, из-за чего возникает ряд трудностей при эксплуатации газовых промыслов.

В данной работе предлагается применение универсального устройства для предотвращения формирования жидкостных пробок в системе сбора газа или в непрямолинейной газовой скважине, которое дополняет решение проблемы эксплуатации обводняющихся газовых скважин. Использование предлагаемого устройства с любым способом освобождения ствола скважины от скопившейся жидкости представляет собой комплексный подход в решении рассматриваемой проблемы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A laboratory approach to measure enhanced gas recovery from a tight gas reservoir during supercritical carbon dioxide injection / B.R. Syah, S. Alizadeh, K. Nurgalieva, J. Grimaldo, M. Nasution, A. Davarpanah, D. Ramdan, A. Metwally // Sustainability. – 2021. DOI: 10.3390/su132111606.
2. Complex algorithm for developing effective kill fluids for oil and gas condensate reservoirs / S. Islamov, A. Bondarenko, G. Korobov, D. Podoprigora // International Journal of Civil Engineering and Technology. – 2019. – Vol. 10. – P. 2697–2713. DOI: <http://www.iaeme.com/ijciet/issues.asp?JType=IJCIET&VType=10&IType=01>.
3. Гасумов Р.А., Минченко Ю.С., Гасумов Э.Р. Разработка технологических решений по надежному глушению скважин путем временного блокирования продуктивного пласта в условиях АНПД (на примере сеноманских газовых залежей) // Записки Горного института. – 2022. – Т. 258. – С. 895–905. DOI: <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.99>.
4. Reduction of carbon footprint of the production and field transport of high-viscosity oils in the arctic region / G. Buslaev, V. Morenov, Y. Konyaev, A. Kraslawski // Chemical Engineering and Processing – Process Intensification. – 2021. – Vol. 159. – P. 1–26. DOI: 10.1016/j.cep.2020.108189.
5. Bosikov I., Maier A. Comprehensive assessment and analysis of the oil and gas potential of meso-cenozoic sediments in the north Caucasus // Journal of Mining Institute. – 2021. – Vol. 251. – P. 648–657. DOI: 10.31897/PMI.2021.5.4.
6. Investigation of the origins of rapid gas-water contact rise and excess water production in naturally fractured reservoirs: a case study / M.G. Akbarifard, A. Azdarpour, Z.A. Aboosadi, B. Honarvar, M. Nabipour // Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects. – 2021. – P. 1–12. DOI: 10.1080/15567036.2021.1912854.
7. Сизова Е.М. Причины обводнения газовых скважин // Вопросы науки и образования. – 2017. – Т. 1. – С. 23–24. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29238324> (дата обращения: 08.10.2023).
8. Savenok O., Povarova L., Berezovsky D. Prospects for the use of physico-chemical and mathematical modeling for the development of highly efficient integrated technology for the treatment and preparation of produced waters // Ecology and Industry of Russia. – 2019. – Vol. 23. – P. 66–71. DOI: <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2019-3-66-71>.
9. Drilling in gas hydrates: managing gas appearance risks / R. Gizatullin, M. Dvoynikov, N. Romanova, V. Nikitin // Energies. – 2023. – Vol. 16. – P. 1–13. DOI: 10.3390/en16052387
10. Ли Дж. Эксплуатация обводняющихся газовых скважин. Технологические решения по удалению жидкости из скважин / Перевод с англ. – М.: ООО «Премиум Инжиниринг», 2008. – 384 р.
11. Nguyen V.T., Aleksandrov A., Rogachev M. An extensive solution to prevent wax deposition formation in gas-lift wells // Journal of Applied Engineering Science. – 2022. – Vol. 20. – P. 1–12. DOI: 10.5937/jaes0-31307. DOI:10.5937/jaes0-31307
12. Van 't Westende J., Ajani A., Kelkar M. The use of surfactants for gas well deliquification: a comparison of research projects and developed models // Paper presented at the 18th International Conference on Multiphase Production Technology. – Cannes, France, June 2017. – P. 161–182.
13. Beauregard E., Paul L. Introduction to plunger lift: applications, advantages and limitations // Paper presented at the SPE Rocky Mountain Regional Meeting. – Billings, Montana, May 1982. DOI: <https://doi.org/10.2118/10882-MS>.
14. Amani M. Hydraulic gas pump and gas well de-watering system: two new artificial-lift systems for oil and gas wells // Paper presented at the SPE Production Operations Symposium. – Oklahoma City, Oklahoma, March 1993. DOI: <https://doi.org/10.2118/25422-MS>.
15. Hutlas E.J., William R.G. A practical approach to removing gas well liquids // J Pet Technol. – 1972. – Vol. 24. – P. 916–922. DOI: <https://doi.org/10.2118/3473-PA>.

16. Коловертнов Г.Ю. Автоматизация процесса удаления жидкости из газовых скважин и шлейфов // Территория Нефтегаз. – 2015. – Т. 9. – С. 70–76. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/avtomatizatsiya-protsessa-udaleniya-zhidkosti-iz-gazovyh-skvazhin-i-shleyfov/viewer> (дата обращения: 10.10.2023).
17. Shammazov I., Dzhemilev E., Sidorkin D. Improving the method of replacing the defective sections of main oil and gas pipelines using laser scanning data // Applied Sciences (Switzerland). – 2023. – Vol. 13. – P. 1–26. DOI: 10.3390/app13010048.
18. Prediction onset and dynamic behaviour of liquid loading gas wells / S. Belfroid, W. Schiferli, G. Alberts, C. Veeken, E. Biezen // Paper presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition. – Denver, Colorado, USA, September 2008. DOI: <https://doi.org/10.2118/115567-MS>.
19. Яркеева Н.Р. Анализ опытно-промышленных испытаний по борьбе с гидратообразованиями на примере газоконденсатного месторождения в республике Казахстан // Нефтегазовое дело. – 2019. – Т. 17. – № 4. – С. 72–79. DOI: 10.17122/ngdelo-2019-4-72-79. – EDN SICJVJ.
20. Диспергатор для выноса водных скоплений из газовых скважин: пат. № 66413, Российская Федерация, U1; заявл. 13.04.2007; опубл. 10.09.2007, Бюл. № 25. – 5 с.
21. Comparison between Hazen–Williams and Darcy–Weisbach equations to calculate head loss through conveyancing treated wastewater in Kerbala City, Iraq / L.S. Abdulameer, N. Dzhumagulova, H. Algretawee, L. Zhuravleva, M.H. Alshammari // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2022. – Vol. 1. – P. 36–43. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.251385>.
22. Способ эксплуатации обводненной газовой или газоконденсатной скважины: пат. № 2708430, Российская Федерация, C1; заявл. 24.12.2018; опубл. 06.12.2019, Бюл. № 34. – 10 с.
23. Cheng fluid system. Flow conditioning technology: CRV & LAD. URL: http://www.chengfluid.com/flow_conditioner (дата обращения: 08.10.2023).
24. StaMIXco. Plug flow reactors. URL: <https://www.stamixco-usa.com/plug-flow-reactors> (дата обращения: 08.10.2023).
25. Устройство для предотвращения формирования жидкостных пробок: пат. № 221928, Российская Федерация, U1; заявл. 12.10.2023; опубл. 30.11.2023, Бюл. № 34. – 5 с.
26. Nikolaev A.K., Zaripova N.A. Substantiation of analytical dependences for hydraulic calculation of high-viscosity oil transportation // Journal of Mining Institute. – 2021. – Vol. 252. – P. 885–895. DOI: 10.31897/PMI.2021.6.10.
27. Urazakov K.R., Belozorov V.V., Latypov B.M. Study of the dynamics for gas accumulation in the annulus of production wells // Journal of Mining Institute. – 2021. – Vol. 250. – P. 606–614. DOI: 10.31897/PMI.2021.4.14.
28. Zmrhal V., Schwarzer J. Numerical simulation of local loss coefficients of ventilation duct fittings // Eleventh International IBPSA Conference. – Glasgow, Scotland, July 27–30, 2009. DOI: <https://www.researchgate.net/publication/266893943>.
29. Drozdov A.N., Gorelkina E.I. Development of a pump-ejector system for SWAG injection into reservoir using associated petroleum gas from the annulus space of production wells // Journal of Mining Institute. – 2022. – Vol. 254. – P. 191–201. DOI: 10.31897/PMI.2022.34.
30. Study of the effect of cutting frozen soils on the supports of above-ground trunk pipelines / I. Shammazov, A. Batyrov, D. Sidorkin, V.T. Nguyen // Applied Sciences. – 2023. – Vol. 13. – P. 1–18. DOI: 10.3390/app13053139.
31. Кузьмук Л.Г. Об особенностях обводнения скважин на периферийных участках сеноманской газовой залежи Ямбургского месторождения в процессе ее эксплуатации // Научно-технический сборник «Вести газовой науки». – 2010. – Т. 2. – С. 68–75.
32. ГОСТ Р 55472. Сети газораспределения природного газа. – М.: Стандартинформ, 2019. – 32 с.
33. Малышев В.Л., Моисеева Е.Ф. Анализ эффективности применения различных методов определения коэффициента сверхсжимаемости природного газа // XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики: Сборник трудов в 4-х т. – Уфа, 19–24 августа 2019. – Уфа: Башкирский гос. ун-т, 2019. – С. 1061–1062.
34. Ковалев Б.К. Определение пропускной способности трубопроводов ГПС // Вестник Газпроммаша/ – 2023. – Т. 5. URL: http://www.gazprommash.ru/factory/vestnik/vestnik5/vestnik5_st12/ (дата обращения: 17.10.2023).
35. Fayziev Z.Kh. Pressure losses in Venturi pipes, their rational forms and coefficients of local resistance // AIP Conf. Proc. – 2022. – Vol. 2762. – P. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0128505>.

Информация об авторах

Дамир Рустемович Муктасипов, студент кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений Санкт-Петербургского горного университета, Россия, 199106, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, 2. chuxarev96@mail.ru

Елена Улубековна Сафиуллина, кандидат технических наук, доцент кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений Санкт-Петербургского горного университета, Россия, 199106, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, 2. safiullinaeu@yandex.com

Поступила в редакцию: 22.11.2023

Поступила после рецензирования: 26.12.2023

Принята к публикации: 10.09.2024

REFERENCES

1. Syah B.R., Alizadeh S., Nurgalieva K., Grimaldo J., Nasution M. A laboratory approach to measure enhanced gas recovery from a tight gas reservoir during supercritical carbon dioxide injection. *Sustainability*, 2021, vol. 13, pp. 1–14. DOI: 10.3390/su132111606.
2. Islamov S., Bondarenko A., Korobov G., Podoprigora D. Complex algorithm for developing effective kill fluids for oil and gas condensate reservoirs. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 2019, vol. 10, pp. 2697–2713. DOI: <http://www.iaeme.com/ijciyet/issues.asp?JType=IJCIET&VType=10&ITType=01>.
3. Gasumov R.A., Minchenko Yu.S., Gasumov E.R. Development of technological solutions for reliable killing of wells by temporarily blocking the productive formation in ANPD conditions (using the example of Cenomanian gas deposits). *Journal of Mining Institute*, 2022, vol. 258, pp. 895–905. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.99>.
4. Buslaev G., Morenov V., Konyaev Y., Kraslawski A. Reduction of carbon footprint of the production and field transport of high-viscosity oils in the arctic region. *Chemical Engineering and Processing – Process Intensification*, 2021, vol. 159, pp. 1–26. DOI: 10.1016/j.cep.2020.108189.
5. Bosikov I., Maier A. Comprehensive assessment and analysis of the oil and gas potential of meso-cenozoic sediments in the north Caucasus. *Journal of Mining Institute*, 2021, vol. 251, pp. 648–657. (In Russ.) DOI: 10.31897/PMI.2021.5.4.
6. Akbarifard M.G., Azdarpour A., Aboosadi Z.A., Honarvar B., Nabipour M. Investigation of the origins of rapid gas-water contact rise and excess water production in naturally fractured reservoirs: a case study. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 2021, pp. 1–12. DOI: 10.1080/15567036.2021.1912854.
7. Sizova E.M. Reasons for water flooding of gas wells. *Questions of science and education*, 2017, vol. 1, pp. 23–24. (In Russ.) Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29238324> (accessed: 8 October 2023).
8. Savenok O., Povarov L., Berezovsky D. Prospects for the use of physico-chemical and mathematical modeling for the development of highly efficient integrated technology for the treatment and preparation of produced waters. *Ecology and Industry of Russia*, 2019, vol. 23, pp. 66–71. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2019-3-66-71>.
9. Gizatullin R., Dvoynikov M., Romanova N., Nikitin V. Drilling in gas hydrates: managing gas appearance risks. *Energies*, 2023, vol. 16, pp. 1–13. (In Russ.) DOI: 10.3390/en16052387.
10. Lee J. *Operation of flooded gas wells. Technological solutions for removing fluid from wells*. Translation from English. Moscow, Premium Engineering LLC Publ., 2008. 384 p. (In Russ.)
11. Nguyen V.T., Aleksandrov A., Rogachev M. An extensive solution to prevent wax deposition formation in gas-lift wells. *Journal of Applied Engineering Science*, 2022, vol. 20, pp. 1–12. DOI: 10.5937/jaes0-31307. DOI:10.5937/jaes0-31307.
12. Van't Westende J., Ajani A., Kelkar M. The use of surfactants for gas well deliquification: a comparison of research projects and developed models. *Paper presented at the 18th International Conference on Multiphase Production Technology*. Cannes, France, June 2017. pp. 161–182.
13. Beauregard E., Paul L. Introduction to plunger lift: applications, advantages and limitations. *Paper presented at the SPE Rocky Mountain Regional Meeting*. Billings, Montana, May 1982. DOI: <https://doi.org/10.2118/10882-MS>.
14. Amani M. Hydraulic gas pump and gas well de-watering system: two new artificial-lift systems for oil and gas wells. *Paper presented at the SPE Production Operations Symposium*. Oklahoma City, Oklahoma, March 1993. DOI: <https://doi.org/10.2118/25422-MS>.
15. Hutlas E.J., William R.G. A practical approach to removing gas well liquids. *J Pet Technol.*, 1972, vol. 24, pp. 916–922. DOI: <https://doi.org/10.2118/3473-PA>.
16. Kolovertnov G.Yu. Automation of the process of removing liquid from gas wells and plumes. *Territory Neftegaz*, 2015, vol. 9, pp. 70–76. (In Russ.) Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/avtomatizatsiya-protsessa-udaleniya-zhidkosti-iz-gazovyh-skvazhin-i-shleyfov/viewer> (accessed: 10 October 2023).
17. Shammazov I., Dzhemilev E., Sidorkin D. Improving the method of replacing the defective sections of main oil and gas pipelines using laser scanning data. *Applied Sciences (Switzerland)*, 2023, vol. 13, pp. 1–26. DOI: 10.3390/app13010048.
18. Belfroid S., Schiferli W., Alberts G., Veeken C., Biezen E. Prediction onset and dynamic behaviour of liquid loading gas wells. *Paper presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Denver, Colorado, USA, September 2008. DOI: <https://doi.org/10.2118/115567-MS>.
19. Yarkееva N.R. Analysis of pilot tests to combat hydrate formations using the example of a gas condensate field in the Republic of Kazakhstan. *Oil and Gas Business*, 2019, vol. 17, pp. 72–79. DOI: 10.17122/ngdelo-2019-4-72-79.
20. Gumerov A.G. *Dispersant for removing water accumulations from gas wells*. Patent RF, no. 66413, 2007. (In Russ.)
21. Abdulameer L.S., Dzhumagulova N., Algretawee H., Zhuravleva L. Comparison between Hazen–Williams and Darcy–Weisbach equations to calculate head loss through conveyancing treated wastewater in Kerbala City, Iraq. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2022, vol. 1, pp. 36–43. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.251385>.
22. Sarkarov R.A., Seleznev V.V. *Method of operating a water-flooded gas or gas condensate well*. Patent RF, no. 270843, 2018. (In Russ.)
23. Cheng fluid system. *Flow conditioning technology: CRV & LAD*. Available at: http://www.chengfluid.com/flow_conditioner (accessed 8 October 2023).
24. StaMIXco. *Plug flow reactors*. Available at: <https://www.stamixco-usa.com/plug-flow-reactors> (accessed 8 October 2023).
25. Muktasipov D.R. *Device for preventing the formation of liquid plugs*. Patent RF, no. 221928, 2023. (In Russ.)
26. Nikolaev A.K., Zaripova N.A. Substantiation of analytical dependences for hydraulic calculation of high-viscosity oil transportation. *Journal of Mining Institute*, 2021, vol. 252, pp. 885–895. DOI: 10.31897/PMI.2021.6.10.
27. Urazakov K.R., Belozero V.V., Latypov B.M. Study of the dynamics for gas accumulation in the annulus of production wells. *Journal of Mining Institute*, 2021, vol. 250, pp. 606–614. DOI: 10.31897/PMI.2021.4.14.
28. Zmrhal V., Schwarzer J. Numerical simulation of local loss coefficients of ventilation duct fittings. *Eleventh International IBPSA Conference*. Glasgow, Scotland, July 27–30, 2009. DOI: <https://www.researchgate.net/publication/266893943>

29. Drozdov A.N., Gorelkina E.I. Development of a pump-ejector system for SWAG injection into reservoir using associated petroleum gas from the annulus space of production wells. *Journal of Mining Institute*, 2022, vol. 254, pp. 191–201. DOI: 10.31897/PMI.2022.34
30. Shammazov I., Batyrov A., Sidorkin D., Nguyen V. T. Study of the effect of cutting frozen soils on the supports of above-ground trunk pipelines. *Applied Sciences*, 2023, vol. 13, pp. 1–18. DOI: 10.3390/app13053139.
31. Kuzmuk L.G. On the peculiarities of watering wells in the peripheral areas of the Cenomanian gas deposit of the Yamburg field during its operation. *Scientific and technical collection "News of Gas Science"*, 2010, vol. 2, pp. 68–75. (In Russ.)
32. SS R 55472. *Natural gas distribution networks*. Moscow, Standartinform Publ., 2019. 32 p. (In Russ.)
33. Malyshev V.L. Analysis of the effectiveness of using various methods for determining the supercompressibility coefficient of natural gas. *XII All-Russian Congress on fundamental problems of theoretical and applied mechanics. Collection of works in 4 vol.* Ufa, August 19–24, 2019. Ufa, Bashkir State University Publ., 2019. pp. 1061–1062. (In Russ.)
34. Kovalev B.K. Determination of the throughput capacity of GDS pipelines. *Bulletin of Gazprommash*, 2023, vol. 5. (In Russ.) Available at: http://www.gazprommash.ru/factory/vestnik/vestnik5/vestnik5_st12/ (accessed: 10 November 2023).
35. Fayziev Z.Kh. Pressure losses in Venturi pipes, their rational forms and coefficients of local resistance. *AIP Conf. Proc.*, 2022, vol. 2762, pp. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0128505>.

Information about the authors

Damir R. Muktasipov, Student, St. Petersburg Mining University, 2, Vasilyevsky Island 21 line, St. Petersburg, 199106, Russian Federation. chuxarev96@mail.ru

Elena U. Safiullina, Cand. Sc., Associate Professor, St. Petersburg Mining University, 2, Vasilyevsky Island 21 line, St. Petersburg, 199106, Russian Federation. safiullinaeu@yandex.com

Received: 22.11.2023

Revised: 26.12.2023

Accepted: 10.09.2024

УДК 621.311.243
DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4507
Шифр специальности ВАК: 2.4.5

Методы определения рассеянного солнечного излучения с целью повышения точности прогнозирования почасовой выработки электроэнергии солнечными электростанциями

С.В. Митрофанов[✉]

Оренбургский государственный университет, Россия, г. Оренбург

[✉]mitser2002@mail.ru

Аннотация. Актуальность. Для оценки потенциала электроэнергии, которая может быть получена от солнечных электростанций, установленных в разных регионах, необходима простая и актуальная методика. Сложность оценки потенциала солнечной энергии заключается в наличии некоторых факторов, влияющих на выработку электроэнергии и зависящих от случайных событий. К таким факторам относятся в первую очередь ясность неба, направление фотоэлектрических панелей строго на Солнце, запыленность, температуру окружающей среды. В литературных источниках используются разные подходы к оценке потенциала солнечной энергии. В данной работе представлена методика оценки выработки электроэнергии солнечной станцией, имеющей непрерывную систему слежения за Солнцем с учетом запыленности и температуры фотоэлектрических панелей. Методика опробована на действующей физической модели. **Цель:** изучение существующих методик, наиболее подходящих для средней полосы России, для оценки потенциала солнечной энергии. **Объекты:** солнечные электростанции. **Методы:** эмпирические и аналитические методы. Используя данные, получаемые с действующей солнечной станции, давалась оценка адекватности предложенной методики. **Результаты.** Выбранные методы учитывают почасовой индекс ясности неба, что позволило с достаточной для инженерных методик точностью определить суточную выработку электроэнергии солнечной станцией с различными углами наклона солнечных панелей. Это позволит повысить точность оценки потенциала электроэнергии, полученной солнечными станциями, как со стационарными фотоэлектрическими панелями, так и с системами слежения за Солнцем. На основании проведенных вычислительных экспериментов и проведенного анализа данных, полученных с действующей солнечной станции, авторы пришли к выводу, что представленная в данной работе методика позволяет с достаточно высокой точностью определить потенциал электроэнергии, которая может быть получена на территории России солнечными станциями.

Ключевые слова: солнечная электростанция, рассеянное солнечное излучение, фотоэлектрическая панель, индекс ясности неба, солнечная инсоляция, угол наклона солнечной панели

Для цитирования: Митрофанов С.В. Методы определения рассеянного солнечного излучения с целью повышения точности прогнозирования почасовой выработки электроэнергии солнечными электростанциями // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 10. – С. 120–133. DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4507

UDC 621.311.243
DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4507

Methods for determining scattered solar radiation in order to increase the accuracy of forecasting hourly electricity generation by solar power plants

S.V. Mitrofanov[✉]

Orenburg State University, Orenburg, Russian Federation

[✉]mitser200@mail.ru

Abstract. Relevance. A simple and up-to-date methodology is needed to assess the potential of electricity that can be obtained from solar power plants installed in different regions. The difficulty in assessing the potential of solar energy lies in the presence of some factors that affect electricity generation and depend on random events. Such factors include, first of all, the sky clarity, the direction of photovoltaic panels strictly to the Sun, dustiness, and ambient temperature. The literature uses different approaches to assess the potential of solar energy. This paper presents a methodology for evaluating the generation of electricity by a solar panel having a continuous solar tracking system, taking into account the dustiness and temperature of photovoltaic panels. The technique has been tested on an existing physical model. **Aim.** To study the existing methods for assessing the potential of solar energy and to select the most suitable ones for the central part of Russia. **Object.** Solar power plants. **Methods.** Empirical and analytical methods. Using the data obtained from an operating solar station, the adequacy of the proposed methodology was assessed. **Results.** The selected methods take into account the hourly sky clarity index, which made it possible, with sufficient accuracy for engineering techniques, to determine the daily power generation of a solar station with different angles of inclination of solar panels. This will improve the accuracy of estimating the potential of electricity generated by solar power plants, both with stationary photovoltaic panels and with solar tracking systems. Based on the conducted computational experiments and the analysis of data obtained from an operating solar station, the authors concluded that the technique presented in this paper allows us to determine with high enough accuracy the potential of electricity that can be produced in Russia by solar stations.

Keywords: solar power plant, scattered solar radiation, photovoltaic panel, sky clarity index, solar insolation, angle of inclination of the solar panel

For citation: Mitrofanov S.V. Methods for determining scattered solar radiation in order to increase the accuracy of forecasting hourly electricity generation by solar power plants. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 10, pp. 120–133. DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4507

Введение

Повышение энергетической эффективности использования солнечных станций является важной задачей современной энергетики. В России за последние 5 лет производство электроэнергии, выработанной солнечными электростанциями, значительно выросло. Это связано, прежде всего, со строительством новых солнечных электрических станций. Например, в Оренбургской области установленная мощность солнечных станций уже выше 320 МВт. Прогнозирование выработки электроэнергии солнечными станциями используется для экономической оценки целесообразности строительства таких станций. Для прогнозирования в основном используют приближенные методы, точность которых может оказаться неприемлемой. Повышение точности расчета объема поступающего солнечного излучения на различные поверхности имеет значение для инженеров-проектировщиков не только солнечных станций, но и зданий и сооружений, которые также проектируются с учетом сторон света и отражения солнечных лучей от соседних строений.

На метеостанциях полную солнечную инсоляцию обычно измеряют на горизонтальных плоскостях. В реальности на всех солнечных электростанциях (СЭС) солнечные фотоэлектрические панели (ФЭП) расположены под определённым углом к горизонтальной поверхности. При этом прямое солнечное излучение, падающее на наклонную поверхность, легко определяется через угол наклона ФЭП. Тогда как рассеянное солнечное излучение таким образом невозможно определить из-за того, что оно распространяется на поверхность ФЭП с

разных точек неба. Там, где нет возможности измерить рассеянное солнечное излучение, исследователи предложили несколько математических моделей для его расчета. При этом полную почасовую солнечную инсоляцию, падающую на наклонную поверхность ФЭП, было предложено определять через полную солнечную инсоляцию, падающую на горизонтальную поверхность. Существующие математические модели используются как для нахождения прямого и рассеянного солнечного излучения на горизонтальной поверхности, так и для нахождения прямого, рассеянного и отраженного солнечного излучения от земной поверхности на наклонную поверхность ФЭП. На принятие решения об использовании той или иной модели большое влияние оказывает широта рассматриваемой местности [1, 2]. Для выбора оптимальной модели необходимо сравнить расчетные и экспериментальные данные для определенной широты местности. Точность всех математических моделей зависит в основном от точности нахождения рассеянного и отраженного от поверхности Земли солнечного излучения. Для нахождения рассеянного солнечного излучения необходимо знать значение индекса ясности неба k_t . Он определяет, какое количество солнечного излучения, проходящего через атмосферу, достигло земной поверхности, не поглотилось, не отразилось, не рассеялось из-за пыли или облачности. Согласно исследованиям, проведенным авторами [3–7], значения почасового и суточного индекса ясности неба k_t сильно зависят от предполагаемого географического места строительства СЭС. Для определения оптимального угла наклона ФЭП СЭС можно воспользоваться различ-

ными математическими моделями. Эти модели рассмотрены и представлены в работе [8]. В настоящем исследовании выполнен анализ известных математических моделей, представленных в [1], для определения полной почасовой солнечной инсоляции, падающей на горизонтальную и наклонную поверхности ФЭП, подходящих для средних широт России.

Материалы и методы

Рассмотрим математические модели определения почасовой солнечной инсоляции, падающей на горизонтальную и наклонную поверхности ФЭП СЭС.

Солнечное излучение, падающее на горизонтальную поверхность

Полное солнечное излучение, падающее на горизонтальную поверхность, определяется как:

$$I_n = I_b + I_d, \quad (1)$$

где I_b – прямое почасовое солнечное излучение, падающее на горизонтальную поверхность, Вт/м², I_d – рассеянное солнечное излучение, падающее на горизонтальную поверхность. Так как рассматриваемая поверхность лежит строго горизонтально относительно Земли, солнечные лучи, отраженные от поверхности Земли, на него не попадают.

Полное солнечное излучение, падающее на горизонтальную поверхность, измеряется с помощью пиранометра, который позволяет получить суммарное значение прямого и рассеянного солнечного излучения. Полное солнечное излучение, падающее на горизонтальную поверхность, определяется через внеземное солнечное излучение и индекс ясности неба k_t по формуле:

$$I_n = k_t I_0 \cos(\theta_z), \quad (2)$$

где I_n – полная почасовая солнечная инсоляция, падающая на горизонтальную поверхность ФЭП; I_0 – глобальная почасовая внеземная солнечная инсоляция, достигающая атмосферы Земли и падающая на поверхность, направленную перпендикулярно лучам Солнца; θ_z – зенитный угол, определяемый по известным формулам для любого момента времени между восходом и заходом Солнца [1].

Значение глобальной почасовой внеземной солнечной инсоляции в произвольный момент времени определяется согласно выражению:

$$I_0 = G_{sc} \left(1 + 0,033 \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \right), \quad (3)$$

где G_{sc} – солнечная постоянная, принимаемая равной 1367 Вт/м²; n – номер дня в году, начиная с 1 января.

Прямое солнечное излучение – это часть внеземного солнечного излучения, проходящего через атмосферу Земли без преломления, отражения и поглощения, достигающего рассматриваемой поверхности. Прямое солнечное излучение может быть измерено на метеостанции пиргелиометром. Математические модели для определения прямого почасового солнечного излучения, падающего на горизонтальную поверхность, известны и представлены в работах [9–11].

Сложнее определяется рассеянное солнечное излучение, падающее на горизонтальную поверхность. На метеостанциях для измерения такого излучения используется дорогостоящее оборудование. Именно из-за высокой стоимости измерительного оборудования появилось большое количество математических моделей для определения рассеянного солнечного излучения, которые позволяют выполнить прогнозирование потенциала солнечной энергии в произвольном регионе мира.

Для его определения используются две группы математических моделей: параметрические и декомпозиционные. В параметрических моделях значение прямого солнечного излучения уменьшается из-за пыли, облачности и загрязнения атмосферы. В параметрических моделях математически описывается интенсивность ослабления в зависимости от номера дня. К параметрическим моделям относятся такие модели, как модель чистого неба (ASHRAE) [12] и его различные модификации.

Декомпозиционные модели основаны на некоторой сложной зависимости рассеянного солнечного излучения от полного солнечного излучения, падающего на горизонтальную поверхность через индекс ясности неба k_t . Почасовой индекс ясности неба k_t , в свою очередь, может быть найден из статистических данных, полученных от метеостанций со всего мира. Для нахождения почасового индекса ясности неба k_t для произвольного дня и местоположения на местности рассматриваемой поверхности ФЭП в настоящем исследовании использовался сервис NASA [13].

В результате многочисленных исследований авторами со всего мира установлено, что существует связь между почасовым рассеянным солнечным излучением и полным почасовым солнечным излучением, падающими на горизонтальную поверхность:

$$I_d = k(k_t) I_n, \quad (4)$$

где $k(k_t)$ – некоторая зависимость. Эта зависимость по результатам проведенных исследований может быть представлена как линейная, экспоненциальная или полиномиальная.

В табл. 1 приведены зависимости $k(k_t)$, полученные исследователями со всего мира на основе корреляции с экспериментальными данными.

Таблица 1. Математические модели для нахождения рассеянного почасового солнечного излучения, падающего на горизонтальную поверхность Земли

Table 1. Mathematical models for finding the scattered hourly solar radiation incident on the horizontal surface of the Earth

Источник/Reference	Модель/Model	
[14]	$\begin{cases} k(k_t) = 0,974k_t, & \text{если } k_t \leq 0,15 \\ k(k_t) = 1,192 - 1,349k_t, & \text{если } 0,15 < k_t \leq 0,7 \\ k(k_t) = 0,259k_t, & \text{если } 0,7 < k_t \leq 1 \end{cases}$	(5)
[15]	$\begin{cases} k(k_t) = 1 - 0,249k_t, & \text{если } k_t < 0,35 \\ k(k_t) = 1,577 - 1,84k_t, & \text{если } 0,35 < k_t \leq 0,75 \\ k(k_t) = 0,177k_t, & \text{если } 0,75 < k_t \leq 1 \end{cases}$	(6)
[16]	$\begin{cases} k(k_t) = 1 - 0,248k_t, & \text{если } k_t < 0,3 \\ k(k_t) = 1,45 - 1,67k_t, & \text{если } 0,3 < k_t \leq 0,78 \\ k(k_t) = 0,147k_t, & \text{если } 0,78 < k_t \leq 1 \end{cases}$	(7)
[17]	$\begin{cases} k(k_t) = 1 - 0,254k_t + 0,0123\sin(\alpha), & \text{если } k_t < 0,3 \\ k(k_t) = 1,4 - 1,749k_t + 0,177\sin(\alpha), & \text{если } 0,3 < k_t \leq 0,78 \\ k(k_t) = 0,486k_t - 0,182\sin(\alpha), & \text{если } 0,78 < k_t \leq 1 \end{cases}$	(8)
[18]	$k(k_t) = \frac{1}{1 + e^{(8,66k_t - 4,94)}}$	(9)
[19]	$\begin{cases} k(k_t) = 0,915k_t, & \text{если } k_t < 0,225 \\ k(k_t) = 1,1389 - 0,9422k_t - 0,3878k_t^2, & \text{если } 0,225 \leq k_t \leq 0,775 \\ k(k_t) = 0,215k_t, & \text{если } 0,775 < k_t \leq 1 \end{cases}$	(10)
[20]	$\begin{cases} k(k_t) = 0,987k_t, & \text{если } k_t \leq 0,1 \\ k(k_t) = 0,94 + 0,937k_t - 5,01k_t^2 + 3,32k_t^3, & \text{если } 0,1 < k_t \leq 0,8 \\ k(k_t) = 0,177k_t, & \text{если } 0,8 < k_t \leq 1 \end{cases}$	(11)
[21]	$\begin{cases} k(k_t) = 0,995 - 0,081k_t, & \text{если } k_t \leq 0,21 \\ k(k_t) = 0,724 + 2,738k_t - 8,32k_t^2 + 4,967k_t^3, & \text{если } 0,21 < k_t \leq 0,76 \\ k(k_t) = 0,18k_t, & \text{если } 0,76 < k_t \leq 1 \end{cases}$	(12)
[22]	$\begin{cases} k(k_t) = 0,9995 - 0,05k_t - 2,4156k_t^2 + 1,4926k_t^3, & \text{если } 0 \leq k_t \leq 0,78 \\ k(k_t) = 0,2k_t, & \text{если } 0,78 < k_t \leq 1 \end{cases}$	(13)
[23]	$\begin{cases} k(k_t) = 0,95, & \text{если } k_t \leq 0,175 \\ k(k_t) = 0,9698 + 0,4353k_t - 3,4499k_t^2 + 2,188k_t^3, & \text{если } 0,175 < k_t \leq 0,755 \\ k(k_t) = 0,26, & \text{если } 0,755 < k_t \leq 1 \end{cases}$	(14)
[24]	$\begin{cases} k(k_t) = 1 - 0,09k_t, & \text{если } k_t \leq 0,22 \\ k(k_t) = 0,9511 - 0,1604k_t + 4,388k_t^2 - 16,638k_t^3 + 12,336k_t^4, & \text{если } 0,22 < k_t \leq 0,8 \\ k(k_t) = 0,165k_t, & \text{если } 0,8 < k_t \leq 1 \end{cases}$	(15)
[25]	$\begin{cases} k(k_t) = 1,0086 - 0,178k_t, & \text{если } k_t \leq 0,24 \\ k(k_t) = 0,9686 + 0,1325k_t + 1,4183k_t^2 - 10,1862k_t^3 + 8,3733k_t^4, & \text{если } 0,24 < k_t \leq 0,8 \\ k(k_t) = 0,197k_t, & \text{если } 0,8 < k_t \leq 1 \end{cases}$	(16)
[26]	$\begin{cases} k(k_t) = 1, & \text{если } k_t \leq 0,17 \\ k(k_t) = 0,97 + 0,8k_t - 3k_t^2 - 3,1k_t^3 + 5,2k_t^4, & \text{если } 0,17 < k_t \leq 0,75 \\ k(k_t) = 0,18k_t, & \text{если } 0,75 < k_t \leq 1 \end{cases}$	(17)
[27]	$\begin{cases} k(k_t) = 1, & \text{если } k_t \leq 0,17 \\ k(k_t) = 0,97 + 1,1k_t - 4,5k_t^2 + 0,01k_t^3 + 3,14k_t^4, & \text{если } 0,17 < k_t \leq 0,75 \\ k(k_t) = 0,18k_t, & \text{если } 0,75 < k_t \leq 1 \end{cases}$	(18)
[28]	$1 - 0,02 - 0,059k_t + 0,994k_t^2 - 5,205k_t^3 + 15,307k_t^4 - 10,627k_t^5$	(19)

После нахождения по одной из формул (5)–(19) значения функции $k(k_t)$ определяется диффузная почасовая солнечная инсоляция I_d по формуле (4), используя формулы (2) и (3). Затем из формулы (1) определяется прямое почасовое солнечное излучение I_b , падающее на горизонтальную поверхность.

Солнечное излучение, падающее на наклонную поверхность

Сложнее определяется рассеянное почасовое солнечное излучение, приходящее на наклонную поверхность ФЭП. Для его определения проведены многочисленные исследования. В основе расчетов лежит зависимость рассеянного солнечного излучения, принимаемого наклонной поверхностью ФЭП, от угла ее наклона β и положения Солнца. За основу расчетов принимается тот факт, что значение рассеянного солнечного излучения, принимаемого горизонтально расположенной поверхностью ФЭП, известно и может быть найдено по одной из формул (5)–(19). На рис. 1 представлена наклонная ФЭП с обозначением углов, определяющих ее положение в пространстве относительно поверхности Земли и лучей Солнца. Обозначим углы: α – угол склонения Солнца; θ_z – зенитный угол; β – угол наклона ФЭП относительно поверхности Земли; γ_s – угол между прямыми лучами Солнца и направлением на Юг (солнечный азимутальный угол); γ – азимутальный угол между направлением на Юг и некоторым вектором PV, перпендикулярным поверхности ФЭП. В случае, если ФЭП ориентирована строго на Солнце, последние два угла равны, т. е. $\gamma_s = \gamma$, а угол наклона ФЭП относительно поверхности Земли равен зенитному углу $\beta = \theta_z$.

Полное солнечное почасовое солнечное излучение, принимаемое наклонной поверхностью ФЭП, будет определяться как:

$$I_T = I_{bT} + I_{dT} + I_{rT}, \quad (20)$$

где I_{bT} – прямое почасовое солнечное излучение; I_{dT} – рассеянное почасовое солнечное излучение; I_{rT} – отраженное почасовое солнечное излучение.

Прямое солнечное излучение определяется по формуле [29]:

$$I_{bT} = I_b \frac{\cos(\theta)}{\cos(\theta_z)}, \quad (21)$$

где θ – угол между прямыми лучами Солнца и вектором PV (рис. 1), перпендикулярным поверхности ФЭП. Угол θ может быть найден по известной формуле [30]:

$$\theta = \alpha \cos(\cos(\theta_z) \cos(\beta) + \sin(\theta_z) \sin(\beta) \cos(\gamma_s - \gamma)). \quad (22)$$

Если ФЭП ориентирована строго на Солнце, то угол θ равен нулю. Все остальные случаи положения ФЭП в пространстве являются общими, и угол θ имеет некоторое значение.

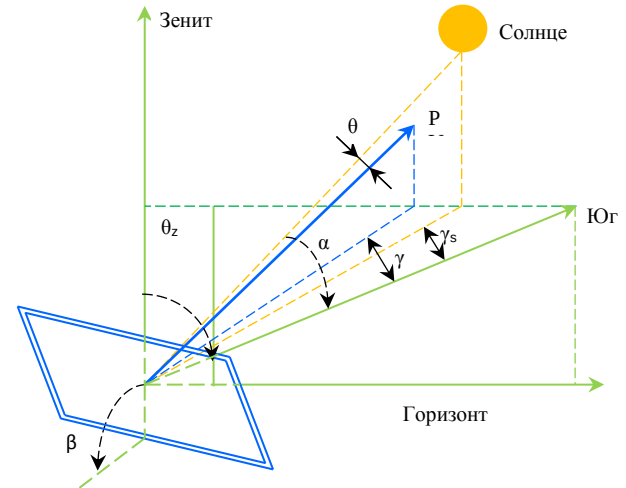


Рис. 1. Положение фотозлектрической панели в пространстве

Fig 1. Photovoltaic panel position in space

Отраженное почасовое солнечное излучение определяется по формуле [31]:

$$I_{rT} = \rho I_n \frac{(1 - \cos(\beta))}{2}, \quad (23)$$

где ρ – альбедо поверхности Земли, в исследовании принимается равным 0,3.

Таблица 2. Изотропные математические модели для нахождения рассеянного почасового солнечного излучения, падающего на наклонную поверхность

Table 2. Isotropic mathematical models for finding scattered hourly solar radiation incident on the inclined surface

Источник Reference	Модель Model	
[32]	$I_{dT} = I_d \frac{(1 + \cos(\beta))}{2}$	(24)
[33]	$I_{dT} = I_d \frac{(3 + \cos(2\beta))}{4}$	(25)
[34]	$I_{dT} = I_d \frac{(2 + \cos(\beta))}{3}$	(26)
[35]	$I_{dT} = I_d \left(1 - \frac{\beta}{180}\right)$	(27)

Полученные авторами математические модели расчета рассеянного солнечного излучения делятся на изотропные и анизотропные. При разработке изотропных моделей (табл. 2) принимается, что рассеянное излучение распространяется равномерно по всему небу и зависит только от угла наклона ФЭП. Не только в пасмурные дни небо вблизи Солнца значительно светлее, но и в ясные, что показывают исследования [12]. Это явление в изотропных моделях игнорируется.

В анизотропных математических моделях (табл. 3) считается, что существуют области на небе с повышенным рассеянным солнечным излучением, которое распределяется неравномерно в пространстве и зависит от угла наклона ФЭП и положения Солнца.

Полное солнечное излучение I_T , принимаемое наклонной поверхностью ФЭП, определяется по формуле (20) в любой момент времени между восходом и заходом Солнца, при этом используются формулы (1)–(4) и (21)–(23). Рассеянное солнечное излучение, падающее на горизонтальную плоскость, определяется по одной из формул (5)–(19), а падающее на наклонную плоскость – по одной из формул (24)–(37). Затем определяется мощность, вырабатываемая солнечной станцией с произвольным углом наклона ФЭП в любой момент времени по формуле [46]:

$$P_{pv} = f_{pv} n P_n \frac{I_T}{I_n} (1 - \sigma(T_c - T_{cst})), \quad (38)$$

Таблица 3. Анизотропные математические модели для нахождения рассеянного почасового солнечного излучения, падающего на наклонную поверхность

Table 3. Anisotropic mathematical models for finding scattered hourly solar radiation incident on an inclined surface

Источник/Reference	Модель/Model	
[36]	$I_{dT} = \left[\frac{(1 + \cos(\beta))}{2} \left(I_d - 0,05 \frac{I_{bT}}{\cos(\theta_z)} \right) \right] + 0,05 I_{bT} \cos(\theta)$	(28)
[37]	$I_{dT} = \frac{1}{2} I_d (1 + \cos(\beta)) \left[1 + \cos(\theta)^2 \sin(\theta_z)^3 \right] \left[1 + \sin\left(\frac{\beta}{2}\right)^3 \right]$	(29)
[38]	$I_{dT} = I_d \left[\frac{I_b \cos(\theta)}{I_0 \cos(\theta_z)} + \frac{(1 + \cos(\beta))}{2} \left(1 - \frac{I_b}{I_0} \right) \right]$	(30)
[39]	$I_{dT} = I_d \left[\frac{I_b \cos(\theta)}{I_0 \cos(\theta_z)} + \frac{(1 + \cos(\beta))}{2} \left(1 - \frac{I_b}{I_0} \right) \left(1 + \sqrt{\frac{I_b}{I_n}} \sin(\beta)^3 \right) \right]$	(31)
[40]	$I_{dT} = I_d \left[\frac{1}{2} (1 + \cos(\beta)) \left(1 + \left(1 - \frac{I_d}{I_n} \right) \cos(\theta)^2 \sin(\theta_z)^3 \right) \left(1 + \left(1 - \frac{I_d}{I_n} \right) \sin\left(\frac{\beta}{2}\right)^3 \right) \right]$	(32)
[41]	$I_{dT} = I_d \left[\left(\frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right) \left(1 - \frac{I_b}{I_0} \right) \left(1 + \sqrt{\frac{I_b}{I_n}} \sin\left(\frac{\beta}{2}\right)^3 \right) \right]$	(33)
[42]	$I_{dT} = I_d \left[\frac{I_b \cos(\theta)}{I_0 \cos(\theta_z)} + Z \cos(\beta) + \frac{(1 + \cos(\beta))}{2} \left(1 - \frac{I_b}{I_0} - Z \right) \right]$ где $\begin{cases} Z = 0,3 - 2 \frac{I_b}{I_0}, \text{ если } 0 < \frac{I_b}{I_0} \leq 0,15 \\ Z = 0, \text{ если } 0,15 < \frac{I_b}{I_0} \leq 1 \end{cases}$	(34)
[43]	$I_{dT} = I_d \left[\left(\frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right) + \frac{4}{7\pi} \left(\sin(\beta) - \beta \cos(\beta) - \pi \sin\left(\frac{\beta}{2}\right)^2 \right) \right]$	(35)
[44]	$I_{dT} = I_d \left[\frac{I_{bT}}{G_{sc} \cos(\theta_z)} + G'_\beta \left(1 - \frac{I_{bb}}{G_{sc} \cos(\theta_z)} \right) \right]$ $G'_\beta = 1,0115 - 0,20293\beta - 0,080823\beta^2$	(36)
[41, 45]	$I_{dT} = I_d \left[\left(\frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right) (1 - F_1) + F_1 \frac{a_1}{a_2} + F_2 \sin(\beta) \right]$	(37)

где f_{pv} – коэффициент, учитывающий загрязнение, деградацию ФЭП, в исследовании принимается равным 0,9; n – число солнечных модулей ФЭП в составе СЭС; P_n – номинальная мощность одной ФЭП; I_n – номинальная солнечная инсоляция, в исследовании принимается за 1 кВт/м^2 ; σ – температурный коэффициент, $\%/^{\circ}\text{C}$; T_c – текущая рабочая температура ФЭП в рассматриваемый момент времени, $^{\circ}\text{C}$; T_{cst} – стандартная температура ФЭП, обычно принимаемая за 25°C [46].

Рабочая температура поверхности ФЭП в произвольный момент времени определяется по формуле [47]:

$$T_c = T_a + I_T \frac{T_{cn} - T_{an}}{I_{Tn}} \left(1 - \frac{\eta_c}{\tau_a} \right), \quad (39)$$

где T_a – температура окружающей среды, $^{\circ}\text{C}$; I_{Tn} – номинальная солнечная инсоляция, равная 800 Вт/м^2 [47]; T_{cn} – номинальная рабочая температура ФЭП по данным завода-изготовителя, при солнечной инсоляции I_{Tn} , $^{\circ}\text{C}$; T_{an} – температура окружающей среды, при которой была получена номинальная рабочая температура T_{cn} , принимается равной 20°C ; η_c – коэффициент полезного действия ФЭП, о.е.; τ_a – коэффициент, учитывающий поглощение солнечных лучей поверхностью ФЭП, в настоящем исследовании принимается равным 0,9 [48].

Для оценки адекватности и подбора наиболее подходящих для прогнозирования представленных математических моделей был проведен эксперимент на двух физических моделях сетевых солнечных станций установленной мощностью по 400 В каждая. Каждая станция имеет в своем составе од-

ну поликристаллическую и одну монокристаллическую ФЭП.

Одна сетевая солнечная станция (станция № 1) состоит из двух неподвижных ФЭП, ориентированных на юг и расположенных под оптимальным углом к горизонтальной поверхности (в настоящем исследовании равным углу широты местности). ФЭП закреплены на основании под углом равным широте местности. Оптимальный угол был выбран по результатам теоретических исследований [8]. Математические расчеты показывают, что такой угол может быть применен для средних широт. Для широт, близких к экватору, применяются другие соотношения для определения оптимального угла.

Вторая сетевая солнечная станция (станция № 2) имеет двухкоординатную систему слежения за Солнцем. На подвижной платформе станции № 2 расположены две идентичные ФЭП, как на станции № 1. Подвижная платформа может вращаться в двух направлениях. Поворот платформы, на которой расположены ФЭП, осуществляется двумя линейными актуаторами постоянного тока. Управление актуаторами осуществляется с помощью микроконтроллера и драйвера управления. Энергия, потребляемая при питании актуаторов, фиксируется приборами учета и вычитается при расчетах из вырабатываемой электроэнергии СЭС.

Обе станции имеют систему мониторинга и архивации данных с интервалом времени, равным 5 минутам. Для определения метеорологических параметров в месте расположения солнечных станций установлена метеостанция с системой мониторинга. На рис. 2 представлены экспериментальные солнечные электростанции.



Рис. 2. Экспериментальные солнечные электростанции
Fig. 2. Experimental solar power plants

Результаты исследования

Экспериментальные исследования по накоплению данных по режимам работы солнечных станций (фиксировались вырабатываемая мощность, напряжение, ток и др. параметры) выполнялись в течение года – с июня 2022 г. по июнь 2023 г. При проведении математических расчетов для г. Оренбурга было выбрано несколько солнечных малооблачных дней. Время каждого светового дня разбивалось на равные промежутки времени. Электрическая мощность, вырабатываемая СЭС, рассчитывалась по формуле (38) и сравнивалась для выбранных дней с экспериментальными данными, полученными в результате мониторинга. При этом в формуле (39) учитывалась температура окружающей среды, полученная с помощью метеостанции, установленной в месте проведения эксперимента. Для определения почасовой солнечной инсоляции I_T в формуле (38) использовалась формула (20). Для определения рассеянного солнечного излучения, падающего на наклонную поверхность I_{dT} , использовались формулы (24)–(37), а на горизонтальную поверхность – формулы (5)–(19). Таким образом, для расчета рассеянного солнечного излучения, падающего на наклонную поверхность, для каждого рассматриваемого дня использовались 210 математических моделей. На рис. 3, как пример, показаны результаты расчетов и экспериментальных данных для четырех дней.

Для проверки адекватности и применимости вышеперечисленных математических моделей выполнялась оценка погрешности расчета. Она проводилась с помощью функций для нахождения относительной погрешности, среднеквадратичной ошибки, средней абсолютной ошибки и средней ошибки смещения.

Относительная погрешность расчета необходима для оценки суточной выработки электроэнергии. Недостатком нахождения относительной погрешности является, то, что с ее помощью нельзя точно определить совпадения расчетной и экспериментальной кривой распределения мощности в течение всего светового дня.

Для суточной выработки солнечной энергии относительная погрешность определяется как:

$$\varepsilon\% = \left(1 - \frac{\int_{t_1}^{t_2} P_{pvi}(t) dt}{\int_{t_1}^{t_2} P_{ei}(t) dt} \right) 100, \quad (40)$$

где P_{pvi} – расчетная мощность, полученная по формуле (38) для произвольного момента в промежутке между временем восхода t_1 и временем захода t_2 Солнца, Вт; P_{ei} – мощность, полученная в результате экспериментальных исследований, Вт.

Среднеквадратичная ошибка RMSE (root mean square error) определяется как:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (P_{pvi} - P_{ei})^2}{k}}, \quad (41)$$

где k – количество рассматриваемых точек.

В процентах с учетом формулы (41):

$$RMSE\% = \frac{RMSE}{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k P_{ei}} \cdot 100. \quad (42)$$

Средняя абсолютная ошибка MAPE (mean absolute percentage error) в процентах определяется как:

$$MAPE\% = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \left(\frac{P_{pvi} - P_{ei}}{P_{pvi}} \right) \cdot 100. \quad (43)$$

Средняя ошибка смещения MBE (mean bias error) определяется как:

$$MBE = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (P_{pvi} - P_{ei}). \quad (44)$$

В процентах, с учетом формулы (44):

$$MBE\% = \frac{MBE}{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k P_{ei}} \cdot 100. \quad (45)$$

В результате вычислений были определены вышеуказанные погрешности для каждого рассматриваемого дня с использованием математических моделей для нахождения рассеянного солнечного излучения по формулам (5)–(19), (24)–(37).

В табл. 4 представлен пример расчета погрешности MBE% для одного из рассматриваемых дней (01.05.2023 г.) СЭС с неподвижными ФЭП.

Как видно из табл. 4, минимальную погрешность MBE% имеет математическая модель (36) для определения рассеянного солнечного излучения, падающего на наклонную поверхность, и практически не зависит от математических моделей (5)–(19) для определения рассеянного солнечного излучения, падающего на горизонтальную поверхность.

В табл. 5 представлен пример расчета погрешности MBE% для одного из рассматриваемых дней (01.05.2023 г.) для СЭС с двухкоординатной системой слежения за Солнцем. Как видно из табл. 5, минимальную погрешность MBE% имеют математические модели (15)–(17) для определения рассеянного солнечного излучения, падающего на горизонтальную поверхность ФЭП, и математические модели (29) и (36) для определения рассеянного солнечного излучения, падающего на наклонную поверхность ФЭП.

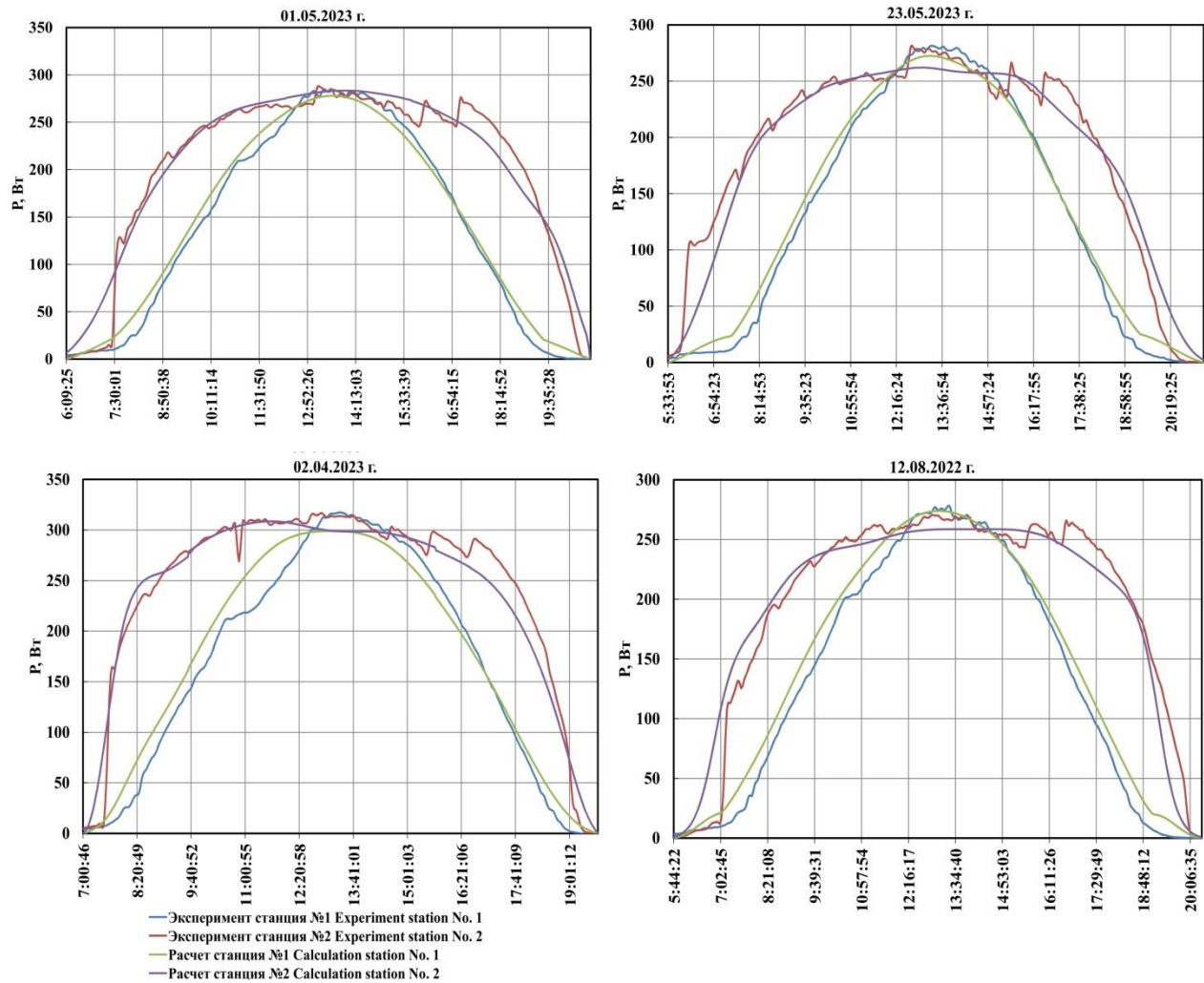


Рис. 3. Выработка электроэнергии солнечными станциями в течение дня
Fig. 3. Electricity generation by solar power plants during the day

Таблица 4. Погрешность MBE% для СЭС с неподвижными фотоэлектрическими панелями (станция № 1)
Table 4. MBE% error for SPP (solar power plant) with fixed photovoltaic panel (station no. 1)

Методы расчета рассеянного солнечного излучения, падающего на Methods for calculating the scattered solar radiation incident on	горизонтальную поверхность horizontal surface																		
	Номер формулы Formula	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19			
наклонную поверхность inclined surface	24	6,4	6,5	6,2	6,3	6,1	6,3	6,6	6,5	6,6	7,6	6,4	6,8	6,3	6,2	10			
	25	6,8	7,1	6,7	7,1	6,3	7	7,5	6,9	7,7	9,4	6,7	7,5	6,7	6,5	12,7			
	26	6,5	6,7	6,3	6,4	6,3	6,4	6,6	6,6	6,6	7,3	6,6	6,8	6,3	6,2	9			
	27	6,7	6,9	6,5	6,8	6,2	6,8	7,3	6,8	7,4	9	6,6	7,3	6,6	6,4	12,2			
	28	6,7	7	6,6	6,7	6,4	6,7	7	6,9	7,1	8,3	6,7	7,2	6,5	6,4	10,8			
	29	6,2	6,8	6,5	6,3	6,5	6,4	6,4	6,6	6,4	6,8	6,6	6,7	6,3	6,1	7,9			
	30	5	5,2	5	4,8	5,1	4,9	5	5,1	4,9	5,3	5,2	5,2	4,9	4,9	6,4			
	31	6,4	7,1	6,9	6,6	6,9	6,7	6,6	6,9	6,6	6,8	6,9	6,9	6,5	6,3	7,8			
	32	6	6,2	6	5,9	6,1	5,9	6,1	6,2	6	6,5	6,2	6,3	5,9	5,9	7,4			
	33	11,7	12,4	11,8	12,5	10,8	12,4	13,1	12,1	13,4	15,7	11,5	13,2	11,8	11,2	19,5			
	34	5	5,1	4,9	4,8	5	4,9	5	5,1	4,9	5,3	5,1	5,2	4,9	4,9	6,2			
	35	6,6	6,7	6,3	6,6	6,1	6,6	7	6,6	7,1	8,5	6,5	7,1	6,4	6,3	11,5			
	36	4,3	4,3	4,2	4,1	4,3	4,2	4,3	4,3	4,3	4,6	4,3	4,4	4,2	4,3	5,5			
	37	18,7	20,4	19,4	19,3	18,8	19,5	19,6	19,7	19,7	21,8	19,7	20,3	18,7	18	20,8			

Таблица 5. Погрешность MBE% для СЭС с системой слежения за Солнцем (станция № 2)

Table 5. Error MBE% for SPP with a Sun tracking system (station № 2)

Методы расчета рассеянного солнечного излучения, падающего на Methods for calculating the scattered solar radiation incident on	горизонтальную поверхность horizontal surface																
	Номер формулы Formula	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
наклонную поверхность inclined surface	24	8,2	9,5	9,1	8,9	8,3	9,7	9,2	8,8	9,8	11,4	8,1	8,9	7,9	7,5	17,1	
	25	9,3	10,6	10,1	10,1	9,1	10,8	10,5	9,8	11,3	13,3	9	10,3	8,9	8,3	19,7	
	26	7,7	8,8	8,5	8,3	7,8	9,1	8,5	8,2	9,1	10,4	7,5	8,2	7,4	7	15,6	
	27	9,2	10,4	9,8	9,9	8,9	10,6	10,4	9,6	11,1	13,1	8,8	10,1	8,8	8,2	19,3	
	28	8,7	10,7	10	9,5	9,4	10,4	10	9,8	10,5	12,4	9,3	10,1	8,6	7,9	18,4	
	29	7	6,4	6,4	6,5	6,4	6,9	6,5	6,2	6,8	6,6	6,1	6,1	6,3	6,6	7,8	
	30	7,2	6,7	6,7	6,7	6,5	7,2	6,6	6,5	7	6,9	6,2	6,2	6,3	6,8	9,7	
	31	8	6,6	6,7	7,1	6,7	7,4	7,1	6,6	7,4	6,8	6,4	6,5	7	7,8	7,7	
	32	7	7,2	7	6,7	6,8	7,4	6,7	6,8	7,2	7,6	6,5	6,5	6,2	6,3	11,9	
	33	13,4	14,5	13,9	14,3	12,4	15	15	13,8	15,8	18,3	12,7	14,6	12,9	12,2	24,7	
	34	7,1	6,6	6,6	6,7	6,5	7,2	6,6	6,4	7	6,9	6,1	6,2	6,2	6,7	9,7	
	35	8,8	10,2	9,7	9,6	8,8	10,4	10	9,4	10,7	12,5	8,7	9,7	8,5	8	18,7	
	36	7	6,6	6,6	6,6	6,5	7,1	6,5	6,4	7	7	6,1	6,1	6,1	6,6	10,1	
	37	12,6	11,5	11,5	12,4	10,9	12,4	12,5	11,6	12,9	13,2	11,3	12,1	12,1	12,2	9,3	

Таблица 6. Результаты исследования

Table 6. Results of the study

параметр parameter	W_{pv}		W_e		$\varepsilon\%$		RMSE%		MAPE%		MBE%		номера формул formula numbers	
	№ 1	№ 2	№ 1	№ 2	№ 1	№ 2	№ 1	№ 2	№ 1	№ 2	№ 1	№ 2	№ 1	№ 2
Дата Date	№ 1	№ 2	№ 1	№ 2	№ 1	№ 2	№ 1	№ 2	№ 1	№ 2	№ 1	№ 2	№ 1	№ 2
15.03.23	1,9	2,81	1,9	2,83	0,05	0,7	12,6	9,9	16,1	13,9	10,3	7	(9), (28)	(8), (31)
02.04.23	2,2	3,07	2,14	3,1	-3,2	1,1	10,5	7,4	28,8	11,6	9	5,3	(8), (36)	(17), (29)
01.05.23	2,07	3,05	2,05	3	-0,72	-1,8	5,1	7,4	22	12,8	4,1	6,1	(8), (36)	(15), (29)
23.05.23	2,12	2,96	2,06	3,01	-2,7	1,7	5,5	10,6	27,3	25,9	4,3	7,2	(18), (36)	(16), (32)
02.06.22	2,1	3,15	2,06	3,08	-2,1	-1,9	7,9	8,9	24,9	13,6	6,6	6,1	(8), (36)	(15), (36)
21.06.22	2,18	3,08	2,09	3,05	-4,1	-0,9	11,7	12,3	25,5	15	6,3	13,7	(18), (36)	(15), (32)
04.08.22	2,06	2,98	1,97	2,91	-4,4	-2,2	8	11,9	37,8	13,5	6,7	7	(18), (36)	(16), (32)
11.08.22	1,79	2,51	1,76	2,46	-1,9	-2,1	12,1	12,9	37,5	22,6	9,5	9,7	(18), (36)	(15), (29)
12.08.22	2,05	2,86	1,97	2,88	-4,1	0,83	6,6	10,6	30,6	22,7	5,5	7,1	(14), (36)	(15), (32)
13.08.22	2	2,94	1,93	2,85	-4,4	-2,9	9,7	10,4	26,3	12,8	7,4	5,9	(18), (36)	(15), (32)
15.08.22	2	2,87	1,91	2,8	-4,6	-3	9,7	9,6	29,5	14,4	8	5,6	(18), (36)	(15), (32)
16.08.22	1,97	2,9	1,9	2,82	-3,6	-3,1	8,3	11,7	26,4	13,7	8,6	5,9	(18), (36)	(15), (32)
17.08.22	1,95	2,78	1,88	2,73	-4,4	-1,6	9,4	9,4	27,2	15,5	7,7	5,5	(18), (36)	(15), (26)
19.08.22	2,13	3,1	2,02	2,98	-5,4	-3	7,7	10,6	34,1	14	6	5,8	(13), (36)	(16), (32)
20.08.22	2,04	2,9	1,94	2,88	-5	-0,5	11,6	9,8	37,8	18,9	8,8	5,4	(10), (36)	(14), (32)
22.08.22	1,94	2,7	1,85	2,7	-4,7	0	8,3	9,2	54	28,4	6,7	6,1	(10), (36)	(16), (32)
13.09.22	1,79	2,52	1,8	2,53	0,5	0,4	14,1	15,9	27	20,5	10,9	11,6	(15), (25)	(15), (31)
19.09.22	1,77	2,37	1,73	2,46	-2,5	3,7	13,6	13,4	46,8	53	10,7	8,4	(18), (36)	(18), (31)
20.09.22	1,76	2,51	1,73	2,47	-1,7	-1,3	10,4	9,3	23	14,9	8,35	7,9	(15), (35)	(18), (31)
21.09.22	1,73	2,27	1,7	2,33	-1,7	2,9	12	13	27,5	18,9	8,8	10,1	(15), (36)	(15), (31)
03.10.22	1,77	2,57	1,63	2,52	-8,5	-2,4	20,8	7,9	31,7	12,7	15	6,3	(6), (32)	(15), (31)
09.10.22	1,58	2,33	1,53	2,39	-2,9	2,2	19,3	11,3	18,9	14,8	15,2	7,9	(6), (28)	(13), (29)
10.10.22	1,58	2,36	1,53	2,34	-3,3	-1	19,8	10,4	25,3	15,9	16,6	7,3	(6), (28)	(18), (31)
17.10.22	1,46	2,25	1,42	2,31	-3,7	2,6	16,8	10,3	18,9	25,9	12,8	7,9	(6), (28)	(18), (31)

Результаты исследований для всех рассматриваемых ясных или малооблачных дней с указанием математических моделей сведены в табл. 6. В ней представлены расчетные значения выработанной электроэнергии W_{pv} , экспериментальные значения выработанной электроэнергии W_e с неподвижными (станция № 1) и подвижными ФЭП (станция № 2), определенные по формулам (40), (42)–(45), с наименьшей погрешностью.

Обсуждение и заключение

В результате численного и физического моделирования установлено, что методы для нахождения рассеянного солнечного излучения, падающего на наклонную поверхность, имеют разную точность. Анализ точности показал, что для исследуемого региона подходят некоторые из них. Точность методов зависит от физического принципа работы станции. Если они имеют неподвижные ФЭП, рас-

положенные под оптимальным углом, в весенние месяцы высокую точность имеет сочетание методов (8) и (36), в летние – (18) и (36), в осенние – (6) и (28), (15) и (36), (6) и (32). Установлено, что для станций, имеющих подвижные ФЭП, с системой слежения за Солнцем необходимо выбирать другое сочетание методов в отличие от солнечной станции с неподвижными ФЭП. Для таких станций высокую точность имеет сочетание методов в весенние дни (8) и (31), (15) и (29), (17) и (29), в летние – (15) и (32), (16) и (32), в осенние – (15) и (31), (18) и (31), (13) и (29).

Были проанализированы все полученные результаты для исследуемых солнечных станций. Установлено, что для подвижной ФЭП высокую точность имеет сочетание метода (32) с любыми методами, вычисленными по формулам (5)–(18), для неподвижной ФЭП – сочетание метода (36) с любыми методами, вычисленными по формулам (5)–(18). Таким образом, полученные результаты могут быть применены на практике исследователями для повышения точности прогнозирования выработки электроэнергии солнечными станциями, расположенными в регионах средней широты. Для южных широт требуется дополнительное исследование.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mousavi Maleki S., Hizam H., Gomes C. Estimation of hourly, daily and monthly global solar radiation on inclined surfaces: models re-visited // *Energies*. – 2017. – Vol. 10. – № 1 (134). – P. 1–28.
2. Berrizbeitia S.E., Jadraque Gago E., Muneer T. Empirical models for the estimation of solar sky-diffuse radiation. A review and experimental analysis // *Energies*. – 2020. – Vol. 13. – № 3 (701) – P. 1–23.
3. Modeling hourly solar diffuse fraction on a horizontal surface based on sky conditions clustering / K. Yin, X. Zhang, J. Xie, Z. Hao, G. Xiao, J. Liu // *Energy*. – 2023. – Vol. 272 (127008). – P. 1–12.
4. A novel adaptive approach for improvement in the estimation of hourly diffuse solar radiation: a case study of China / Y. Yu, Y. Tang, J. Chou, L. Yang // *Energy Conversion and Management*. – 2023. – Vol. 293 (117455). – P. 11–12.
5. Development criterion of estimating hourly global solar radiation for all sky conditions in China / Q. Cao, L. Yang, Y. Liu, S. Wang // *Energy Conversion and Management*. – 2023. – Vol. 284 (116946). – P. 1–15.
6. Рамадан А., Елистратов В.В. Оценка прихода солнечной энергии и выбор оптимального угла наклона солнечной батареи для условий Сирии // *Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология*. – 2018. – № 22–24 (270–272). – С. 12–27.
7. Study on the evaluation method of diffuse radiation models taking 5 typical cities in China as examples / G. Su, S. Zhang, W. Yao, M. Hu, H. Hao // *Energy and Built Environment*. – 2023. – Vol. 4. – P. 236–243.
8. Митрофанов С.В. Выбор оптимального угла наклона солнечных панелей для размещения их в произвольном регионе // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика*. – 2023. – Т. 23. – № 1. – С. 5–11.
9. Maxwell E.L. Metstat – the solar radiation model used in the production of the National Solar Radiation Data Base (NSRDB) // *Solar Energy*. – 1998. – Vol. 62. – № 4. – P. 263–279.
10. Yang K., Koike T. A general model to estimate hourly and daily solar radiation for hydrological studies // *Water Resources Research*. – 2005. – Vol. 41. – № 10. – P. 1–13.
11. New decomposition models to estimate hourly global solar radiation from the daily value / W. Yao, Z. Li, T. Xiu, Y. Lu, X. Li // *Solar Energy*. – 2015. – Vol. 120. – P. 87–99.
12. Khatib T., Deria R. East-west oriented photovoltaic power systems: model, benefits and technical evaluation // *Energy Conversion and Management*. – 2022. – Vol. 266 (115810). – P. 1–15.
13. POWER| Data Access Viewer. URL: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/> (дата обращения: 18.12.2023).
14. Lam J.C., Li D.H.W. Correlation between global solar radiation and its direct and diffuse components // *Building and Environment*. – 1996. – Vol. 31. – № 6. – P. 527–535.
15. Orgill J.F., Hollands K.G.T. Correlation equation for hourly diffuse radiation on a horizontal surface // *Solar Energy*. – 1977. – Vol. 19. – № 4. – P. 357–359.
16. Reindl D.T., Beckman W.A., Duffie J.A. Diffuse fraction correlations // *Solar Energy*. – 1990. – Vol. 45. – № 1. – P. 1–7.
17. Reindl D.T. Estimating diffuse radiation on horizontal surfaces and total radiation on tilted surface. MS Thesis. – Madison, 1988. – 209 p.
18. Boland J., Ridley B., Brown B. Models of diffuse solar radiation // *Renewable Energy*. – 2008. – Vol. 33. – № 4. – P. 575–584.
19. Hawlader M.N.A. Diffuse, global and extra-terrestrial solar radiation for Singapore // *International Journal of Ambient Energy*. – 1984. – Vol. 5. – № 1. – P. 31–38.
20. Comparative study of various correlations in estimating hourly diffuse fraction of global solar radiation / C.P. Jacovides, F.S. Tymvios, V.D. Assimakopoulos, N.A. Katsounides // *Renewable Energy*. – 2006. – Vol. 31. – № 15. – P. 2492–2504.
21. Diffuse solar irradiation model evaluation in the North Mediterranean Belt area / A. de Miguel, J. Bilbao, R. Aguiar, H. Kambezidis, E. Negro // *Solar Energy*. – 2001. – Vol. 70. – № 2. – P. 143–153.
22. Karatasou S., Santamouris M., Geros V. Analysis of experimental data on diffuse solar radiation in Athens, Greece, for building applications // *International Journal of Sustainable Energy*. – 2003. – Vol. 23. – № 1–2. – P. 1–11.
23. Muneer T., Saluja G.S. A brief review of models for computing solar radiation on inclined surfaces // *Energy Conversion and Management*. – 1985. – Vol. 25. – № 4. – P. 443–458.
24. Erbs D., Klein S., Duffie J. Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation // *Solar Energy*. – 1982. – Vol. 28. – № 4. – P. 293–302.
25. Chandrasekaran J., Kumar S. Hourly diffuse fraction correlation at a tropical location // *Solar Energy*. – 1994. – Vol. 53. – № 6. – P. 505–510.

26. Correlation models of diffuse solar-radiation applied to the city of São Paulo, Brazil / A.P. Oliveira, J.F. Escobedo, A.J. Machado, J. Soares // *Applied Energy*. – 2002. – Vol. 71. – P. 59–73.
27. Modeling hourly diffuse solar-radiation in the city of São Paulo using a neural-network technique / J. Soares, A.P. Oliveira, M.Z. Božnar, P. Mlakar, J.F. Escobedo, A.J. Machado // *Applied Energy*. – 2004. – Vol. 79. – № 2. – P. 201–214.
28. Correlations for direct normal and global horizontal irradiation on a French Mediterranean site / A. Louche, G. Notton, P. Poggi, G. Simonnot // *Solar Energy*. – 1991. – Vol. 46. – № 4. – P. 261–266.
29. Ambient temperature and solar irradiance forecasting prediction horizon sensitivity analysis / J. Ramirez-Vergara, L.B. Bosman, W.D. Leon-Salas, E. Wollega // *Machine Learning with Applications*. – 2021. – Vol. 6 (100128). – P. 2–10.
30. Bi C., Law A.W.-K. Co-locating offshore wind and floating solar farms – Effect of high wind and wave conditions on solar power performance // *Energy*. – 2023. – Vol. 266 (126437). – P. 1–12.
31. Yadav S., Panda S.K., Hachem-Vermette C. Optimum azimuth and inclination angle of BIPV panel owing to different factors influencing the shadow of adjacent building // *Renewable Energy*. – 2020. – Vol. 162. – P. 381–396.
32. Liu B.Y.H., Jordan R.C. Daily insolation on surfaces tilted towards the equator // *ASHRAE Transactions*. – 1962. – Vol. 67. – P. 526–541.
33. Badescu V. 3D isotropic approximation for solar diffuse irradiance on tilted surfaces // *Renewable Energy*. – 2002. – Vol. 26. – № 2. – P. 221–233.
34. Koronakis P.S. On the choice of the angle of tilt for south facing solar collectors in the Athens basin area // *Solar Energy*. – 1986. – Vol. 36. – № 3. – P. 217–225.
35. Estimating solar radiation on slopes of arbitrary aspect / Y.Q. Tian, R.J. Davies-Colley, P. Gong, B.W. Thorrold // *Agricultural and Forest Meteorology*. – 2001. – Vol. 109. – № 1. – P. 67–74.
36. Bugler J.W. The determination of hourly insolation on an inclined plane using a diffuse irradiance model based on hourly measured global horizontal insolation // *Solar Energy*. – 1977. – Vol. 19. – № 5. – P. 477–491.
37. Temps R.C., Coulson K.L. Solar radiation incident upon slopes of different orientations // *Solar Energy*. – 1977. – Vol. 19. – № 2. – P. 179–184.
38. Hay J.E., Davies J.A. Calculation of the solar radiation incident on an inclined surface // *Proceedings First Canadian Solar Radiation Data Workshop*. – Canada, 1980. – P. 59–72.
39. Reindl D.T., Beckman W.A., Duffie J.A. Evaluation of hourly tilted surface radiation models // *Solar Energy*. – 1990. – Vol. 45. – № 1. – P. 9–17.
40. Klucher T.M. Evaluation of models to predict insolation on tilted surfaces // *Solar Energy*. – 1979. – Vol. 23. – № 2. – P. 111–114.
41. Duffie J.A., Beckman W.A., Worek W.M. *Solar engineering of thermal processes*. – New Jersey, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, 2003. – Vol. 11. – 928 p.
42. Arvid Skartveit J.A.O. A model for the diffuse fraction of hourly global radiation // *Solar Energy*. – 1987. – Vol. 38. – P. 271–274.
43. Steven M.D., Unsworth M.H. The angular distribution and interception of diffuse solar radiation below overcast skies // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. – 1980. – Vol. 106. – № 447. – P. 57–61.
44. Willmott C.J. On the climatic optimization of the tilt and azimuth of flat-plate solar collectors // *Solar Energy*. – 1982. – Vol. 28. – № 3. – P. 205–216.
45. Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance / R. Perez, P. Ineichen, R. Seals, J. Michalsky, R. Stewart // *Solar Energy*. – 1990. – Vol. 44. – № 5. – P. 271–289.
46. Optimal design and techno-economic analysis of renewable-based multi-carrier energy systems for industries: a case study of a food factory in China / X. Li, J. Gao, S. You, Y. Zheng, Y. Zhang, Q. Du, M. Xie, Y. Qin // *Energy*. – 2022. – Vol. 244 (123174). – P. 1–17.
47. Potential of residential building integrated photovoltaic systems in different regions of China / X. Feng, T. Ma, Y. Yamaguchi, J. Peng, Y. Dai, D. Ji // *Energy for Sustainable Development*. – 2023. – Vol. 72. – P. 19–32.
48. A techno-economic sizing method for grid-connected household photovoltaic battery systems / Y. Zhang, T. Ma, P. Elia Campana, Y. Yamaguchi, Y. Dai // *Applied Energy*. – 2020. – Vol. 269 (115106). – P. 1–15.

Информация об авторах

Сергей Владимирович Митрофанов, кандидат технических наук, доцент кафедры электро- и теплоэнергетики Оренбургского государственного университета, Россия, 460018, г. Оренбург, пр. Победы, 13; mitser2002@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6640-8434>

Поступила в редакцию: 18.12.2023

Поступила после рецензирования: 30.01.2024

Принята к публикации: 10.09.2024

REFERENCES

1. Mousavi Maleki S., Hizam H., Gomes C. Estimation of hourly, daily and monthly global solar radiation on inclined surfaces: models re-visited. *Energies*, 2017, vol. 10, no. 1 (134), pp. 1–28.
2. Berrizbeitia S.E., Jadraque Gago E., Muneer T. Empirical models for the estimation of solar sky-diffuse radiation. A review and experimental analysis. *Energies*, 2020, vol. 13, no. 3 (701), pp. 1–23.
3. Yin K., Zhang X., Xie J., Hao Z., Xiao G., Liu J. Modeling hourly solar diffuse fraction on a horizontal surface based on sky conditions clustering. *Energy*, 2023, vol. 272 (127008), pp. 1–12.
4. Yu Y., Tang Y., Chou J., Yang L. A novel adaptive approach for improvement in the estimation of hourly diffuse solar radiation: a case study of China. *Energy Conversion and Management*, 2023, vol. 293 (117455), pp. 11–12.

5. Cao Q., Yang L., Liu Y., Wang S. Development criterion of estimating hourly global solar radiation for all sky conditions in China. *Energy Conversion and Management*, 2023, vol. 284 (116946), pp 1–15.
6. Ramadan A., Elistratov V.V. Assessment of the arrival of solar energy and the choice of the optimal angle of inclination of the solar battery for the conditions of Syria. *International Scientific Journal Alternative Energy and Ecology*, 2018, no. 22–24 (270–272), pp. 12–27. (In Russ.)
7. Su G., Zhang S., Yao W., Hu M., Hao H. Study on the evaluation method of diffuse radiation models taking 5 typical cities in China as examples. *Energy and Built Environment*, 2023, vol. 4, pp. 236–243.
8. Mitrofanov S.V. Choosing the optimal angle of inclination of solar panels for placing them in an arbitrary region. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Energy*, 2023, vol. 23, no. 1, pp. 5–11. (In Russ.)
9. Maxwell E.L. Metstat – the solar radiation model used in the production of the National Solar Radiation Data Base (NSRDB). *Solar Energy*, 1998, vol. 62, no. 4, pp. 263–279.
10. Yang K., Koike T. A general model to estimate hourly and daily solar radiation for hydrological studies. *Water Resources Research*, 2005, vol. 41, no. 10, pp. 1–13.
11. Yao W., Li Z., Xiu T., Lu Y., Li X. New decomposition models to estimate hourly global solar radiation from the daily value. *Solar Energy*, 2015, vol. 120, pp. 87–99.
12. Khatib T., Deria R. East-west oriented photovoltaic power systems: model, benefits and technical evaluation. *Energy Conversion and Management*, 2022, vol. 266 (115810), pp. 1–15.
13. POWER| Data Access Viewer. Available at: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/> (accessed 18 December 2023).
14. Lam J.C., Li D.H.W. Correlation between global solar radiation and its direct and diffuse components. *Building and Environment*, 1996, vol. 31, no. 6, pp. 527–535.
15. Orgill J.F., Hollands K.G.T. Correlation equation for hourly diffuse radiation on a horizontal surface. *Solar Energy*, 1977, vol. 19, no. 4, pp. 357–359.
16. Reindl D.T., Beckman W.A., Duffie J.A. Diffuse fraction correlations. *Solar Energy*, 1990, vol. 45, no. 1, pp. 1–7.
17. Reindl D.T., *Estimating diffuse radiation on horizontal surfaces and total radiation on tilted surface*. MS Thesis. Madison, 1988. 209 p.
18. Boland J., Ridley B., Brown B. Models of diffuse solar radiation. *Renewable Energy*, 2008, vol. 33, no. 4, pp. 575–584.
19. Hawlader M.N.A. Diffuse, global and extra-terrestrial solar radiation for Singapore. *International Journal of Ambient Energy*, 1984, vol. 5, no. 1, pp. 31–38.
20. Jacovides C.P., Tymvios F.S., Assimakopoulos V.D., Kaltsounides N.A. Comparative study of various correlations in estimating hourly diffuse fraction of global solar radiation. *Renewable Energy*, 2006, vol. 31, no. 15, pp. 2492–2504.
21. De Miguel A., Bilbao J., Aguiar R., Kambezidis H., Negro E. Diffuse solar irradiation model evaluation in the North Mediterranean Belt area. *Solar Energy*, 2001, vol. 70, no. 2, pp. 143–153.
22. Karatasou S., Santamouris M., Geros V. Analysis of experimental data on diffuse solar radiation in Athens, Greece, for building applications. *International Journal of Sustainable Energy*, 2003, vol. 23, no. 1–2, pp. 1–11.
23. Muneer T., Saluja G.S. A brief review of models for computing solar radiation on inclined surfaces. *Energy Conversion and Management*, 1985, vol. 25, no. 4, pp. 443–458.
24. Erbs D., Klein S., Duffie J. Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation. *Solar Energy*, 1982, vol. 28, no. 4, pp. 293–302.
25. Chandrasekaran J., Kumar S. Hourly diffuse fraction correlation at a tropical location. *Solar Energy*, 1994, vol. 53, no. 6, pp. 505–510.
26. Oliveira A.P., Escobedo J.F., Machado A.J., Soares J. Correlation models of diffuse solar-radiation applied to the city of São Paulo, Brazil. *Applied Energy*, 2002, vol. 71, pp. 59–73.
27. Soares J., Oliveira A.P., Božnar M.Z., Mlakar P., Escobedo J.F., Machado A.J. Modeling hourly diffuse solar-radiation in the city of São Paulo using a neural-network technique. *Applied Energy*, 2004, vol. 79, no. 2, pp. 201–214.
28. Louche A., Notton G., Poggi P., Simonnot G. Correlations for direct normal and global horizontal irradiation on a French Mediterranean site. *Solar Energy*, 1991, vol. 46, no. 4, pp. 261–266.
29. Ramirez-Vergara J., Bosman L.B., Leon-Salas W.D., Wollega E. Ambient temperature and solar irradiance forecasting prediction horizon sensitivity analysis. *Machine Learning with Applications*, 2021, vol. 6 (100128), pp. 2–10.
30. Bi C., Law A.W.-K. Co-locating offshore wind and floating solar farms – Effect of high wind and wave conditions on solar power performance. *Energy*, 2023, vol. 266 (126437), pp. 1–12.
31. Yadav S., Panda S.K., Hachem-Vermette C. Optimum azimuth and inclination angle of BIPV panel owing to different factors influencing the shadow of adjacent building. *Renewable Energy*, 2020, vol. 162, pp. 381–396.
32. Liu B.Y.H., Jordan R.C. Daily insolation on surfaces tilted towards the equator. *ASHRAE Transactions*, 1962, vol. 67, pp. 526–541.
33. Badescu V. 3D isotropic approximation for solar diffuse irradiance on tilted surfaces. *Renewable Energy*, 2002, vol. 26, no. 2, pp. 221–233.
34. Koronakis P.S. On the choice of the angle of tilt for south facing solar collectors in the Athens basin area. *Solar Energy*, 1986, vol. 36, no. 3, pp. 217–225.
35. Tian Y.Q., Davies-Colley R.J., Gong P., Thorrold B.W. Estimating solar radiation on slopes of arbitrary aspect. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, vol. 109, no. 1, pp. 67–74.
36. Bugler J.W. The determination of hourly insolation on an inclined plane using a diffuse irradiance model based on hourly measured global horizontal insolation. *Solar Energy*, 1977, vol. 19, no. 5, pp. 477–491.
37. Temps R.C., Coulson K.L. Solar radiation incident upon slopes of different orientations. *Solar Energy*, 1977, vol. 19, no. 2, pp. 179–184.
38. Hay J.E., Davies J.A. Calculation of the solar radiation incident on an inclined surface. *Proceedings First Canadian Solar Radiation Data Workshop*. Canada, 1980. pp. 59–72.

39. Reindl D.T., Beckman W.A., Duffie J.A. Evaluation of hourly tilted surface radiation models. *Solar Energy*, 1990, vol. 45, no. 1, pp. 9–17.
40. Klucher T.M. Evaluation of models to predict insolation on tilted surfaces. *Solar Energy*, 1979, vol. 23, no. 2, pp. 111–114.
41. Duffie J.A., Beckman W.A., Worek W.M. *Solar engineering of thermal processes*. New Jersey, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, 2003. Vol. 11. 928 p.
42. Arvid Skartveit J.A.O. A model for the diffuse fraction of hourly global radiation. *Solar Energy*, 1987, vol. 38, pp. 271–274.
43. Steven M.D., Unsworth M.H. The angular distribution and interception of diffuse solar radiation below overcast skies. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1980, vol. 106, no. 447, pp. 57–61.
44. Willmott C.J. On the climatic optimization of the tilt and azimuth of flat-plate solar collectors. *Solar Energy*, 1982, vol. 28, no. 3, pp. 205–216.
45. Perez R., Ineichen P., Seals R., Michalsky J., Stewart R. Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance. *Solar Energy*, 1990, vol. 44, no. 5, pp. 271–289.
46. Li X., Gao J., You S., Zheng Y., Zhang Y., Du Q., Xie M., Qin Y. Optimal design and techno-economic analysis of renewable-based multi-carrier energy systems for industries: a case study of a food factory in China. *Energy*, 2022, vol. 244 (123174), pp. 1–17.
47. Feng X., Ma T., Yamaguchi Y., Peng J., Dai Y., Ji D. Potential of residential building integrated photovoltaic systems in different regions of China. *Energy for Sustainable Development*, 2023, vol. 72, pp. 19–32.
48. Zhang Y., Ma T., Elia Campana P., Yamaguchi Y., Dai Y. A techno-economic sizing method for grid-connected household photovoltaic battery systems. *Applied Energy*, 2020, vol. 269 (115106), pp. 1–15.

Information about the authors

Sergey V. Mitrofanov, Cand. Sc., Associate Professor, Orenburg State University, 13, Pobedy avenue, Orenburg, 460018, Russian Federation; mitser2002@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6640-8434>

Received: 18.12.2023

Revised: 30.01.2024

Accepted: 10.09.2024

УДК 504.5+550.3

DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4528

Шифр специальности ВАК: 1.6.21

Комплексирование геоэлектрических методов и дистанционного зондирования Земли при оценке состояния окружающей среды в зоне влияния экологически опасных объектов

А.П. Гусев[✉]

Гомельский Государственный университет им. Ф. Скорины, Республика Беларусь, г. Гомель

[✉]andi_gusev@mail.ru

Аннотация. *Актуальность* исследования заключается в необходимости комплексной оценки компонентов окружающей среды в зонах влияния экологически опасных промышленных объектов, позволяющей оперативно выявлять пространственную структуру техногенного загрязнения. *Цель:* оценка степени химического загрязнения геологической среды в зонах влияния техногенных объектов на основе сопряженного использования космической съемки и наземных геоэлектрических методов. *Объект:* источники загрязнения при производстве минеральных удобрений (отвалы фосфогипса, склад серы). *Методы.* Разработан комплекс методов, состоящий из многозональной космической съемки (снимки спутников Sentinel-2) и наземных геоэлектрических исследований: резистивиметрии поверхностных вод, съемки потенциала естественного электрического поля, вертикального электрического зондирования. По данным космической съемки (вегетационные индексы NDVI, NBR, SWVI) выделяются техногенные модификации геосистем, характеризующие различные уровни химического загрязнения (ТМ-1, ТМ-2 и фоновая геосистема). В пределах зон модификаций выполняются геоэлектрические исследования для оценки распространения загрязнения в глубину. *Результаты.* В зоне влияния отвалов фосфогипса выделены две техногенные модификации общей площадью 83,3 га, характеризующиеся статистически значимым снижением значений вегетационных индексов по сравнению с фоном. По результатам вертикального электрического зондирования установлено, что глубина загрязнения в зоне ТМ-1 – до 20 м, в зоне ТМ-2 – до 2,5 м. От отвалов миграция загрязненных веществ осуществляется с поверхностным стоком. В зоне влияния склада серы ареал загрязнения, выделенный по вегетационным индексам, охватывает 2 га. По результатам метода естественного электрического поля и вертикального электрического зондирования поток загрязняющих веществ от склада серы проникает в грунтовые воды, которые разгружаются в зоне ТМ-1, вызывая гибель растительности. В зоне ТМ-2 загрязнение фиксируется только в грунтовом водоносном горизонте. Разработанный комплекс методов позволяет оперативно и достаточно полно диагностировать состояние окружающей среды, подвергающейся техногенному воздействию.

Ключевые слова: окружающая среда, химическое загрязнение, вегетационные индексы, геоэлектрические методы, вертикальное электрическое зондирование, резистивиметрия, удельное электрическое сопротивление

Для цитирования: Гусев А.П. Комплексирование геоэлектрических методов и дистанционного зондирования Земли при оценке состояния окружающей среды в зоне влияния экологически опасных объектов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 10. – С. 134–145. DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4528

UDC 504.5+550.8

DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4528

Integration of geoelectric methods and remote sensing in assessing the environment state in the area of impact of ecologically hazardous objects

A.P. Gusev[✉]

Francisk Skorina Gomel State University, Gomel, Belarus

[✉]andi_gusev@mail.ru

Abstract. Relevance. The need for comprehensive assessment of environmental components in the zones of ecologically hazardous industrial facilities impact, which enables to operatively identify the spatial structure of technogenic pollution. **Aim.** Chemical pollution assessment of the geological environment in the zones of industrial objects impact, based on the combined use of remote sensing and ground-based geoelectric methods. **Objects.** Sources of pollution during the production of mineral fertilizers (phosphogypsum dumps, sulfur storage). **Methods.** The author has developed a complex of methods, consisting of multispectral space imaging (Sentinel-2 satellite images) and ground-based geoelectric researches: water surface resistivity measurements, natural electric field potential imaging, vertical electrical sounding. According to satellite image data (vegetation indices NDVI, NBR, SWVI), technogenic geosystems modifications are distinguished, characterizing different levels of chemical pollution (TM-1, TM-2 and natural geosystem). Within the modification zones, geoelectrical studies are carried out to assess the depth of contamination. **Results.** In the zone of phosphogypsum dumps impact, two technogenic modifications were distinguished, with a total area of 83.3 hectares, characterized by a statistically significant decrease in the values of vegetation indices compared to the average level. Based on the results of vertical electrical sounding, it was established that the depth of contamination in the TM-1 zone reaches up to 20 m, in the TM-2 zone – up to 2.5 m. The migration of contaminated substances from the dumps occurs with surface drain. In the zone of impact of the sulfur storage, the area of pollution, specified with vegetation indices, covers two hectares. According to the results of the natural electric field method and vertical electrical sounding, the flow of pollution from the sulfur storage site penetrates into groundwater, which is discharged in the TM-1 zone, causing the death of vegetation. In the TM-2 zone, contamination is registered only in the ground aquifer. The developed set of methods enables to quickly and relatively comprehensively diagnose the state of the undergoing technogenic impacts geological environment.

Keywords: environment, chemical pollution, vegetation indices, geoelectric methods, vertical electrical sounding, resistivity measurement, electrical resistivity

For citation: Gusev A.P. Integration of geoelectric methods and remote sensing in assessing the environment state in the area of impact of ecologically hazardous objects. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 10, pp. 134–145. DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4528

Введение

Химическое производство является мощным источником воздействия на компоненты окружающей среды: атмосферный воздух, растительность, почвы, грунты, поверхностные и подземные воды. Оценка состояния окружающей среды, как правило, производится по отдельным компонентам, при этом основное внимание уделяется воздушному бассейну и поверхностным водам. Изучение геологической среды, как правило, ограничивается локальным мониторингом подземных вод в нескольких скважинах, разбросанных на площади в несколько км². Как следствие имеющаяся система экологической оценки дает разрозненную и неполную информацию о распространении химического загрязнения в окружающей среде. Поэтому актуальным является поиск рационального комплекса методов, который позволит оперативно получать информацию о состоянии как земной поверхности, так и геологической среды (т. е. обоснование сочетания методов, обеспечивающих надежное решение поставленной задачи в случае определенного типа объектов в конкретных геологических условиях).

Эффективным методом изучения химического загрязнения являются геоэлектрические исследования (электроразведка), основанные на взаимосвязи между удельным электрическим сопротивлением и содержанием растворенных солей в воде [1, 2]. Имеются многочисленные примеры успешного решения методами электроразведки задач по оценке и картографированию загрязнения подземных вод,

засоления почв, выявлению утечек стоков из шламохранилищ и т. д. [3–15].

Использование электроразведки позволяет осуществлять непрерывные площадные наблюдения при относительно низкой стоимости работ, без бурения скважин и нарушения растительного покрова и почв горными выработками.

Однако недостатком геоэлектрических методов является неоднозначность их интерпретации, поскольку удельное электрическое сопротивление зависит от многих факторов. Для повышения эффективности применения электроразведки при изучении химического загрязнения нами предложено использовать ее в комплексе с дистанционными методами [16]. Наиболее важным экологическим индикатором выступают вегетационные индексы, рассчитываемые на основе многозональной космической съемки и отражающие состояние растительного покрова [17–22].

Цель исследований – оценка химического загрязнения окружающей среды в зонах влияния техногенных объектов на основе сопряженного использования космической съемки и наземных геоэлектрических методов. При этом решались следующие задачи: выделение техногенных модификаций геосистем, соответствующих определенным уровням загрязнения; оценка химического загрязнения почв и поверхностных вод; изучение распространения загрязнения по вертикали, в подземных водах; выяснение механизмов распространения загрязнения в геологической среде.

Объекты исследования

Район исследований находится на юго-востоке Беларуси. Для геологического строения характерен сплошной чехол четвертичных отложений, имеющих мощность в среднем 20–25 м. В разрезе представлены: нерасчлененный комплекс водноледниковых отложений березинско-припятского (среднеплейстоценового) возраста (вскрывается на глубинах 4–18 м, имеет мощность 5–15 м, подстилается отложениями палеогена, перекрывается припятской мореной, представлен мелко- и тонкозернистыми песками); моренные отложения припятского горизонта (залегает на глубинах 1–17 м, имеют мощность 3,5–16 м, сложены супесями и суглинками с включениями гравия и гальки); водноледниковые надморенные отложения припятского горизонта (залегает с поверхности, имеют мощность 0,8–12 м, сложены мелко- и тонкозернистыми песками, с прослоями пылеватых супесей, реже суглинков); аллювиальные отложения второй надпойменной террасы позднеплейстоценового возраста (залегает с поверхности, характеризуются мощностью 1–11 м, сложены песками различного гранулометрического состава).

Зона активного водообмена (мощность 260–280 м) включает пять водоносных горизонтов: безнапорный грунтовый горизонт, приуроченный к водноледниковым отложениям припятского горизонта и отложениям второй надпойменной террасы рек Уза и Сож; напорный горизонт, приуроченный к нерасчлененным водно-ледниковым отложениям березинско-припятского возраста (подморенный); напорный горизонт, приуроченный к отложениям харьковского яруса палеогена (палеогеновый); напорный горизонт верхнемеловых отложений (турон-маастрихский); напорный горизонт пограничный между верхним и нижним отделами меловой системы (апт-нижнесеноманский).

Объекты исследования связаны с крупнейшим в Беларуси предприятием химической промышленности, производящим более 20 видов химической продукции (серная и фосфорная кислоты, аммофос, суперфосфат, азотно-фосфорно-калийные удобрения, фтористый алюминий и т. д.). Промышленный комплекс состоит из основных и вспомогательных производств, включает систему из наземных и подземных коммуникаций и продуктопроводов, складов технического сырья и готовой продукции, станций нейтрализации, прудов-отстойников, шламонакопителей и полигона твердых отходов. В ходе производства фосфорных удобрений применяется сернокислая обработка фосфатов, при которой в качестве твердого отхода образуется фосфогипс – сульфат кальция с примесью фосфатов. Фосфогипсовые отходы складываются на территории специального полигона (накоплено более 17 млн т, зани-

мающих территорию около 100 га). Отвалы фосфогипса являются постоянно действующим источником поступления загрязняющих веществ в поверхностные и грунтовые воды, почвогрунты, причиной деградации растительного покрова и т. д. [3, 21]. В поверхностных водах на территории отвалов минерализация достигает 10–20 г/дм³, содержание сульфат-иона – 1–6 г/дм³, фосфора фосфатного – 1–5 г/дм³, иона-фтора – 0,5–1,5 г/дм³. Грунтовые воды в зоне влияния отвалов также загрязнены сульфат-ионом, фосфором фосфатным, ионами железа, фтора, аммония. Минерализация грунтовых вод составляет до 10–20 г/дм³ [23].

Ряд источников загрязнения находится в пределах промышленной площадки предприятия. Из них наиболее экологически опасным является склад серы. Механизм формирования загрязнения в этом случае связан с окислением элементарной серы, складываемой на открытой площадке, микроорганизмами.

Методика исследования

Методика исследования включала:

- обработку и анализ космических многозональных снимков (спутники Sentinel-2), расчет вегетационных индексов, характеризующих состояние растительного покрова (NDVI, NBR, SWVI);
- резистивиметрию поверхностных вод (в лужах и канавах);
- съемку методом потенциала естественного электрического поля (ЕЭП) с шагом между точками наблюдения 10 м;
- вертикальное электрическое зондирование (ВЭЗ) методом сопротивлений на постоянном токе (размеры питающих линий АВ от 3 до 300 м, приемных линий MN – от 1 до 20 м, расстояние между точками наблюдения – 100 м).

По данным космической съемки выделялись техногенные модификации геосистем, характеризующие различные уровни химического загрязнения (ТМ-1, ТМ-2 и фоновая геосистема). Геоэлектрические исследования для оценки распространения загрязнения в глубину выполнялись в пределах ареалов выделенных техногенных модификаций.

В работе использованы данные спутников Sentinel-2, осуществляющих мультиспектральную съемку в 13 каналах, охватывающих диапазон от 433 до 2280 нанометров. Пространственное разрешение съемки в зависимости от канала – 10–60 м. В частности, каналы B02 (голубой), B03 (зеленый), B04 (красный), B08 (ближний инфракрасный) имеют разрешение 10 м; каналы B11 и B12 (коротковолновые) – 20 м. Ширина полосы захвата – 290 км. Периодичность съемки – 2–3 дня. На основе съемки по формулам, приведенным в табл. 1, рассчитывались вегетационные индексы.

Для проведения геоэлектрических работ использована электроразведочная аппаратура ERA-MAX. Для съемки методом ЕЭП применены неполяризующиеся электроды системы ВИРГ [1, 24]. Для определения минерализации вод использован портативный резистивиметр, измеряющий удельную электрическую проводимость и соответствующую ей минерализацию воды (в мг/дм³). Интерпретация данных ВЭЗ проводилась с помощью программы IPI2Win [24]. Интерполяции и построение карт потенциала ЕЭП в изолиниях – Golden Software Surfer. Для обработки и атмосферной коррекции космических снимков, расчета вегетационных индексов, выделения ареалов техногенных модификаций использована геоинформационная система QGIS. Для статистической обработки – программы MS Excel и STATISTICA.

Результаты и их обсуждение

Отвалы фосфогипса

В зоне влияния отвалов фосфогипса (рис. 1) образовались техногенные модификации (ТМ) исходной луговой геосистемы (луг разнотравно-злаковый на дерновых песчаных почвах), которые различаются по степени повреждения растительного покрова:

- ТМ-2 – участок с мозаичным тростниково-березовым фитоценозом;
- ТМ-1 – участок, полностью лишенный растительного покрова.

Образование техногенных модификаций вызвано воздействием загрязнения от отвалов фосфогипса по направлению движения поверхностного стока.

На основе снимков спутников Sentinel-2 рассчитывались вегетационные индексы. Так, например, для выяснения величины NDVI использовались снимки в красном и ближнем инфракрасном диапазонах. На рис. 2 показана схема расположения выделенных модификаций и полигона отходов фосфогипса, на рис. 3, 4 представлены снимки данного участка, соответственно, в красном и ближнем инфракрасном диапазонах. На рис. 5 представлен результат расчета NDVI.

Таблица 1. Формулы расчета вегетационных индексов

Table 1. Formulas for calculating vegetation indices

Вегетационный индекс Vegetation index	Формула для расчета на основе каналов спутников Sentinel-2 Formula for calculation based on channels of Sentinel-2 satellites
NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)	$(NIR - R) / (NIR + R)$
NBR (Normalized Burn Ratio)	$(NIR - SWIR2) / (NIR + SWIR2)$
SWVI (Short Wave Vegetation Index)	$(NIR - SWIR2) / (NIR + SWIR1)$

Примечание/Note. Каналы спутника Sentinel-2: NIR – ближний инфракрасный; R – красный; SWIR2 – второй коротковолновой инфракрасный; SWIR1 – первый коротковолновой инфракрасный/Sentinel-2 satellite channels: NIR – near infrared; R – red; SWIR2 – second shortwave infrared; SWIR1 – first shortwave infrared.



Рис. 1. Отвалы фосфогипса и их зона влияния
Fig. 1. Phosphogypsum dumps and their impact zone

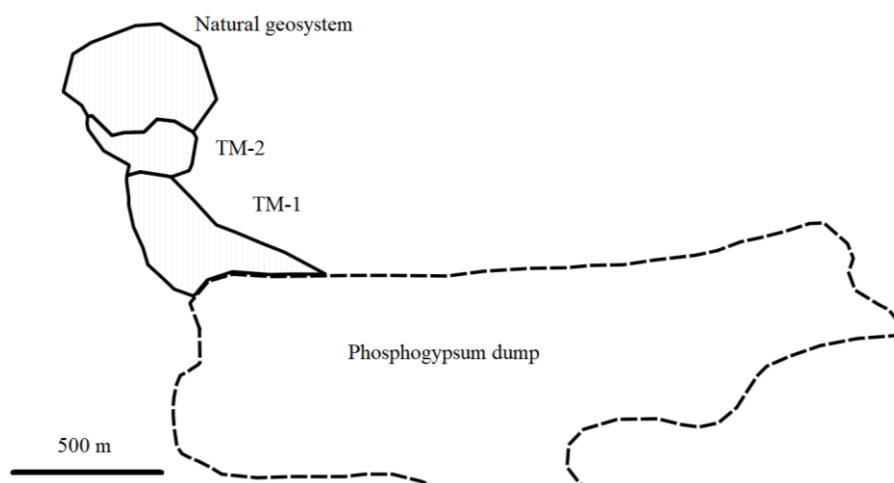


Рис. 2. Схема расположения отвалов фосфогипса и их зоны влияния
Fig. 2. Layout of phosphogypsum dumps and their impact zone

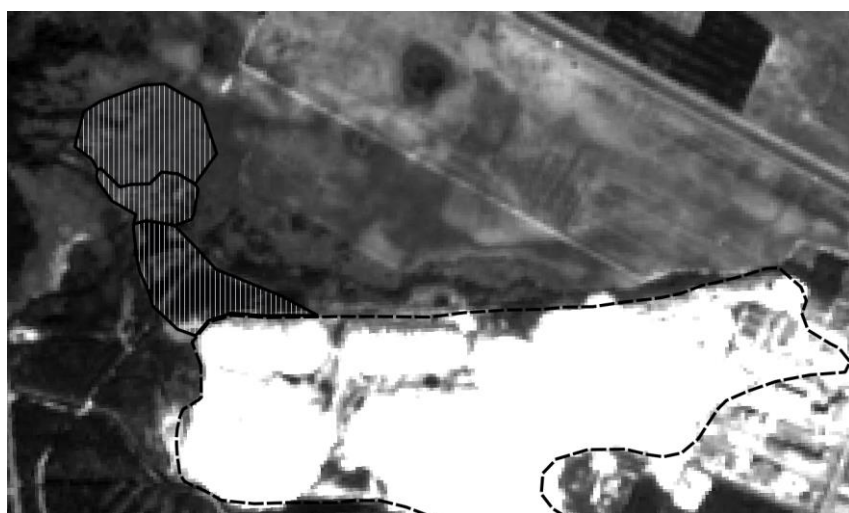


Рис. 3. Изображение участка в красном диапазоне
Fig. 3. Red image of the area

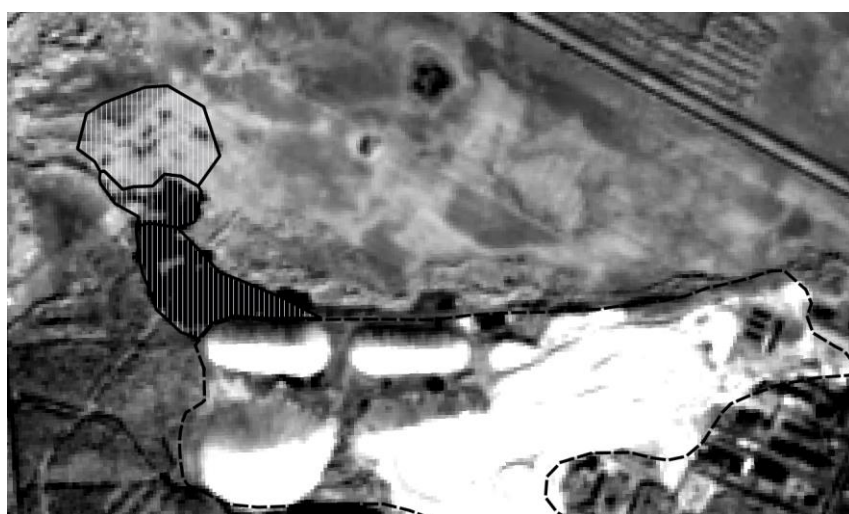


Рис. 4. Изображение участка в ближнем инфракрасном диапазоне
Fig. 4. Near-infrared image of the area

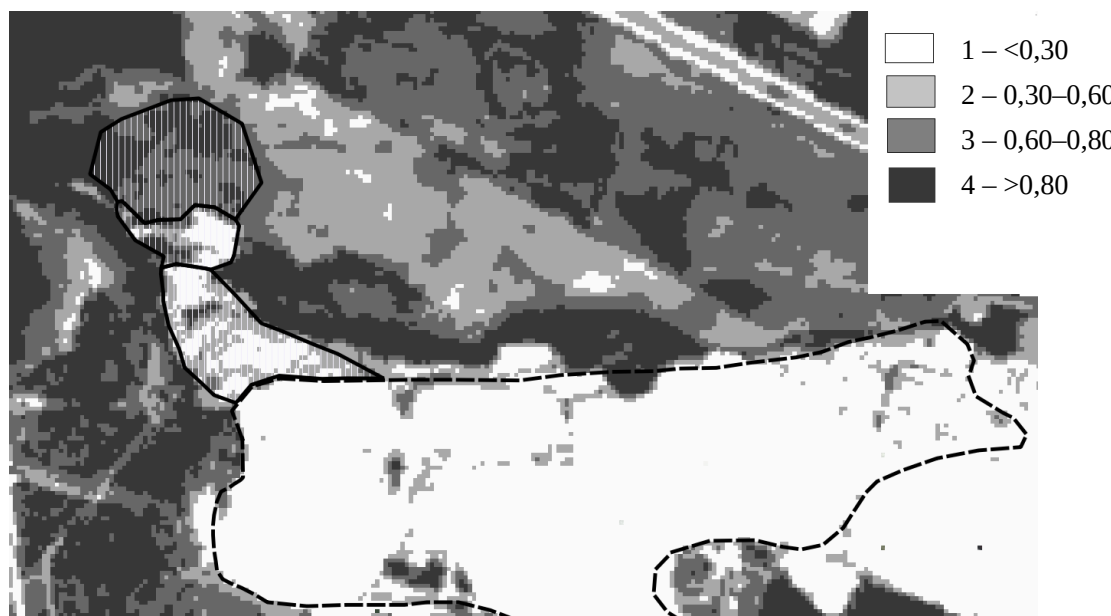


Рис. 5. Результаты расчета NDVI

Fig. 5. NDVI calculation results

Каждая модификация характеризуется определенным диапазоном величин вегетационных индексов (табл. 2). Это позволяет выделить ареалы распространения указанных модификаций и определить их площади. Так, площадь фоновой геосистемы составляет 101,4 га, зоны ТМ-2 – 34,5 га, зоны ТМ-1 – 48,8 га. Зона ТМ-1 находится в пределах отвалов фосфогипса (общая площадь полигона более 100 га).

Таблица 2. Изменения вегетационных индексов по градиенту химического загрязнения в зоне влияния экологически опасных объектов

Table 2. Changes in vegetation indices along the gradient of chemical pollution in the zone of influence of ecologically hazardous objects

Индикатор Indicator	Градиент химического загрязнения Chemical pollution gradient		
	Фоновая геосистема Natural geosystem	ТМ-2	ТМ-1
NDVI	0,803*	0,596	0,324
	0,773**	0,580	0,343
NBR	0,567	0,381	0,318
	0,536	0,315	0,170
SWVI	0,253	0,106	0,017
	0,241	0,030	-0,080

Примечание/Note: *отвалы фосфогипса (phosphogypsum dumps); **склад серы (sulfur storage).

Значения NDVI в зоне ТМ-1 колеблются от 0,044 до 0,780. Среднее значение NDVI здесь ниже фонового в 2,5 раза, медианное – в 3,4 раза. Значения NBR – от 0,04 до 0,579, среднее значение ниже фонового в 1,8 раза, медианное – в 1,9 раза. Значения

SWVI изменяются от –0,224 до 0,282, среднее значение ниже фонового в 14,9 раза, медианное – в 27,2 раза. Все указанные отличия статистически достоверные.

В зоне ТМ-2 величина NDVI находится в интервале 0,198–0,872, среднее значение ниже фонового в 1,4 раза, медианное – в 1,3 раза. Величина индекса NBR составляет 0,040–0,682, среднее значение ниже фонового в 1,5 раза, медианное – в 1,4 раза. Величина SWVI изменяется от –0,22 до 0,391, среднее значение ниже фонового в 2,4 раза, медианное – в 2,2 раза. В данном случае также отличия статистически достоверные.

Изменения NDVI отражают изменения продуктивности луговой геосистемы, подвергшейся воздействию химического загрязнения со стороны отвалов. Снижение NBR и SWVI указывают на стрессовое состояние растительности (усыхание, пожелтение, разрежение травостоя – фиксируются в отражательной способности земной поверхности). Наиболее чувствительным к повреждению растительности токсичными веществами оказывается SWVI. Рассмотренные результаты дают представление об экологическом эффекте, однако выявление механизма воздействия отвалов на растительность требует изучения процессов в геологической среде.

Для выяснения распространения загрязнения в глубину в пределах фоновой геосистемы и ее техногенных модификаций были проведены ВЭЗ. В качестве примера для сравнения на рис. 6 приведены кривые ВЭЗ, полученные на фоновом участке и на участке ТМ-1.

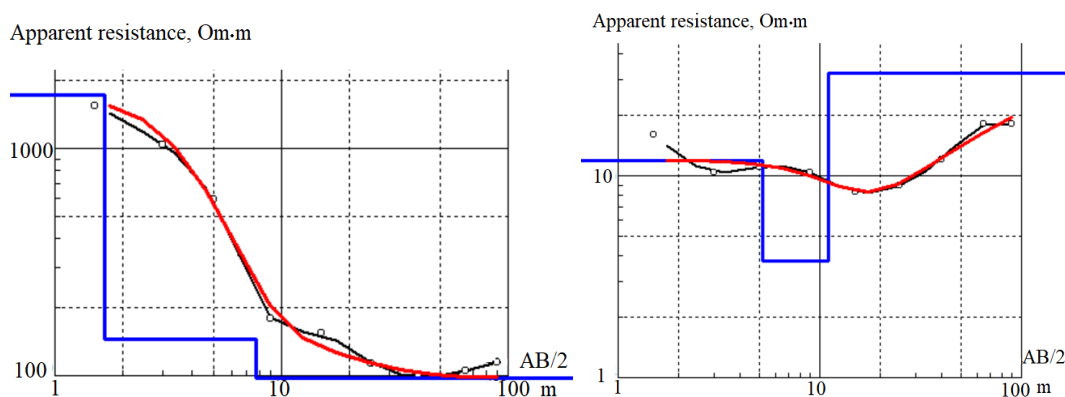


Рис. 6. Кривые ВЭЗ: фоновая геосистема (слева) и зона ТМ-1 (справа)
Fig. 6. VES curves: natural geosystem (left) and TM-1 zone (right)

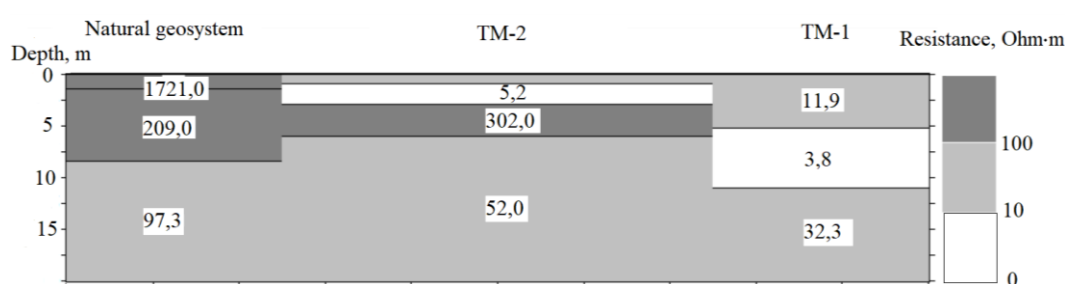


Рис. 7. Геоэлектрический разрез через зону влияния отвалов фосфогипса
Fig. 7. Geoelectric section through the impact zone of phosphogypsum dumps

Полученный в ходе интерпретации геоэлектрический разрез показан на рис. 7. Видно, что фоновый геоэлектрический разрез характеризуется снижением электрического сопротивления с глубиной, что обусловлено его литологическими особенностями: водно-ледниковые песчаные отложения подстилаются моренными супесями. Самый верхний слой представляет собой относительно сухие пески и характеризуется высоким сопротивлением. На глубине 1,4 м залегает слой с более низким сопротивлением, которой интерпретируется как грунтовый водоносный горизонт. На глубине около 8 м залегают моренные отложения (супеси, суглинки), что объясняет дальнейшее снижение сопротивления.

На участке ТМ-1 сопротивление до глубины 10 м аномально низкое, что обусловлено значительным повышением минерализации подземных вод. Минимальное сопротивление характерно для интервала 5–10 м, где, вероятно, имеет место максимальный уровень засоления. По данным резистивиметрии минерализация поверхностных вод в лужах здесь составляет 5–10 г/дм³. Минерализации проб воды из грунтового водоносного горизонта – 3–4 г/дм³. В интервале глубин 10–20 м сопротивление увеличивается, но все равно остается в 2–3 раза ниже, чем в зоне ТМ-2 и фоновой геосистеме.

На участке ТМ-2 низкое сопротивление отмечается только в самой верхней части разреза – до

глубины 2,5 м (рис. 7). Это позволяет предположить, что миграция загрязняющих веществ к этому участку идет с поверхностным стоком, а загрязнение ниже грунтового водоносного горизонта отсутствует.

Склад серы

В зоне влияния склада серы (рис. 8) находится геосистема заболоченного леса (мелколиственный лес разнотравный на дерново-глеявых супесчаных почвах). Под воздействием загрязнения в окружающем ландшафте сформированы техногенные модификации исходной геосистемы:

- ТМ-2 – участок с мозаичным тростниково-березовым фитоценозом;
- ТМ-1 – участок, полностью лишенный растительного покрова.

Как и в предыдущем случае, ареалы техногенных модификаций четко выделяются по значениям вегетационных индексов (табл. 2). При этом площадь фоновой геосистемы составляет 1,4 га, зоны ТМ-2 – 1,1 га, зоны ТМ-1 – 0,9 га. Склад серы находится на расстоянии 50 м от зоны ТМ-1 и на расстоянии 120 м от границы фоновой геосистемы (по прямой). Площадь склада серы составляет 0,18 га. Техногенные модификации отделены от фоновой геосистемы насыпью железной дороги (высота насыпи 1,5 м, ширина 10 м).



Рис. 8. Склад серы и зона его влияния
Fig. 8. Sulfur storage and its impact area

Наиболее низкие значения вегетационных индексов приурочены к зоне ТМ-1. По сравнению с фоновой геосистемой значение NDVI здесь снижается в 2–2,25 раза, значение NBR – в 2,31–3,15 раза, а значение SWVI – в десятки раз. В зоне ТМ-2 по сравнению с фоновой геосистемой значение NDVI снижается в 1,33–1,34 раза, значение NBR – в 1,65–1,7 раза, значение SWVI – в 4,28–8,03 раза.

Химическое загрязнение фиксируется в водах луж и каналов: по данным резистивиметрии в зоне ТМ-1 минерализация вод местами достигает 10 г/дм^3 (удельное электрическое сопротивление – менее $1 \text{ Ом}\cdot\text{м}$), а среднее значение составляет $7,237 \text{ г/дм}^3$. Негативное воздействие на растительность также обусловлено весьма высокой кислотностью вод ($\text{pH} < 3$). В зоне ТМ-2 минерализация поверхностных вод снижается до $0,3\text{--}1,5 \text{ г/дм}^3$ (среднее значение – 482 мг/дм^3). Величина pH здесь составляет $4,5\text{--}5,5$ единицы. В пределах фоновой геосистемы минерализация ниже 1 г/дм^3 (среднее значение – 297 мг/дм^3), за исключением одной точки наблюдения, расположенной непосредственно напротив зоны ТМ-1. Величина pH – около 6.

Для изучения особенностей движения поверхностных и подземных вод, их взаимосвязи, а также распространения фронта загрязнения в геологической среде были использованы геоэлектрические методы – ЕЭП и ВЭЗ. Метод ЕЭП применяется для определения мест повышенной инфильтрации поверхностных вод, мест разгрузки подземных вод,

прослеживания направления миграции неглубоко залегающих подземных вод. Повышенная фильтрация диагностируется по отрицательным аномалиям, а разгрузка подземных вод – по положительным аномалиям потенциала естественного электрического поля [1].

Установлено, что зона ТМ-1 характеризуется положительными значениями потенциала естественного электрического поля (от 0 до $+15 \text{ мВ}$), т. е. здесь происходит разгрузка грунтовых вод), а остальная часть территории – отрицательными (от -40 до 0 мВ), что указывает на инфильтрацию поверхностных вод в грунтовый горизонт (рис. 9). Исходя из этого, можно предположить, что загрязняющие вещества с земной поверхности на участке склада серы мигрируют в грунтовые воды, которые затем разгружаются в зоне ТМ-1, вызывая засоление поверхностных почвогрунтов и гибель растительности. Для зоны ТМ-2 характерна инфильтрация осадков в грунтовые воды и, как следствие, меньшая степень воздействия загрязненных грунтовых вод на растительность.

На основе выполненных ВЭЗ был построен геоэлектрический разрез (рис. 10). В фоновой геосистеме и на участке ТМ-2 верхняя часть геологической среды состоит соответственно из четырех и пяти слоев, различающихся по удельному электрическому сопротивлению. Верхний слой характеризуется высоким сопротивлением ($400\text{--}500 \text{ Ом}\cdot\text{м}$) и мощностью $1,1\text{--}1,3 \text{ м}$ (соответствует песчаными почвам).

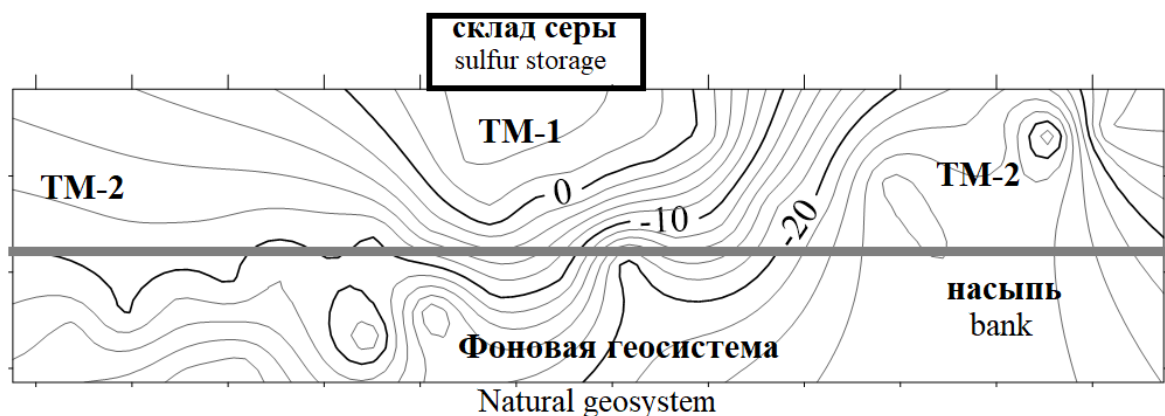


Рис. 9. Изолинии потенциала ЕЭП (в мВ) в зоне влияния склада серы
Fig. 9. Isolines of the CES potential (in mV) in sulfur storage impact zone

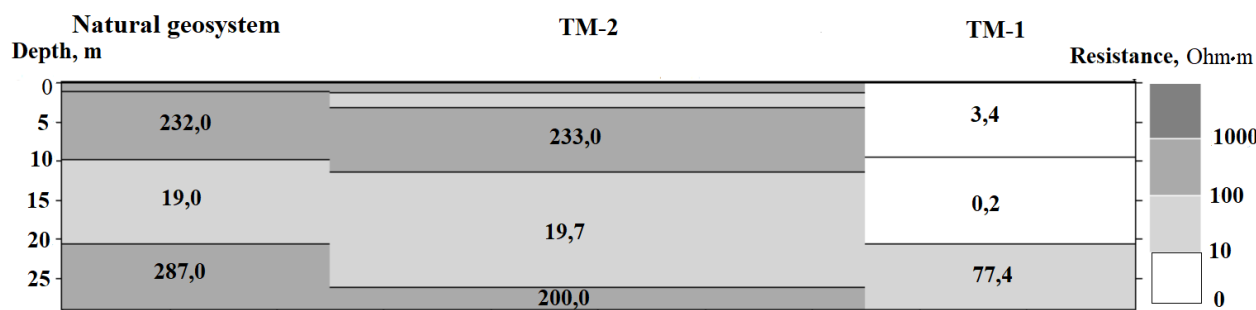


Рис. 10. Геоэлектрический разрез через зону влияния склада серы, Ом·м
Fig. 10. Geoelectric section through the sulfur storage impact zone, Ohm·m

Второй слой в фоновой геосистеме (имеет сопротивление 232 Ом·м и мощность 9,7 м) интерпретируется как грунтовый водоносный горизонт в водно-ледниковых песках. Третий слой, в котором сопротивление снижается до 19 Ом·м, представляет собой моренные отложения (супеси и суглинки с гравием и галькой) и подморенный водоносный горизонт, распространенные до глубины 22 м. Подстилающий слой имеет высокое сопротивление (287 Ом·м) и соотносится с отложениями палеогена (пески, алевроиты). На участке ТМ-2 второй слой имеет сопротивление 83 Ом·м и мощность 3,2 м – грунтовый водоносный горизонт. Третий слой (233 Ом·м) имеет мощность 10 м. По сравнению с фоновой геосистемой более четкое выделение грунтового водоносного горизонта обусловлено его загрязнением, вызвавшим снижение удельного электрического сопротивления. Ниже залегают моренные отложения и подморенный водоносный горизонт (19,7 Ом·м).

Геоэлектрический разрез на участке ТМ-1 резко отличается от вышеописанных. С поверхности до глубины около 20 м разрез характеризуется низким электрическим сопротивлением – до 5 Ом·м. Ниже сопротивление увеличивается до 77,4 Ом·м. Сни-

жение сопротивления по всему разрезу обусловлено высокой минерализацией вод: поверхностных и подземных – грунтового и подморенного водоносных горизонтов. Анализ результатов ВЭЗ показал, что на участке ТМ-1 загрязнение охватывает зону аэрации, грунтовый и подморенный водоносные горизонты (до глубины 20 м). На участке ТМ-2 загрязнение фиксируется только в грунтовом водоносном горизонте (в районе размещения точки ВЭЗ).

На основе анализа выполненных исследований разработана модель распространения загрязнения в зоне влияния склада серы (рис. 11). Предполагается, что поток загрязнения от склада серы проникает в грунтовые воды, а затем движется к участку разгрузки (зона ТМ-1). Здесь загрязненные грунтовые воды подходят к земной поверхности и оказывают негативное воздействие на растительность. В зоне ТМ-2 загрязнение распространяется с грунтовыми водами, но, вероятно, к корнеобитаемому слою почв не подходит (соответственно экологический эффект в виде повреждения растительности проявляется в меньшей степени). В пределах фоновой геосистемы загрязнение уже не вызывает сколько-либо значимого снижения сопротивления.

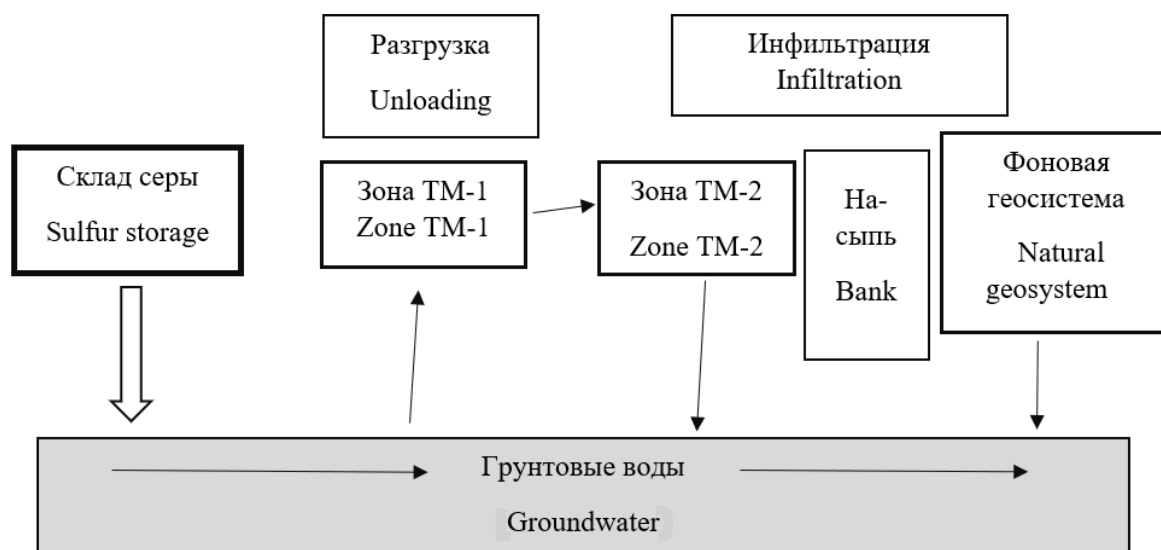


Рис. 11. Миграция загрязнения в зоне влияния склада серы
Fig. 11. Migration of pollution in the sulfur storage impact zone

Заключение

Таким образом, комплексирование космической съемки и геоэлектрических методов позволило получить достаточно полную картину химического загрязнения:

- по вегетационным индексам – картировать зоны техногенной трансформации, определить их границы и площади;

- по результатам резистивиметрии – определить минерализацию поверхностных вод и ее пространственные изменения в зависимости от расстояния до источника;
- по данным метода потенциала ЕЭП – установить закономерности движения грунтовых вод и соответственно миграции загрязняющих веществ;
- по данным ВЭЗ оценить глубину зоны загрязнения и описать ее вертикальную структуру.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Огильви А.А. Основы инженерной геофизики. – М.: Недра, 1990. – 501 с.
2. Оценка засоления почв и грунтовых вод методами электрического сопротивления / А.И. Поздняков, Е.В. Шеин, А.В. Федотова, А.П. Шваров, Л.В. Яковлева. – Астрахань: ИД «Астраханский университет», 2013. – 71 с.
3. Геоэлектрическая диагностика загрязнения геологической среды в зоне влияния полигона токсичных отходов / А.П. Гусев, М.Г. Верутин, П.А. Калейчик, И.О. Прилуцкий, И.А. Шаврин // Вестник Пермского университета. Геология. – 2019. – Т. 18. – № 1. – С. 79–85.
4. Meju M.A. Geoelectrical investigation of old/abandoned, covered landfill sites in urban areas: model development with a genetic diagnosis approach // Journal of Applied Geophysics. – 2000. – Vol. 44. – P. 115–150. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(00\)00011-2](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(00)00011-2)
5. Lashkaripour G.R., Sadeghi H., Qushaei M. Vertical electrical soundings for groundwater assessment in Southeastern Iran: a case study // Journal of Applied Sciences. – 2005. – Vol. 5 (6). – P. 973–977. DOI: <https://doi.org/10.3923/jas.2005.973.977>
6. Anomohanran O. Investigating the geoelectric response of water saturated and hydrocarbon impacted sand in the vicinity of petroleum pipeline // International Journal of Applied Science and Technology. – 2013. – Vol. 3. – № 2. – P. 14–21. DOI: <https://doi.org/10.4236/jwarp.2014.68070>
7. Mycka M., Mendecki M.J. An application of geoelectrical methods for contamination plume recognition in Urbanowice waste disposal // Contemporary Trends in Geoscience. – 2014. – Vol. 2. – P. 42–47. DOI: <https://doi.org/10.2478/ctg-2014-0006>
8. Ofomola M.O. Mapping of aquifer contamination using geoelectric methods at a municipal solid waste disposal site in Warri, Southern Nigeria // Journal of Applied Geology and Geophysics. – 2015. – Vol. 3. – P. 39–47. DOI: <https://doi.org/10.9790/0990-03313947>
9. Electrical resistivity imaging (ERI) monitoring for groundwater contamination in an uncontrolled landfill, South Korea / S. Park, M.-J. Yi, J.-H. Kim, S.W. Shin // Journal of Applied Geophysics. – 2016. – Vol. 135. – P. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2016.07.004>
10. Detection and determination of groundwater contamination plume using time-lapse electrical resistivity tomography (ERT) method / S. Moghaddam, S. Dezhpasand, A. Kamkar Rouhani, S. Parnow, M. Ebrahimi // Journal of Mining & Environment. – 2017. – Vol. 1. – № 8. – P. 103–110. DOI: <https://doi.org/10.22044/jme.2015.523>
11. Investigating the pollution range in groundwater in the vicinity of a tailings disposal site with vertical electrical soundings / R. Duda, S. Mzyk, J. Farbisz, G. Bania // Polish Journal of Environmental Studies. – 2020. – Vol. 29 (1). – P. 101–110. DOI: <https://doi.org/10.15244/pjoes/100478>

12. Sanuade O.A., Arowoogun K.I., Amosun J.O. A review on the use of geoelectrical methods for characterization and monitoring of contaminant plumes // *Acta geophysics*. – 2022. – Vol. 70. – P. 2099–2117. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11600-022-00858-9>
13. Application of geoelectric technique in groundwater protection of quaternary aquifer in Wadi El Natrun, Egypt / M.F. Bedair, R.I. Rifai, A. Gamal, M.S.M. Barseem // *Journal of Geography, Environment and Earth Science International*. – 2023. – Vol. 27. – № 2. – P. 29–48. DOI: [10.9734/JGEEI/2023/v27i2669](https://doi.org/10.9734/JGEEI/2023/v27i2669)
14. Asfahani J. Geo-electrical investigation for characterizing the shallow Quaternary aquifer parameters and vulnerability to contamination: a case study from semi-arid Khanasser Valley region, Syria // *Water Practice & Technology*. – 2023. – Vol. 18. – № 7. – P. 1639–1662. DOI: <https://doi.org/10.2166/wpt.2023.084>
15. Application of frequency selection and geoelectrical sounding methods of mapping of leachate's pathways in an active dumpsite / T.A. Adagunodo, A.I. Ojoawo, N.O. Anie, P.O. Edukugbo // *SN Applied Sciences*. – 2023. – Vol. 5. – P. 352. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42452-023-05557-8>
16. Гусев А.П. Комплексование космической съемки и геоэлектрических методов при диагностике химического загрязнения геологической среды // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. – 2023. – № 3. – С. 133–140.
17. The use of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to assess land degradation at multiple scales: a review of the current status, future trends, and practical considerations / G.T. Yengoh, D. Dent, L. Olsson, A.E. Tengberg, C.J. Tucker. – Lund: University Centre for Sustainability Studies LUCSUS, 2014. – 80 p.
18. Жирин В.М., Князева С.В., Эйдлина С.П. Многолетняя динамика вегетационных индексов темнохвойных лесов после повреждения сибирским шелкопрядом // *Лесоведение*. – 2016. – № 1. – С. 3–14.
19. Miller J.D., Quayle B. Calibration and validation of immediate post-fire satellite-derived data to three severity metrics // *Fire Ecology*. – 2015. – Vol. 11. – № 2. – P. 12–30. DOI: <https://doi.org/10.4996/fireecology.1102012>
20. Мюльгаузен Д.С., Панкратова Л.А., Лесовая С.Н. Оценка экологического состояния ландшафтов по данным о продуктивности растительного покрова // *Гигиена и санитария*. – 2017. – Т. 96 (8). – С. 723–729.
21. Гусев А.П., Шпилевская Н.С. Фитоиндикаторы техногенного химического воздействия на луговые экосистемы // *Экосистемы*. – 2020. – Т. 22. – С. 53–59.
22. Prakasam C., Aravindh R., Nagarajan B. Estimating NDVI and LAI as a precursor for monitoring air pollution along the BBN industrial corridor of Himachal Pradesh, India // *Proceedings*. – 2022. – Vol. 61 (2). – P. 593–603. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.360>
23. Особенности формирования ландшафтно-геохимических барьеров в зоне влияния отходов химических производств (Гомельский химический завод) / А.П. Гусев, О.В. Шершнева, А.И. Павловский, И.О. Прилуцкий, А.Ф. Акулевич // *Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология*. – 2013. – № 2. – С. 147–152.
24. Бобачев А.А., Большаков Д.К., Модин И.Н., Шевнин В.А. Электроразведка. Т. 2. Малоглубинная электроразведка / под ред. А.А. Бобачева, В.А. Шевнина. – М.: МГУ, 2013. – 123 с.

Сведения об авторах

Андрей Петрович Гусев, кандидат геолого-минералогических наук, заведующий кафедрой геологии и географии, Гомельский Государственный университет им. Ф. Скорины, Республика Беларусь, 246028, г. Гомель, ул. Советская, 104. andi_gusev@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1169-1172>

Поступила в редакцию: 11.01.2024

Поступила после рецензирования: 18.01.2024

Принята к публикации: 27.09.2024

REFERENCES

1. Ogilvy A.A. *Fundamentals of engineering geophysics*. Moscow, Nedra Publ., 1990. 501 p. (In Russ.)
2. Pozdnyakov A.I., Shein E.V., Fedotova A.V., Shvarov A.P., Yakovleva L.V. *Assessment of soil and groundwater salinity using electrical resistance methods*. Astrakhan, Astrakhan University Publ., 2013. 71 p. (In Russ.)
3. Gusev A.P., Verutin M.G., Kaleichik P.A., Prilutsky I.O., Shavrin I.A. Geoelectric diagnostics of geological environment pollution in the zone of influence of a toxic waste site. *Bulletin of Perm University. Geology*, 2019, vol. 18, no. 1, pp. 79–85. (In Russ.)
4. Meju M.A. Geoelectrical investigation of old/abandoned, covered landfill sites in urban areas: model development with a genetic diagnosis approach. *Journal of Applied Geophysics*, 2000, vol. 44, pp. 115–150. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(00\)00011-2](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(00)00011-2)
5. Lashkaripour G.R., Sadeghi H., Qushaeei M. Vertical electrical soundings for groundwater assessment in Southeastern Iran: a case study. *Journal of Applied Sciences*, 2005, vol. 5, no. 6, pp. 973–977. DOI: <https://doi.org/10.3923/jas.2005.973.977>
6. Anomohanran O. Investigating the geoelectric response of water saturated and hydrocarbon impacted sand in the vicinity of petroleum pipeline. *International Journal of Applied Science and Technology*, 2013, vol. 3, no 2, pp. 14–21. DOI: <https://doi.org/10.4236/jwarp.2014.68070>
7. Mycka M., Mendecki M.J. An application of geoelectrical methods for contamination plume recognition in Urbanowice waste disposal. *Contemporary Trends in Geoscience*, 2014, vol. 2, pp. 42–47. DOI: <https://doi.org/doi.10.2478/ctg-2014-0006>
8. Ofomola M.O. Mapping of aquifer contamination using geoelectric methods at a municipal solid waste disposal site in Warri, Southern Nigeria. *Journal of Applied Geology and Geophysics*, 2015, vol. 3, pp. 39–47. DOI: <https://doi.org/10.9790/0990-03313947>

9. Park S., Yi M.-J., Kim J.-H., Shin S.W. Electrical resistivity imaging (ERI) monitoring for groundwater contamination in an uncontrolled landfill, South Korea. *Journal of Applied Geophysics*, 2016, vol. 135, pp. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2016.07.004>
10. Moghaddam S., Dezhpasand S., Kamkar Rouhani A., Parnow S., Ebrahimi M. Detection and determination of groundwater contamination plume using time-lapse electrical resistivity tomography (ERT) method. *Journal of Mining & Environment*, 2017, vol. 1, no. 8, pp. 103–110. DOI: <https://doi.org/10.22044/jme.2015.523>
11. Duda R., Mzyk S., Farbisz J., Bania G. Investigating the pollution range in groundwater in the vicinity of a tailings disposal site with vertical electrical soundings. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2020, vol. 29 (1), pp. 101–110. DOI: <https://doi.org/10.15244/pjoes/100478>
12. Sanuade O.A., Arowoogun K.I., Amosun J.O. A review on the use of geoelectrical methods for characterization and monitoring of contaminant plumes. *Acta geophysics*, 2022, vol. 70, pp. 2099–2117. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11600-022-00858-9>
13. Bedair M.F., Rifai R.I., Gamal A., Barseem M.S.M. Application of geoelectric technique in groundwater protection of quaternary aquifer in Wadi El Natrun, Egypt. *Journal of Geography, Environment and Earth Science International*, 2023, vol. 27, no. 2, pp. 29–48. DOI: [10.9734/JGEEI/2023/v27i2669](https://doi.org/10.9734/JGEEI/2023/v27i2669)
14. Asfahani J. Geo-electrical investigation for characterizing the shallow Quaternary aquifer parameters and vulnerability to contamination: a case study from semi-arid Khanasser Valley region, Syria. *Water Practice & Technology*, 2023, vol. 18, no. 7, pp. 1639–1662. DOI: [10.2166/wpt.2023.084](https://doi.org/10.2166/wpt.2023.084)
15. Adagunodo T.A., Ojoawo A.I., Anie N.O., Edukugho P.O. Application of frequency selection and geoelectrical sounding methods of mapping of leachate's pathways in an active dumpsite. *SN Applied Sciences*, 2023, vol. 5, pp. 352. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42452-023-05557-8>
16. Gusev A.P. Integrating satellite imaging and geoelectric methods in diagnosing chemical contamination of the geological environment. *Bulletin of Voronezh State University. Series: Geology*, 2023, no. 3, pp. 133–140. (In Russ.)
17. Yengoh G.T., Dent D., Olsson L., Tengberg A.E., Tucker C.J. *The use of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to assess land degradation at multiple scales: a review of the current status, future trends, and practical considerations*. Lund, University Centre for Sustainability Studies LUCSUS, 2014. 80 p.
18. Zhirin V.M., Knyazeva S.V., Eidlina S.P. Long-term dynamics of vegetation indices of dark coniferous forests after damage by the Siberian silkworm. *Forestry*, 2016, no. 1, pp. 3–14. (In Russ.)
19. Miller J.D., Quayle B. Calibration and validation of immediate post-fire satellite-derived data to three severity metrics. *Fire Ecology*, 2015, vol. 11, no. 2, pp. 12–30. DOI: <https://doi.org/10.4996/fireecology.1102012>
20. Mulhausen D.S., Pankratova L.A., Lesovaya S.N. Assessment of the ecological state of landscapes based on data on the productivity of vegetation cover. *Hygiene and sanitation*, 2017, vol. 96 (8), pp. 723–729. (In Russ.)
21. Gusev A.P., Shpilevskaya N.S. Phytoindicators of technogenic chemical impact on meadow ecosystems. *Ecosystems*, 2020, vol. 22, pp. 53–59. (In Russ.)
22. Prakasam C., Aravindh R., Nagarajan B. Estimating NDVI and LAI as a precursor for monitoring air pollution along the BBN industrial corridor of Himachal Pradesh, India. *Proceedings*, 2022, vol. 61 (2), pp. 593–603. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.360>
23. Gusev A.P., Shershnev O.V., Pavlovsky A.I., Prilutsky I.O., Akulevich A.F. Features of the formation of landscape-geochemical barriers in the zone of influence of chemical production waste (Gomel Chemical Plant). *Geoecology, engineering geology, hydrogeology, geocryology*, 2013, no. 2, pp. 147–152. (In Russ.)
24. Bobachev A.A., Bolshakov D.K., Modin I.N., Shevnin V.A. *Electrical prospecting*. Vol. 2. Shallow electrical prospecting. Eds. A.A. Bobachev, V.A. Shevnin. Moscow, MGU Publ., 2013. 123 p. (In Russ.)

Information about the authors

Andrei P. Gusev, Cand. Sc., Head of the Department of Geology and Geography, Francisk Skorina Gomel State University, 104, Sovetskaya street, Gomel, 246028, Republic of Belarus; andi_gusev@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1169-1172>

Received: 11.01.2024

Revised: 18.01.2024

Accepted: 27.09.2024

УДК 622.24, 504.61, 532.542, 536.252
DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4868
Шифр специальности ВАК: 2.8.2, 01.02.05

Прогресс в исследованиях ингибиторов набухания глин: аналитический обзор

С.С. Ал-обаиди, Д. Эван, С.Н. Харламов✉

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

✉kharsn@mail.ru

Аннотация. Актуальность. Известно, что набухание стенки скважины вследствие присутствия воды негативно сказывается на буровой деятельности, вызывая существенный рост материальных средств. Использование различных ингибиторов позволяет предотвратить последствия этого эффекта и не допустить сужения ствола скважины. В этом смысле рассматриваемые в статье проблемы разработки полимерных, amino-, ионных жидких и сланцевых ингибиторов поверхностно-активных веществ весьма актуальны и представляют практический интерес для инженеров-нефтяников в части перспектив фундаментальных и прикладных исследований указанных вопросов. **Цель** работы связана с изучением: возможностей существующих подходов и методов, определяющих характеристики основных ингибиторов набухания глин; закономерностей изменения свойств традиционных и нетрадиционных глинистых материалов, а также механизмов набухания глин с выделением наиболее характерной группы этих ингибиторов. **Объект:** процессы минимизации эффекта сужения стенки в результате воздействия ингибиторов. **Методы:** систематический, критический и всесторонний анализ современных данных ингибирования набухания глин в области буровых растворов. **Результаты.** Проведен детальный анализ процесса набухания глин. Обсуждаются характеристики ингибиторов, необходимые для предотвращения набухания, в структуре которых содержится азот, ионные жидкости. Отмечается, что качественный ингибитор набухания глин должен: включать в свою основу водорастворимую объемную молекулу с отчетливой гидрофобной и гидрофильной структурой; иметь характеристики, позволяющие заменять гидратированные катионы промежуточного слоя некоторыми гидрофобными катионами, такими как ионы аммония вместо ионов натрия; отличаться способностью хорошо диспергировать множественные катионы. Установлено, что функциональные группы, которые поддерживают связывание ингибитора с силоксановыми группами глины, способны значительно расширять процесс набухания глин.

Ключевые слова: раствор, жидкости, глины, ингибитор, набухание, моделирование, механизмы

Для цитирования: Ал-обаиди С.С., Эван Д., Харламов С.Н. Прогресс в исследованиях ингибиторов набухания глин: аналитический обзор // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 10. – С. 146–166. DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4868

UDC 622.24, 504.61, 532.542, 536.252
DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4868

Progress on clay swelling inhibitors: a comprehensive review

S.S. Al-obaidi, D. Evan, S.N. Kharlamov✉

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

✉kharsn@mail.ru

Abstract. Relevance. It is known that swelling of a well wall due to the presence of water negatively affects drilling operations, causing a significant increase in their material costs. The use of various inhibitors prevents this effect and the drilling mud reacting on wellbore narrowing. In this sense, the problems of developing polymer, amino-, ionic liquid and shale inhibitors of surfactants considered in the article are very relevant and of practical interest to oil engineers in terms of the prospects for fundamental and applied researches of these issues. **Aim.** To study the possibilities of existing approaches and methods that determine the characteristics of the main clay swelling inhibitors, the regularities of changes in the properties

of traditional and non-traditional clay materials, as well as the mechanisms of clay swelling with the identification of the most characteristic group of these inhibitors. **Object.** Processes of minimizing the effect of wall narrowing as a result of exposure to inhibitors. **Methods.** Systematic, critical and comprehensive analysis of modern data on clay swelling inhibition in the field of drilling muds. **Results.** The authors have carried out the detailed analysis of clay swelling. The paper discusses the characteristics of inhibitors required to prevent swelling, in the structure of which nitrogen and ionic liquids are contained. It is noted that a high-quality clay swelling inhibitor should include in its base a water-soluble bulk molecule with a distinct hydrophobic and hydrophilic structure; have characteristics, which allow replacing the hydrated cations of the intermediate layer with some hydrophobic cations, such as ammonium ions instead of sodium ions; differ in the ability to disperse multiple cations well. It was found that functional groups that support inhibitor binding to the siloxane groups of the clay are able to significantly expand clay swelling.

Keywords: mud, liquids, clays, inhibitor, swelling, modelling, mechanisms

For citation: Al-obaidi S.S., Evan D., Kharlamov S.N. Progress on clay swelling inhibitors: a comprehensive review. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 10, pp. 146–166. DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4868

Введение

Сланцевые коллекторы составляют примерно 75 % пробуренных пластов, вызывая 90 % проблем с нестабильностью стенки ствола скважины. Часто глины сцепляют вышестоящие горные породы, поэтому существует высокая вероятность бурения глинистых пород даже во время бурения продуктивных пластов [1–4]. Сланцевые коллекторы имеют высокое содержание глин и различную степень химической активности к воде в зависимости от состава глины, кристаллической структуры, пористости и развития трещин. Причем при контакте с водой глинистые минералы очень восприимчивы к гидратации, набуханию и диспергированию [5, 6]. Гидратация глин обычно состоит из поверхностной, ионной и осмотической гидратации. Хотя набухание глинистых минералов из-за поверхностной гидратации незначительно, давление набухания поверхностной гидратации в замкнутых пространствах (микротрещины, микроразрывы) чрезвычайно велико и определяется диапазоном порядка 4–400 МПа. Это намного выше гидростатического давления столба, обеспечиваемого буровым раствором [7, 8], что объясняет сильное разрушение сланцевых пластов, которые не содержат чувствительных к воде минералов (монтмориллонит). Заметим, что буровые растворы на углеводородной основе в течение многих лет были предпочтительным выбором для бурения терригенных горных пород, чтобы препятствовать гидратации глин, но высокая стоимость и растущие экологические проблемы ограничивают их использование. Поиск высокоэффективных альтернативных буровых растворов на водной основе стал насущной проблемой для специалистов в области нефтяной и газовой промышленности.

Минералы монтмориллонит и иллит, очень похожие по структуре, весьма чувствительны к воде. Замещение решетки в иллите происходит главным образом в кремний-кислородных тетраэдрах на поверхности кристаллического слоя (около 1/6 атомов кремния заменены атомами алюминия). В данном

случае обменные катионы компенсируют избыточный отрицательный заряд. Ионы калия диаметром 0,266 нм аналогичны внутреннему диаметру касательной окружности (0,288 нм) гексагональной структуры решетки в четырехгранных листах кремнезема и кислорода, что позволяет легко проникать в структуру кристаллической решетки для ингибирования гидратации и набухания глин. Чтобы свести к минимуму набухание и гидратацию глин, часто требуются высокие концентрации солей калия, варьирующихся от 2 до 37 % [9, 10]. По этой причине высокие концентрации растворов на основе калия широко использовались для ингибирования с 1960-х гг., но использование таких концентраций может оказать негативное воздействие на окружающую среду, что приводит к высоким затратам на очистку ствола скважины и острой необходимости поиска новых компонентов. Также проблемами высоких концентраций калиевых компонентов являются неконтролируемая фильтрация при высоких температурах и активное окисление скважинного оборудования (коррозия) [11, 12]. Катионные поверхностно-активные вещества были разработаны в качестве ингибиторов набухания глин. Их используют благодаря тому, что частицы глины отрицательно заряжены на всей поверхности. Механизм ингибирования сводится к следующему. Катионы в активной части начинают взаимодействовать с поверхностью глинистой породы и нейтрализуют отрицательный заряд. Поверхность глины становится гидрофобной. Изначально они гидрофильны, но вследствие адсорбции тяжелых фракций углеводородов они гидрофобизируются. Тем самым глина стабилизируется. Однако высокая стоимость и технические трудности, связанные с большими требуемыми объемами приготовления, затрудняют их широкое применение. Учитывая сказанное, в настоящей статье поставлена *цель*: выяснить суть основных методов определения характеристик, используемых для ингибиторов к набуханию глин, а также дать представление о возможных

эффектах при использовании специфических материалов. Отметим, что первый раздел посвящен обзору многочисленных типов глинистых минералов и анализу их механизмов набухания. Во второй части представлены сведения об особенностях этих ингибиторов и возможностях их классификации.

Типы глин и механизмы их набухания

Химическая структура и типы глинистых минералов. Глины – это осадочные породы, которые состоят в основном из химически активных и неактивных глинистых минералов (сметит, иллит, каолинит, хлорит, вермикулит) и других форм минералов, таких как кварц, кальцит, полевой шпат и многие другие. Однако при наличии воды химически активные глинистые минералы, присутствующие в горной породе, дают ряд осложнений, связанных с нестабильностью ствола скважины, которая влияет на процессы бурения и освоения скважин. Глинистые минералы представляют собой слоистые кристаллические пластинки, состоящие из множества единичных слоев тетраэдрических или октаэдрических пластин, соединенных минеральными фрагментами, включающих атомы кремния, кислорода и алюминия. Атомы кремния и алюминия обычно формируют уникальную связь с кислородом в виде тетраэдрических (-Т-) листов кремнезема и октаэдрических (-О-) листов оксида алюминия. Структурно тетраэдрический лист содержит четыре атома кислорода, окружающих катионы металлов, что создает гексагональный и непрерывный двумерный слой, как показано на рис. 1. Обычно встречающиеся металлы на четырехгранном листе включают Fe^{3+} , Al^{3+} или Si^{4+} . Представлен октаэдрический лист, состоящий из металлического катиона в середине, ограниченного шестью атомами кислорода, связанного с октаэдром через общие края. На октаэдре обычно встречаются катионы, включающие в себя Fe^{2+} , Fe^{3+} , Mg^{2+} или Al^{3+} .

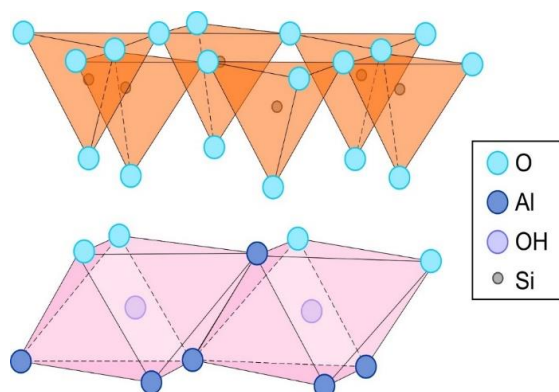


Рис. 1. Условные схемы тетраэдрического и октаэдрического листов согласно [7, 8]

Fig. 1. Conventional diagrams of tetrahedral and octahedral sheets according to [7, 8]

Как видно из рис. 1, существует связь между атомом кислорода и этими пластинками, и она приводит к захватыванию отрицательных зарядов у глины, что ведёт к созданию слабой связи и плоскости расщепления между пластинками. В результате этого связанная вода выравнивается между пластинами, вызывая гидратацию и диспергирование минералов [13, 14]. Главное различие между отрицательно заряженными свойствами глинистых минералов обусловлено изоморфным замещением катионов металлов другими многовалентными ионами. Это приводит к замене тетраэдрических ионов Si^{4+} на Fe^{3+} или Al^{3+} и октаэдрических ионов Al^{3+} на Fe^{2+} или Mg^{2+} соответственно, что увеличивает суммарный отрицательный заряд системы. Недостаток положительного заряда компенсируется катионами, уравнивающими заряд, а количество катионов, доступных для обмена при заданном pH, выраженное в мэкв/100 г (смоль/кг), определяется как ёмкость катионного обмена (ЁКО) глинистых минералов [15–18].

Специфическое расположение четырехгранных и октаэдрических листовых решеток – основная структура различных глин [19]. В зависимости от природы, глинистый минерал 1:1 состоит из одного тетраэдрического и одного октаэдрического слоев (глина Т-О), а глинистый минерал 2:1 состоит из одного октаэдрического слоя, находящегося между двумя тетраэдрическими (глина Т-О-Т) [20, 21]. В природе существует большое количество глинистых минералов с различным химическим составом, расположением слоев, типом межслойных катионов и свойствами набухания. Однако на их физико-химические свойства влияют pH раствора, тип происхождения, размеры частиц, гидратация, дисперсность, флюид, вторичные геохимические процессы. Как следует из [22, 23], в случае бурения глинистых пород наиболее часто встречающимися глинами являются смектит, иллит, хлорит, вермикулит и каолинит. Они составляют группы глинистых минералов, каждый из которых имеет свои уникальные структурные особенности [24, 25]. Представляется целесообразным дать краткое описание этих типов.

Глинистый смектит. Сметиты в основном состоят либо из диоктаэдрической структуры 2:1 (пирофиллит), либо из триоктаэдрической структуры 2:1 (талк), с изоморфным замещением в октаэдрическом или тетраэдрическом слое, отличающим их от нейтральных структур. Сапонит (триоктаэдрический) и монтмориллонит – два типа глинистых минералов, встречающихся в группе смектитов (диоктаэдрических). Еще один ключевой представитель семейства смектитов – бентонит. Отметим, что бентонитовая глина обладает особым влагоудерживающим свойством. Кроме того, бентонит делится

на несколько других типов, включая натриевый, кальциевый и калиевый бентонит.

Глинистый минерал иллит. Филлосиликат, или слоистый алюмосиликат, примером которого является вторичный минерал иллит. Глинистые слюды, наиболее известные как мелкозернистые слюды, также содержат мусковит и биотит. Иллит – модифицированная форма мусковита и полевого шпата, которая образуется в результате выветривания в гидротермальных условиях, чаще всего являющаяся компонентом серицита. Данный минерал можно найти в четвертичных отложениях, глинистых осадочных породах и метаморфических породах. Тетраэдрический слой в иллите имеет больший отрицательный заряд, чем в вермикулите. Это связано с наличием (порядка 20 %) атомов алюминия в тетраэдрическом слое (вместо атомов кремния) в местах со значительным замещением ионов. Иллит обладает более слабой способностью к набуханию, чем вермикулит, но более сильной, чем каолинит.

Глинистый минерал хлорит. Хлорит в основном относится к силикатной группе 2:1:1, которая состоит из силикатов железа и магния с вкраплениями атомов алюминия. В слое брусита $Mg(OH)_2$ ионы магния занимают все октаэдрические участки в хлорите. Хлориты имеют меньший отрицательный заряд, чем смектит или вермикулит, но на том же уровне, что и мелкозернистая слюда. Нерасширяющаяся природа кристалла обусловлена отсутствием адсорбции воды между слоями.

Глинистый минерал вермикулит. Заметим, что впервые вермикулит был обнаружен в Миллбери, штат Массачусетс, в 1824 г. Его химическая формула представляется в виде $(Mg, Fe^{2+}, Fe^{3+})_3(SiAl)_4O_{10}(OH)_2 \cdot 4H_2O$. Вермикулит также представляет собой тип глинистых минералов 2:1. Это означает, что он имеет один восьмигранный лист, находящийся между двумя тетраэдрическими. Большинство вермикулитов имеют диоктаэдрическую структуру, и в них преобладает Al. Вермикулит – водный филлосиликатный минерал, который значительно расширяется при нагревании, что приводит к отслаиванию, чего можно добиться с помощью промышленных печей.

Глинистый минерал каолинит. Всесторонний библиографический анализ показывает, что каолинит – наиболее распространенный тип глины. Его легко можно найти по всему миру, добывая из горных пород, богатых каолинитом, позже идентифицированным как каолиновая глина. В основном он имеет белый цвет в результате химического выветривания силиката алюминия (например, полевого шпата), создавая мягкий минерал. Каолинит обладает триклинной симметрией и электростатически нейтрален. Водородная связь возникает между парными слоями гидроксильных ионов и атомами кис-

лорода. Поскольку водородные связи достаточно слабые, широко распространено случайное перемещение между слоями, что приводит к худшей кристаллической решетке в минералах каолинита, чем в триклинном каолините. В своей идеальной структуре каолинит не имеет заряда. В таблице приведены важные для моделирования деформационных, термодинамических и диффузионных процессов переноса массы, импульса и теплоты в гетерогенных смесях характеристики глинистых минералов, ценные для уяснения особенностей изменений грунта в вопросах бурения скважин. Указанные сведения будут полезны при оптимизации процесса бурения и позволят полнее сформулировать содержание универсальной пространственной геомеханической бурильной модели. Заметим, что детали этого вопроса подробно представлены, например, в [26].

Таблица. Анализируемые глинистые минералы и их свойства [27, 28]

Table. Analyzed clay minerals and their properties [27, 28]

Глинистый минерал Clay mineral	Расположение слоёв Layer arrangement	ЁКО (мэкв/100 г) УКО (meq/100 g)	Плотность (г/см ³) Density (g/cm ³)
Смектит Smectite	2:1	60,00–100,00	2,00–2,61
Иллит/Illit	2:1	20,00–40,00	2,69–2,90
Хлорит Chlorite	2:1	10,00–30,00	2,60–2,80
Вермикулит Vermiculite	2:1	100,00–250,00	2,50–2,52
Каолинит Kaolinite	1:1	3,00–15,00	2,50–2,70

Механизм набухания глины. Известно, что набухание происходит тогда, когда глинистый минерал окружен молекулой воды, что увеличивает структуру расщепления и приводит к объемному расширению глины. В идеале, когда молекулы воды сталкиваются с набухающим глинистым минералом, создается сила гидратации, которая также приводит к возникновению электрических сил между межслойным расстоянием (базальным расстоянием) глинистых минералов. Создаваемая гидратированная сила возникает из-за полярности молекул воды на гидратированной твердой поверхности, тогда как электрические силы возникают из-за отрицательного заряда, присутствующего на основной поверхности глины. Эти силы (отталкивающие) создают разрушение сформированного (уложенного) слоя. Кроме того, взаимодействие между жидкостью для гидроразрыва пласта и глинистым пластом может привести к увеличению или уменьшению гидратационного напряжения. Рост напряжения гидратации приведет к увеличению растягива-

ющих сил, что вызовет большее набухание, в то время как уменьшение напряжения гидратации приведет к ослаблению растягивающих сил и сжатия глинистого минерала, и, следовательно, ингибирование станет более эффективным для оптимизации процесса бурения [26]. Анализ показывает, что лучшими ингибиторами при набухании глин являются средномолекулярные и высокомолекулярные эфиры [29, 30]. Кристаллическое набухание происходит из-за гидратации обменных катионов сухой глины, тогда как осмотическое набухание вызвано большой разницей между концентрацией ионов поверхности глины и в поровой воде. Подобно набуханию кристаллической глины, набухание сульфата вызвано его гидратацией [31–34]. Полезно отметить, что подробную информацию о набухании сульфатной глины можно также найти в [35, 36].

Кристаллическое набухание. Кристаллическое набухание происходит из-за гидратации обменных катионов сухой глины. На ранней стадии глинистые минералы имеют избыточный отрицательный заряд на своей поверхности. Когда глинистые минералы начинают взаимодействовать с водой, молекулы воды настраивают отрицательные диполи в сторону обменного катиона, тем самым делая глину более склонной к гидратации. Результат такого рода взаимодействия приводит к постепенному *расширению глины* из-за наличия слабой *электростатической силы*. Этот тип набухания глины зависит от взаимодействия между водным раствором, содержащим различные концентрации ионов: одновалентные, двухвалентные и многовалентные [37–40]. Анализ показывает, что, как правило, все типы глин подвергаются кристаллическому набуханию в присутствии водного раствора. Это явление набухания происходит в плавной и ступенчатой последовательности при образовании однослойного, двухслойного и многослойного катионов в межслойных пространствах. Типичный диапазон, указанный для набухания кристаллов, дает значение расстояния между слоями от 9 до 20 Å. На рис. 2 начальное расстояние между слоями составляло 0,96 нм. Это связано с тем, что отрицательно заряженные ионы прочно удерживаются катионами. Однако при контакте с молекулой воды пространство расширяется до 1,23 нм, пока не достигнет примерно 1,52 нм. Таким образом, это показывает, что по мере увеличения молекул воды расстояние между слоями также растёт из-за полярности молекул воды [41, 42].

Осмотическое набухание. Осмотическое набухание происходит, когда существует разница в солёности, так что межслойная концентрация катиона выше, чем концентрация в окружающем растворе. Как показано на рис. 3, рост межслойной концентрации катионов в глинистых минералах вызовет

перемещение воды из окружающего раствора в межслойные пространства, тем самым увеличивая межслойное расстояние. Эти дополнительные пространства генерируются вследствие того, что слабые *силы Ван-дер-Ваальса* создают большее расстояние расщепления из-за эффекта двойного электрического слоя, который имеет сильное отталкивание. Этот механизм набухания не требует полупроницаемой мембраны и является классом глинистых минералов, которые содержат катионы с высокой обменной способностью. Типичным примером этого класса глин является натрий-монтмориллонит (сметит), который может привести к значительному увеличению объема от 20 до 130 Å по сравнению с тем, который получается при кристаллическом набухании. При бурении осмотическое набухание может мгновенно привести к *ухудшению стабильности стенки скважины* и к обрушению ствола скважины, если не принять меры [26].

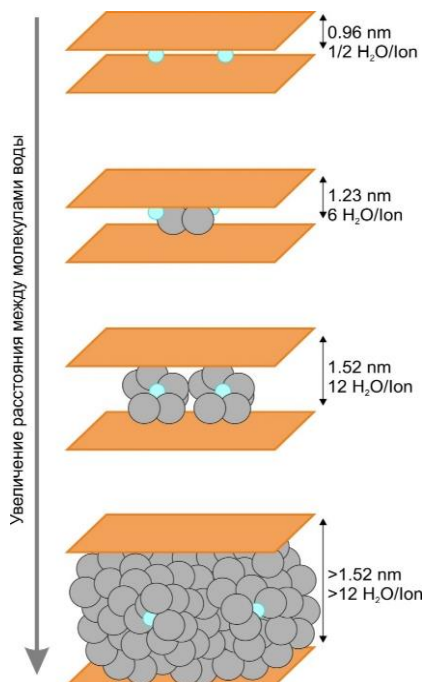


Рис. 2. Механизм кристаллического набухания [43, 44]

Fig. 2. Crystal swelling mechanism [43, 44]

Ингибиторы набухания глин в буровых растворах

В данной части представлено описание типов ингибиторов, используемых для буровых растворов на водной основе, а также их основные недостатки. Важно отметить, что сравнительный анализ некоторых результатов, полученных с этими ингибиторами, здесь не проводится, поскольку они уже были приведены в предыдущих обзорах, отчетах об экспериментах (например, [45–50]).

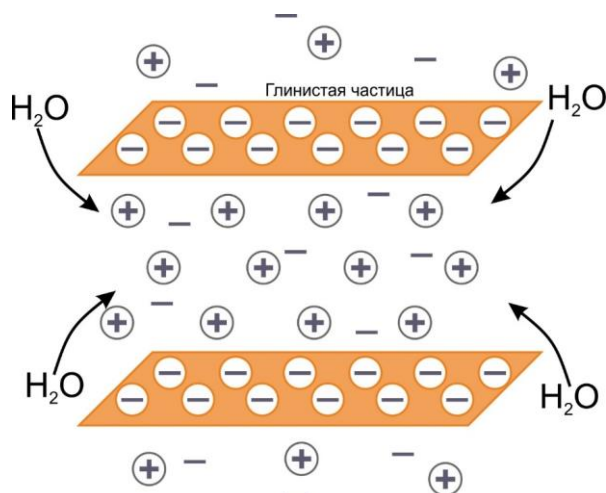


Рис. 3. Механизм осмотического набухания [43, 44]
 Fig. 3. Osmotic swelling mechanism [43, 44]

Главная цель указанной части сводится к тому, чтобы представить общую классификацию всех известных типов ингибиторов по имеющимся публикациям и выявить их недостатки. Ранее отмечалось [49, 50], что ингибиторы набухания глин представляют собой материалы или химические вещества, добавляемые в буровые растворы на водной основе для предотвращения гидратации, набухания и разложения глинистых минералов. Жидкости на водной основе более применимы к ингибиторам набухания глин по сравнению с жидкостями на углеводородной основе из-за их меньшего воздействия на окружающую среду, экономической эффективности, анализа коллектора, скорости проникновения и полной безопасности опера-

ций [51, 52]. Во время буровых работ было протестировано несколько групп ингибиторов, которые показали отличные эксплуатационные характеристики. На рис. 4 представлена общая классификация доступных ингибиторов набухания глин в открытой литературе (например, [53, 54]).

Обычные ингибиторы набухания глин

Неорганический класс. Неорганические соли считаются наиболее распространенными и традиционно используемыми ингибиторами для предотвращения гидратации и набухания глин. Они выбираются на основе нескольких критериев, таких как их способность изменять поверхностный минерал из смачивающего в несмачивающее состояние, высокое сродство к поверхности глины, что обеспечивает его адсорбционную способность на глинистых минералах, и наличие достаточного количества катионных зарядов для нейтрализации поверхностных зарядов глинистых минералов. Некоторые из этих неорганических солей, используемых в качестве ингибиторов набухания глин, включают хлорид калия (KCl), хлорид аммония (NH₄Cl), хлорид кальция (CaCl₂), хлорид натрия (NaCl), гидроксид калия (KOH), хлорид тетраметиламмония [(CH₃)₄NCl] и гидроксид кальция [Ca (OH)₂]. Все эти соли успешно борются с набуханием глинистых минералов, обеспечивая прочную ионную связь, которая предотвращает ионное взаимодействие, тем самым уменьшая набухание. Эта стабильность достигается за счет того, что ионная сила обратно пропорциональна величине набухания глин.

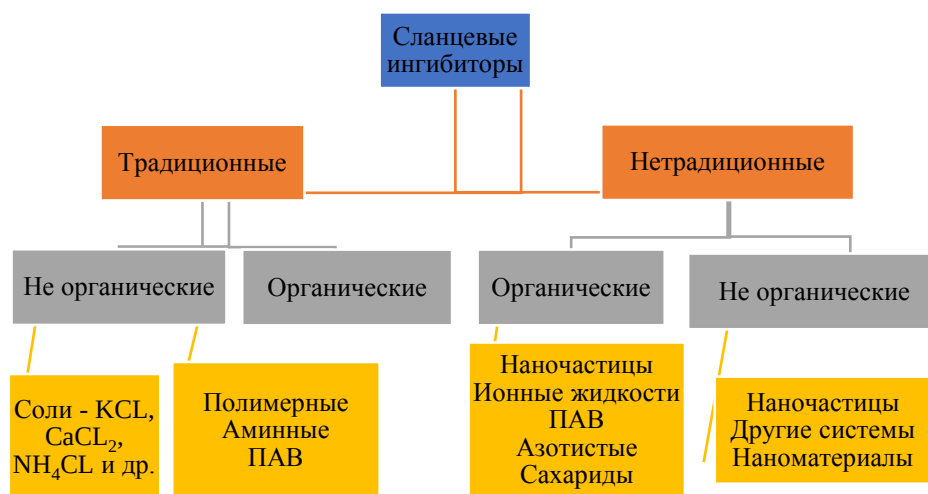


Рис. 4. Классификация ингибиторов набухания глин [53, 54]
 Fig. 4. Classification of clay swelling inhibitors [53, 54]

В большинстве известных публикаций отмечается, что соли на основе хлора, в особенности KCl и NH_4Cl , являются лучшим вариантом ингибирования из-за хорошей растворимости в водном растворе, выгодных катионных радиусов и превосходной ингибирующей способности по сравнению с другими ингибиторами [55]. Кроме того, они имеют более низкий потенциал гидратации. И это важно для предотвращения набухания глин при бурении. Общее применение этих добавок с БРО (Буровой Раствор на углеводородной Основе) доказало свою полезность при бурении/гидроразрыве пласта для борьбы с гидратацией глин, в частности, в концентрациях порядка 2–20 мас. % [56, 57]. Тем не менее некоторый опыт их применения привёл к флокуляции глин, что влияло на эксплуатационные свойства жидкости, вызывая повышение фильтрации и вязкости раствора [58–60]. Установлено [61, 62], что высокая концентрация KCl во время бурения/гидроразрыва пласта отрицательно влияет на суспензионную и твердую несущую способность проппантов из-за агломерации и флокуляции. Эти соли также негативно воздействуют на окружающую среду, обладают высокой стоимостью утилизации и вызывают коррозию скважинного оборудования, как и любой водный раствор с высокой минерализацией [63, 64]. Кроме того, они не являются совместимыми с иными системами буровых растворов и плохо работают в морской среде [65, 66].

Все эти проблемы, связанные с добавлением неорганических солей в БРО, заставили специалистов исследовать другие типы стабилизаторов глин, например, органические полимерные ингибиторы [67–69] и ингибиторы на основе органических аминов [70–72].

Органический класс. Данные полимеры нашли широкое применение в нефтяной и газовой промышленности, например, для повышения нефтеотдачи пластов [73] и сооружения скважин [74, 75]. Их уникальные вязкоупругие свойства, например предел текучести и ослабление напряжения в микросреде породы, делают их хорошими реагентами для поддержания несущей способности проппантов в операциях гидроразрыва пласта [76]. Именно полимеры и их нанокомпозиты используются в качестве добавок к БРО для контроля вязкости, суспензии жидкостей и ингибирования глин [77, 78]. Их можно сгруппировать в ионные и неионные полимерные ингибиторы. Механизм их ингибирования включает адсорбцию полимеров на поверхностях глин, образование водородных связей, электростатических сил и сил Ван-дер-Ваальса между ингибиторами и поверхностью глины. Их выбор основан на плотности ионного заряда полимерных цепей, поскольку положительно заряженные полимеры являются более предпочтительными по сравнению с отрицательно заряженными.

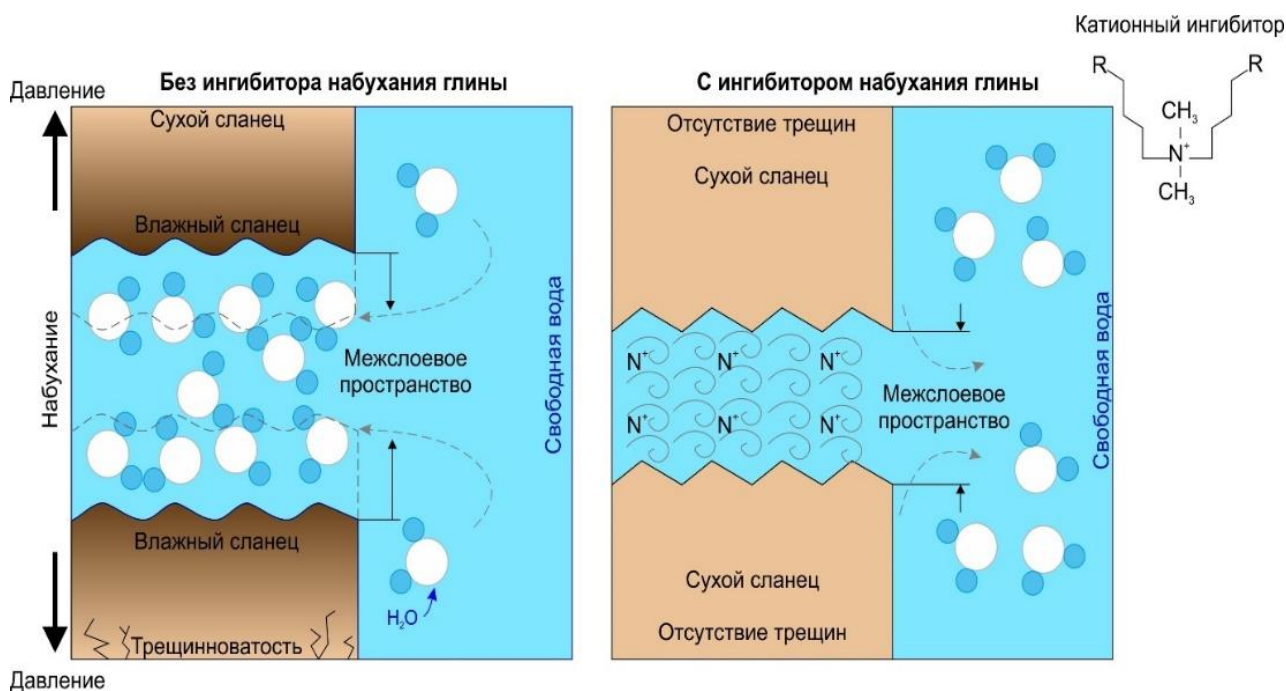


Рис. 5. Схемы ингибирования набухания глины для органического полимера без катионных ингибиторов и с катионными ингибиторами [79, 80]

Fig. 5. Clay swelling inhibition schemes for an organic polymer without cationic inhibitors and with cationic inhibitors [79, 80]

Некоторые комплексные полимерные ингибиторы (ионные и неионные), применяемые в качестве добавок к БРО, получают в результате сополимеризации традиционного оксида полипропилена (ОПП), полиэтиленгликоля (ПЭГ), полиакриламида (ПАА), частично гидролизованного полиакриламида с их производными методом свободно радикальной полимеризации. Схематическое изображение катионного (ионного) органического полимера представлено на рис. 5. Данные рисунка иллюстрируют эффективность коммерческих ингибиторов. Видно, что смесь неорганических и органических ингибиторов может работать даже лучше при использовании только органических ингибиторов вследствие значительного уменьшения набухания глин [79, 80]. Следовательно, ингибиторы образования сланцев на основе аминов (органических и неорганических), такие как алкиламины [81, 82], алкил вторичные амины, алкил третичные амины, четвертичные соли алкиламмония [83, 84], дендритные амины [85, 86], полигидроксилорированные соли алкиламмония, полиэфир гексаметилендиамина и полиэтоксилорированные диамины [83–90], также получили широкий спектр применения в качестве средств против набухания глин при бурении. Они оцениваются на основе межслойных расстояний между частицами глины после адсорбции амина. Обычно содержащая ингибитор аминогруппа протонируется в водном растворе и превращается в катионную группу. После этого трансформированная катионная группа присоединяется к отрицательно заряженной поверхности глинистых минералов посредством электростатической силы притяжения и водородной связи [91, 92]. Следовательно, их механизм ингибирования заключается в адсорбции на поверхности, интеркаляции в

промежуточный слой глинистых минералов, взаимодействии между положительными группами из аминных полимеров и противоположными зарядами на глинистых минералах [93–95]. Несмотря на то, что они хорошо применимы как в кислой, так и в щелочной среде, все же они очень нестабильны при повышенных температурах (порядка $\sim 150^\circ$). Механизм ингибирования набухания глины полиэфирами показан на рис. 6. Можно заметить, что введение ингибитора амина значительно снизило скорость набухания глинистого минерала за счет адсорбции, интеркалирования и образования прочной электростатической монослойной связи [96].

Таким образом, из представленных результатов рассматриваемой части следует, что традиционные ингибиторы были и остаются основным реагентом, используемыми повсеместно на протяжении многих лет, но из-за увеличения количества трудноизвлекаемых запасов и постоянного развития в направлении оптимизации добычи ресурсов в отдаленных и чувствительных морских районах, а также новых проблем, с которыми сталкиваются нефтяная и газовая промышленность в секторе бурения, появился значительный интерес специалистов к проблемам разработки новых и эффективных стабилизаторов/ингибиторов глин. Все это способствовало росту внимания к вопросам использования нетрадиционных материалов для предотвращения некоторых неблагоприятных последствий в технологическом процессе бурения из-за возможности потери бурового оборудования, ликвидации скважины. Поэтому весьма важно разрабатывать альтернативные средства борьбы с проблемой, обычно связанной с применением РВО в нефтяной промышленности с низким воздействием на окружающую среду.

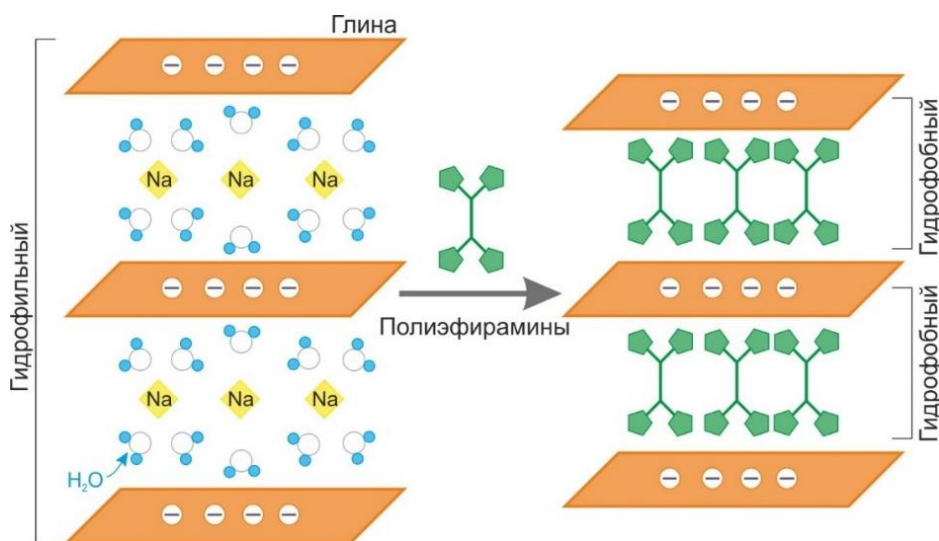


Рис. 6. Механизм набухания и ингибирования глины под действием полиэфирного амина [97, 98]

Fig. 6. Mechanism of clay swelling and inhibition under the effect of polyester amine [97, 98]

Олигомерные и полимерные амины. Библиографический анализ показывает, что во избежание необходимости решения экологических проблем, задач по улучшению свойств мономерных соединений, ингибирующих набухание глин, активно проводятся исследования по применению в полевых условиях различных олигомерных аминных ингибиторов глин. Известно, что эти олигомерные амины с двумя–четырьмя азотными функциональными группами действуют аналогично мономерным аминам из-за катионного характера и размера. Суть в том, что они проникают в глинистые пластинки и препятствуют проникновению молекул воды в глину и ее гидратации. Однако олигомерные амины, в отличие от мономерных аминов, имеют одно главное *преимущество*. В частности, они обеспечивают лучшую стабилизацию глины благодаря нескольким активным центрам, адсорбированным на глине одновременно, и, следовательно, менее восприимчивы к обратным эффектам при адсорбции вещества. Олигомерные амины обеспечивают большую «гибкость» при разработке и оптимизации молекулы для желаемого применения. Например, полиэфирамины (рис. 7) были разработаны и оптимизированы для их применения в качестве ингибиторов глин в начале 2000-х гг.

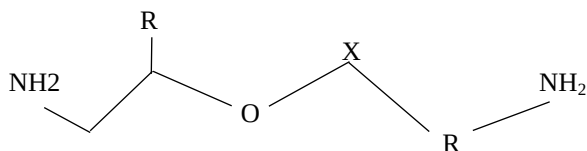


Рис. 7. Олигомерный аминовый сланцевый ингибитор [97, 98]

Fig. 7. Oligomeric amine shale inhibitor [97, 98]

Уникально оптимизированная молекулярная структура этих диаминов идеально помещается между пластинками глины (рис. 8) и значительно снижает склонность глины впитывать воду из жидкой фазы. Известно [95–98], что в последние годы различные олигомерные катионные амины интенсивно внедрялись в производство буровых растворов в качестве ингибиторов образования глин.

Ингибиторы мономерных аминов. Анализ рассматриваемых проблем указывает, что в ингибиторах глин на основе мономерных аминов ионы натрия в глине замещаются в процессе катионного обмена. Монокатионные амины с низкой молекулярной массой (рис. 9) проникают в пластинки глины и уменьшают количество воды, адсорбируемой глиной, тем самым уменьшая набухание глины из-за гидратации. Другим преимуществом монокатионных аминов является меньший уровень обра-

ботки, необходимый для достижения высокого уровня ингибирования, по сравнению с неорганическими солями. Однако большинство этих монокатионных аминокислотных ингибиторов имеют более низкий уровень ингибирования глин и более сильный аммиачный запах по сравнению с олигомерными или полимерными аминокислотными ингибиторами. И, следовательно, их применение в качестве ингибиторов глин весьма ограничено. Известно также [95–98], что различные мономерные ингибиторы (такие как хлорид аммония, хлорид тетраметиламмония, хлорид холина и другие производные аммония) были разработаны и применялись в этой области с переменным успехом.

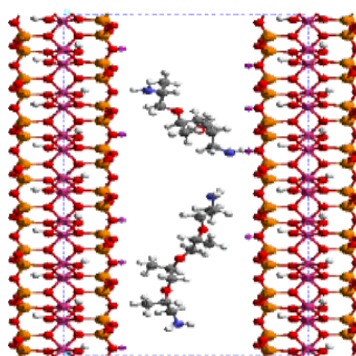


Рис. 8. Молекулярное моделирование ингибирования глин [97, 98]

Fig. 8. Molecular modeling of shale inhibition [97, 98]

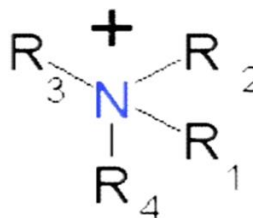


Рис. 9. Мономерный аминовый ингибитор образования глин [97, 98]

Fig. 9. Monomeric amine inhibitor of clay formation [97, 98]

Наноматериалы как ингибиторы набухания глин

Краткие сведения. Следует отметить, что, в отличие от обычных частиц, наночастицы нашли значительное применение в практических приложениях благодаря своим лучшим характеристикам [99–103]. В частности, эти частицы обладают лучшими поверхностными и квантовыми эффектами, основанными на доле молекул на поверхности и прерывистом поведении вещества с делокализованными электронами. Эти эффекты помогают улучшить его химическую реакционную способность в дополнение к оптическим, электрическим и магнитным свойствам [103].

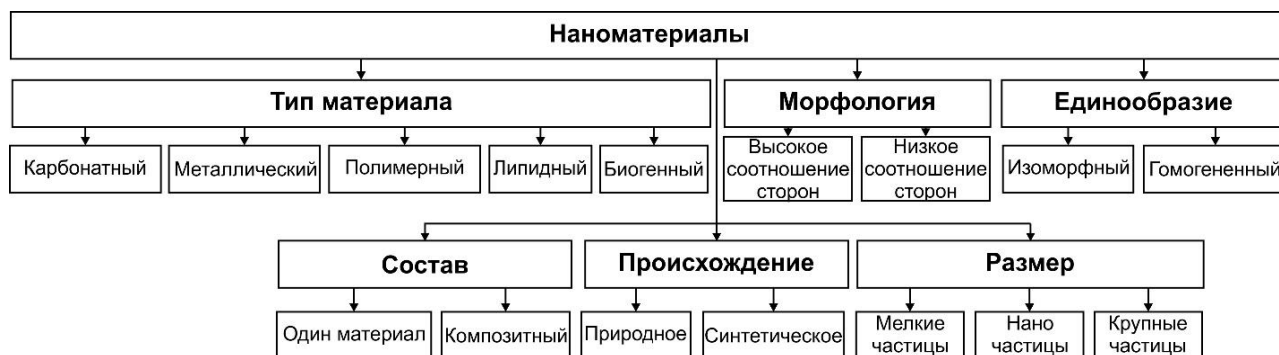


Fig. 10. Общая классификация наноматериалов с точки зрения типов материалов, состава, происхождения, размера, строения и агломерации [125, 126]

Fig. 10. General classification of nanomaterials in terms of material types, composition, origin, size, structure and agglomeration [125, 126]

Благодаря таким характеристикам, данные частицы нашли применение в биологии [104], нефтяной и газовой отрасли [105–108], фармакологии [109–111], охране окружающей среды и космической технике [112, 113]. Наноматериалы (или наночастицы) широко используются в нефтегазовой промышленности для повышения нефтеотдачи пластов [114–118], ингибирования процесса набухания глины [119, 120], повышения вязкости полимеров [121], улучшения качества бурового раствора [122] и улучшения свойств материалов на основе цемента [123, 124]. Для того чтобы любые реагенты были способны ингибировать набухание глин, они должны обладать критическими свойствами, которые имеют решающее значение для предотвращения набухания глины при контакте с водой. Анализ данных [99–124] показывает, что благодаря своему уникальному составу и относительно небольшим размерам наноматериалы нашли применение в исследованиях по ингибированию глинистых горных пород. Помимо их применения для ингибирования глин, эти материалы могут быть использованы для усиления теплофизических и морфологических свойств буровых растворов. Поэтому представляется целесообразным ниже привести сведения по классификации наноматериалов, механизмам их ингибирования в процессе набухания глин.

Классификация наноматериалов. Анализ публикаций по рассматриваемым в данной статье проблемам позволяет отметить, что существует широкий набор критериев для классификаций веществ в зависимости от размера наноматериала, строения и химического состава (например, рис. 10). Из рис. 10 видно, что в строении наноматериалов имеются различные структурные единицы (элементы вещества: кремний, углерод и водород). С точки зрения классификации по признакам – *состав по материалу, соотношению размеров* – их можно идентифицировать как одинарные и композитные, а также с мелко-, крупноразмерной агломерацией частиц.

Такие сведения позволяют наполнить физическое и математическое описание геобурильной модели процесса бурения и корректно сформулировать ее краевые условия для построения численного решения дифференциальной задачи ([26, 127–130], проблемы постановки 3D-MEM модели бурения).

Заключение и основные выводы

Рассмотрены важные сведения о физико-химических и термодинамических особенностях, сопровождающих процесс набухания глин, который осложняет и обостряет операции по безаварийному бурению скважин. Установлено, что набухание глин происходит при взаимодействии с водой, приводит к увеличению объема породы и может вызывать *сужение* ствола скважины, *прихват* бурового инструмента, *обвалы* стенок скважины и т. п. Кроме того, детально и всесторонне проанализирован широкий класс ингибиторов набухания глин, которые составляют группы органических и неорганических веществ: соли, полимеры, наноматериалы, наночастицы, ионы, амины и др. Данные анализа указывают, что оптимальными и эффективными для применения в технологическом процессе бурения выступают следующие ингибиторы.

- На основе амина. Они являются эффективными по сравнению с ингибиторами хлорида калия, обладают высокой адсорбционной способностью на поверхности глинистых минералов и эффективно предотвращают их набухание. Тем не менее они имеют ряд ограничений, включая термическую нестабильность, высокую чувствительность к pH. При бурении в морской среде их следует использовать ограниченно.
- На основе полимера. Являются дешевыми, экологически чистыми, менее чувствительными к pH, образуют на поверхности глин прочную защитную пленку, которая препятствует проникновению воды.

- На основе иона. Обладают высокой термостойкостью – до 300 °С, имеют высокую солейстойкость, обладают низкой летучестью, термической стабильностью и высокой ионной проводимостью, что делает их перспективными ингибиторами набухания. Данные ингибиторы эффективны для ингибирования набухания монтмориллонита, каолинита, иллита и смешанно-слоистых глинистых минералов – наиболее популярных типов глин.
Более того, выбор ингибитора для конкретных условий бурения зависит от:
- минералогического состава глин. В частности, различные глинистые минералы обладают разной чувствительностью к набуханию и требуют применения специфических ингибиторов;
- типа бурового раствора. Ингибитор должен быть совместим с другими компонентами бурового раствора и не ухудшать его свойства;
- локальных изменений параметров термодинамического процесса бурения (температуры и давления, скорости, состава и структуры транспортируемого бурового шлама в объекте исследования – скважине, рассматриваемой как открытая термодинамическая система «горная порода – границы стенок скважины – элементы бурового оборудования – буровой раствор»). Эти параметры будут существенно влиять на эффективность ингибиторов в силу выраженной нелинейности в изменениях морфологических и термодинамических свойств системы в процессе бурения;
- материальных факторов, таких как стоимость ингибитора и его расход.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lyu Q. A review of shale swelling by water adsorption // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. – 2015. – Vol. 27. – P. 1421–1431. DOI: 10.1016/j.jngse.2015.10.004.
2. Experimental and numerical simulation of water adsorption and diffusion in shale gas reservoir rocks / W. Shen, X. Li, A. Cihan, X. Lu, X. Liu // *Advances in geo-energy research*. – 2019. – Vol. 3. – № 2. – P. 165–174. DOI: 10.26804/ager.2019.02.06
3. Heidug W.K., Bm S.S., Miri M. Hydration swelling of water-absorbing rocks: a constitutive model // *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. – 1996. – Vol. 20. – P. 403–430. DOI: 10.1002/(SICI)1096-9853(199606)20:6<403::AID-NAG832>3.0.CO;2-7
4. Cyclical water vapor sorption-induced structural alterations of mine roof shale / A. Liu, S. Liu, R. Sang, G. Zhang, K. Xia // *International Journal of Coal Geology*. – 2023. – Vol. 273. – P. 1–11 (104267). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coal.2023.104267>.
5. Gomaa I., Mahmoud M. Stimulating illitic sandstone reservoirs using in-situ generated HF with the aid of thermochemicals // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2020. – Vol. 190. – P. 113–130. DOI: 10.1016/j.petrol.2020.107089.
6. Carpenter C. Thermochemical fluid used in field application of sandstone stimulation // *Journal of Petroleum Technology*. – 2022. – Vol. 74. – № 3. – P. 98–100. DOI: 10.2118/0322-0098-jpt.
7. Murray H.H. Structure and composition of the clay minerals and their physical and chemical properties. Chapter 2 // *Developments in Clay Science*. – 2006. – Vol. 2. – P. 7–31. DOI: 10.1016/S1572-4352(06)02002-2.
8. Kumari N., Mohan C. Basics of clay minerals and their characteristic properties. – Croatia: IntechOpen eBooks, 2021. – 210 p. DOI: 10.5772/intechopen.97672.
9. Ochieng O. Characterization and classification of clay minerals for potential applications in Rugi Ward, Kenya // *African Journal of Environmental Science and Technology*. – 2016. – Vol. 10. – № 11. – P. 415–431. DOI: 10.5897/AJEST2016.2184.
10. Characterization of certain Nigerian clay minerals for water purification and other industrial applications / G.O. Ihekwe, J.N. Shondo, K.I. Orisekeh, G.M. Kalu-Uka, I.C. Nwuzor, A.P. Onwualu // *Heliyon*. – 2020. – Vol. 6. – № 4. – P. 1–7. DOI: 10.1016/j.heliyon.2020.e03783
11. Aksu I., Bazilevskaya E., Karpyn Z.T. Swelling of clay minerals in unconsolidated porous media and its impact on permeability // *GeoResJ*. – 2015. – Vol. 7. – P. 1–13. DOI: 10.1016/j.grj.2015.02.003.
12. Mehdizad A., Pourafshary P., Sedaei B. Visual investigation of simultaneous clay swelling and migration mechanisms and formation damage consequences using micromodels // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2022. – Vol. 214. – P. 1–12. DOI: 10.1016/j.petrol.2022.110561.
13. Hamdi N., Srasra E. Acid-base properties of organosmectite in aqueous suspension // *Applied Clay Science*. – 2014. – Vol. 99. – P. 1–6. DOI: 10.1016/j.clay.2014.07.009.
14. Effect of native reservoir state and oilfield operations on clay mineral surface chemistry / I. Shehri, D.A. Mohammed, M. Mahmoud, M.S. Kamal, O. Alade, M. Arif, S. Patil // *Molecules*. – 2022. – Vol. 27. – № 5. – P. 1739. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules27051739>.
15. Sun L. Molecular dynamics study of montmorillonite crystalline swelling: Roles of interlayer cation species and water content // *Chemical Physics*. – 2015. – Vol. 455. – P. 23–31. DOI: 10.1016/j.chemphys.2015.04.005.
16. Effects of the layer charge location and interlayer cation on rectorite swelling properties: comparison between molecular dynamics simulations and experiments / W. Zhang, S. Chen, K. Tong, S. Li, K. Huang, Z. Dai, L. Luo // *The Journal of Physical Chemistry*. – 2022. – Ser. C. – Vol. 126. – № 22. – P. 9597–9609. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.2c02549>
17. Valkov M., Simha G. Vermiculite: structural properties and examples of the use // *Clay Minerals in Nature. Modification and Application* / Eds. M. Valášková, G.S. Martynková. – Czech Republic: University of Ostrava, 2012. – P. 210–243.
18. Study of structural properties and flame of vollaстанite, dolomite, vermiculite minerals / K.R. Berdiev, A.B. Sirojiddinov, Q.X. Yakubov, X.M. Dusmatov // *The American Journal of Applied Sciences*. – 2021. – Vol. 3. – № 1. – P. 30–37. DOI: 10.37547/tajas/volume03issue01-07.

19. Brigatti M.F., Galán E., Theng B.K.G. Structure and mineralogy of clay minerals // *Developments in Clay Science*. – 2013. – Vol. 5. – P. 21–81. DOI: 10.1016/B978-0-08-098258-8.00002-X.
20. Choo K.Y., Bai K. Effects of bentonite concentration and solution pH on the rheological properties and long-term stabilities of bentonite suspensions // *Applied Clay Science*. – 2015. – Vol. 108. – P. 182–190. DOI: 10.1016/j.clay.2015.02.023.
21. Effect of the alkaline solution concentration on swelling performance of MX80 granular bentonite/ J. Shao, D. Sun, F. Peng, Z. Zeng // *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. – 2023. – Vol. 27. – № 14. – P. 4181–4196. DOI: 10.1080/19648189.2023.2177753.
22. Quainoo A.K. A perspective on the potential application of bio-inhibitors for shale stabilization during drilling and hydraulic fracturing processes // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. – 2020. – Vol. 79. – P. 103–108. DOI: 10.1016/j.jngse.2020.103380.
23. An overview on the potential application of ionic liquids in shale stabilization processes / M.T. Rahman, B.M. Negash, M. Moniruzzaman, A.K. Quainoo, C.B. Bavoh, E. Padmanabhan // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. – 2020. – Vol. 81. – P. 1–12. DOI: 10.1016/j.jngse.2020.103480
24. Eveline V.F., Yucel A.I. Osmosis and clay swelling effects in gas shale formations under stress // *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. – San Antonio: Gonzalez Convention, 2018. – Vol. 2. – P. 19–99.
25. Eveline V.F., Santos L.P., Akkutlu I.Y. Thermally-induced secondary fracture development in shale formations during hydraulic fracture water invasion and clay swelling // *SPE Journal*. – June 3, 2019. – № 6. – P. 1–10. DOI: 10.2118/195543-ms.
26. Ал-обаиди С.С., Харламов С.Н. Анализ прихвата трубы при бурении скважин в южно-иракских коллекторах известняка и песчаника // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2024. – Т. 335. – № 8. – С. 91–111. DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4716
27. Ahmed H.M., Kamal M.S., Al-Harhi M. Polymeric and low molecular weight shale inhibitors: a review // *Fuel*. – 2019. – Vol. 251. – P. 187–217. DOI: 10.1016/j.fuel.2019.04.038.
28. Shale inhibition by low-molecular-weight cationic polymer in water-based mud / M. Beg, P. Singh, S. Sharma, U. Ojha // *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. – 2018. – Vol. 9. – № 3. – P. 1995–2007. DOI: 10.1007/s13202-018-0592-7.
29. Anderson R.L. Clay swelling – a challenge in the oilfield // *Earth-Science Reviews*. – 2010. – Vol. 98. – Iss. 3–4. – P. 201–216. DOI: 10.1016/j.earscirev.2009.11.003.
30. Cai W., Zhu H., Liang W. Three-dimensional stress rotation and control mechanism of deep tunneling incorporating generalized Zhang–Zhu strength-based forward analysis // *Engineering Geology*. – 2022. – Vol. 308. – P. 21–34. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106806>.
31. Butscher C., Thomas M., Blum P. Swelling of clay-sulfate rocks: a review of processes and controls // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. – 2016. – Vol. 49. – P. 1533–1549. DOI: 10.1007/s00603-015-0827-6.
32. Reactive transport modeling of swelling processes in clay-sulfate rocks / D. Schweizer, H. Prommer, P. Blum, A.J. Siade, C. Butscher // *Water Resources Research*. – 2018. – Vol. 54. – № 9. – P. 6543–6565. DOI: 10.1029/2018wr023579.
33. Müller V.M., Løken T. The shearing behaviour of clays // *Applied Clay Science*. – 1989. – Vol. 4. – № 2. – P. 125–141. DOI: 10.1051/e3sconf/20199214003.
34. Swai R.E. A review of molecular dynamics simulations in the designing of effective shale inhibitors: application for drilling with water-based drilling fluids // *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. – 2020. – Vol. 10. – № 8. – P. 3515–3532. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13202-020-01003-2>.
35. Steiner W. Swelling rock in tunnels: rock characterization, effect of horizontal stresses and construction procedures // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*. – 1993. – Vol. 30. – № 4. – P. 361–380. DOI: 10.1016/0148-9062(93)91720-4.
36. A fractional viscoplastic model to predict the time-dependent displacement of deeply buried tunnels in swelling rock / G.-Y. Liu, Y.-L. Chen, X. Du, R. Azzam // *Computers and Geotechnics*. – 2020. – Vol. 129. – P. 23–31. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2020.103901>
37. Wilson M.J., Wilson L.S. Clay mineralogy and shale instability: an alternative conceptual analysis // *Clay Minerals*. – 2014. – Vol. 11. – P. 127–145. DOI: 10.1180/claymin.2014.049.2.01.
38. Andi A.A. Mineralogy and rock response analysis approach to mitigate wellbore stability issue in “B” cluster of East Java Field // *Journal of Petroleum and Geothermal Technology*. – 2023. – Vol. 4. – № 1. – P. 1–21. DOI: 10.31315/jpgt.v4i1.7336.
39. Wang L.L. Swelling of shales: a multiscale experimental investigation // *Energy and Fuels*. – 2017. – Vol. 31. – Iss. 10. – P. 10442–10451. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.7b01223.
40. A review of swelling effect on shale permeability: assessments and perspectives / Q. Gao, J. Liu, Y.K. Leong, D. Elsworth // *Energy & Fuels*. – 2023. – Vol. 37. – № 5. – P. 3488–3500. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.2c04005.
41. Rahman M T. An overview on the potential application of ionic liquids in shale stabilization processes // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. – 2020. – Vol. 81. – № 9. – P. 103. DOI: 10.1016/j.jngse.2020.103480.
42. Trends offered by ionic liquid-based surfactants: applications in stabilization, separation processes, and within the petroleum industry / J. Saien, M. Kharazi, V. Pino, I. Pacheco-Fernández // *Separation and Purification Reviews*. – 2022. – Vol. 52. – № 3. – P. 164–192. DOI: 10.1080/15422119.2022.2052094.
43. Ruedrich J. Moisture expansion as a deterioration factor for sandstone used in buildings // *Environmental Earth Sciences*. – 2011. – P. 1545–1564. DOI: 10.1007/s12665-010-0767-0.
44. Moisture expansion associated to secondary porosity: an example of the Loseros Tuff of Guanajuato, Mexico / R. López-Doncel, W. Wedekind, R. Dohrmann, S. Siegesmund // *Environmental Earth Sciences*. – 2012. – Vol. 69. – № 4. – P. 1189–1201. DOI: 10.1007/s12665-012-1781-1.
45. Rana A., Arfaj M.K., Saleh T.A. Advanced developments in shale inhibitors for oil production with low environmental footprints: a review // *Fuel*. – 2019. – Vol. 247. – P. 237–249. DOI: 10.1016/j.fuel.2019.03.006.
46. Jingyuan M., Boru X., Yuxiu A. Advanced developments in low-toxic and environmentally friendly shale inhibitor: a review // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2022. – Vol. 208. – P. 109578. DOI: 10.1016/j.petrol.2021.109578.

47. Almubarak T. A collective clay stabilizers review // International Petroleum Technology Conference. – Doha, Qatar, December 2015. – Paper Number: IPTC-18394-MS. – P. 104–110. DOI: 10.2523/IPTC-18394-MS.
48. Wang L. Clay stabilization in sandstone reservoirs and the perspectives for shale reservoirs // Advances in Colloid and Interface Science. – 2020. – Vol. 276. – P. 1–11. DOI: 10.1016/j.cis.2019.102087.
49. Gholami R. A review on borehole instability in active shale formations: Interactions, mechanisms and inhibitors // Earth-Science Reviews. – 2018. – Vol. 177. – P. 2–13. DOI: 10.1016/j.earscirev.2017.11.002.
50. Time-dependent borehole stability in hard-brittle shale / Yan C.-L., Dong L.-F., Zhao K., Cheng Y.-F., Li X.-R., Deng J.-G., Li Z.-Q., Chen Y. // Petroleum Science. – 2022. – Vol. 19. – № 2. – P. 663–677. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petsci.2021.12.019>.
51. Liu X.D., Lu X.C. A thermodynamic understanding of clay-swelling inhibition by potassium ions // Angewandte Chemie. International edition. – 2006. – Vol. 45. – Iss. 38. – № 9. – P. 6300–6303. DOI: 10.1002/anie.200601740.
52. Effects of imidazolium- and ammonium-based ionic liquids on clay swelling: experimental and simulation approach / M.T. Rahman, B.M. Negash, D.K. Danso, A. Idris, A.A. Elryes, I.A. Umar // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. – 2021. – Vol. 12. – № 7. – P. 1841–1853. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13202-021-01410-z>.
53. Teixeira G.T. Hyperbranched polyglycerols, obtained from environmentally benign monomer, as reactive clays inhibitors for water-based drilling fluids // Applied Polymer Science. – 2014. – Vol. 131. – № 12. – P. 214–250. DOI: 10.1002/app.40384.
54. The structure and application of amine-terminated hyperbranched polymer shale inhibitor for water-based drilling fluid / X. Bai, H. Wang, Y. Luo et al. // Journal of Applied Polymer Science. – 2017. – Vol. 134. – № 46. – P. 23–41. DOI: 10.1002/app.45466.
55. Zumrawi M. Effect of some chloride salts on swelling properties of expansive soil // University of Khartoum Engineering Journal. – 2016. – Vol. 6. – Iss. 2. – P. 35–41. DOI: 10.53332/kuej.v6i2.1005.
56. Brien D.E., Martin E. Stabilizing sensitive shales with inhibited, potassium-based drilling fluids // Journal of Petroleum Technology. – 1973. – Vol. 25. – № 9. – P. 1089–1100. DOI: 10.2118/4232-PA.
57. Potassium sorbate as substitute for KCl to shale inhibition in water-base drilling fluids / M. Naeimavi, F. Khazali, M. Abdideh, Z. Saadati // Energy Sources Part a Recovery Utilization and Environmental Effects. – 2019. – Vol. 43. – № 14. – P. 1691–1705. DOI: 10.1080/15567036.2019.1663303.
58. Zhong H. Shale inhibitive properties of polyether diamine in water-based drilling fluid // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2011. – Vol. 78. – P. 510–515. DOI: 10.1016/j.petrol.2011.06.003
59. Akhtarmanesh S., Shahrabi M.J., Atashnezhad A. Improvement of wellbore stability in shale using nanoparticles // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2013. – Vol. 112. – P. 290–295. DOI: 10.1016/j.petrol.2013.11.017.
60. Sudharsan J., Khare S.K. Role of nanocomposite additives in well bore stability during shale formation drilling with water-based mud – a comprehensive review // Materials Today Proceedings. – 2022. – Vol. 62. – P. 6412–6419. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.04.009.
61. Ren Y. Adsorption of imidazolium-based ionic liquid on sodium bentonite and its effects on rheological and swelling behaviors // Applied Clay Science. – 2019. – Vol. 182. – № 10. – P. 105–248. DOI: 10.1016/j.clay.2019.105248.
62. Imidazolium-based ionic liquids as clay swelling inhibitors: Mechanism, performance evaluation, and effect of different anions / R.A. Khan, M. Murtaza, A. Abdulraheem, M.S. Kamal, M. Mahmoud // ACS Omega. – 2020. – Vol. 5. – Iss. 41. – P. 26682–26696. DOI: 10.1021/acsomega.0c03560.
63. Shadzadeh S.R., Moslemizadeh A., Dezaki A.S. A novel nonionic surfactant for inhibiting shale hydration // Applied Clay Science. – 2015. – Vol. 118. – № 15. – P. 74–86. DOI: 10.1016/j.clay.2015.09.006.
64. A novel non-ionic surfactant extract derived from Chromolaena odorata as shale inhibitor in water-based drilling mud / W.N. Aggrey, N.Y. Asiedu, C.D. Adenutsi, P. Anumah // Heliyon. – 2019. – Vol. 5. – Iss. 5. – P. 35–41. DOI: 10.1016/j.heliyon.2019.e01697.
65. Sehly K. Stability and ageing behaviour and the formulation of potassium-based drilling muds // Applied Clay Science. – 2015. – Vol. 104. – № 2. – P. 309–317. DOI: 10.1016/j.clay.2014.12.013.
66. Optimization of anti-collapse drilling fluid systems with high potassium content / Y. Xia, J. Guan, Y. Gao, S. Tang, J. Rong // Fluid Dynamics & Materials Processing. – 2023. – Vol. 19. – Iss. 6. – P. 1609–1622. DOI: 10.32604/fdmp.2023.025263.
67. Sepehri S. Effect of synthetic water-soluble polymers on the properties of the heavy water-based drilling fluid at high pressure-high temperature (HPHT) conditions // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2018. – Vol. 166. – № 7. – P. 850–856. DOI: 10.1016/j.petrol.2018.03.055.
68. Khodja M. Shale problems and water-based drilling fluid optimisation in the Hassi Messaoud Algerian oil field // Applied Clay Science. – 2010. – Vol. 49. – № 4. – P. 383–393. DOI: 10.1016/j.clay.2010.06.008.
69. Saleh T.A. Advanced trends of shale inhibitors for enhanced properties of water-based drilling fluid // Upstream Oil and Gas Technology. – 2022. – Vol. 8. – P. 100069. DOI: 10.1016/j.upstre.2022.100069.
70. Slaný M., Jankovič L., Madejová J. Structural characterization of organo-montmorillonites prepared from a series of primary alkylamines salts: Mid-IR and near-IR study // Applied Clay Science. – 2019. – Vol. 176. – № 8. – P. 11–20. DOI: 10.1016/j.clay.2019.04.016.
71. Barati P. Shale hydration inhibition characteristics and mechanism of a new amine-based additive in water-based drilling fluids // Petroleum. – 2017. – Vol. 3. – № 4. – P. 476–482. DOI: 10.1016/j.petlm.2017.05.003.
72. Synthesis, property and mechanism analysis of a novel polyhydroxy organic amine shale hydration inhibitor / W. Du, X. Wang, G. Chen, J. Zhang, M. Slaný. // Minerals. – 2020. – Vol. 10. – № 2. – P. 128–135. DOI: 10.3390/min10020128.
73. Muhammed N.S. Comparative study of green and synthetic polymers for enhanced oil recovery // Polymers. – 2020. – P. 242. DOI: 10.3390/polym12102429.
74. Villabona E.S., Rodrigues J.A., Nascimento R.S. Understanding the clay-PEG (and hydrophobic derivatives) interactions and their effect on clay hydration and dispersion: a comparative study // Applied Clay Science. – 2017. – Vol. 143. – № 8. – P. 89–100. DOI: 10.1016/j.clay.2017.03.021.

75. Zhang M., Mao H., Jin Z. Molecular dynamic study on structural and dynamic properties of water, counter-ions and polyethylene glycols in Na-montmorillonite interlayers // *Applied Surface Science*. – 2021. – Iss. 536. – P. 147700. DOI: 10.1016/j.apsusc.2020.147700.
76. Yekeen N., Padmanabhan E., Idris A.K. A review of recent advances in foam-based fracturing fluid application in unconventional reservoirs // *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. – 2018. – Vol. 66. – № 10. – P. 45–71. DOI: 10.1016/j.jiec.2018.05.039.
77. Kamal M.S. Review on polymer flooding: rheology, adsorption, stability, and field applications of various polymer systems // *Polymer Reviews*. – 2015. – Vol. 55. – № 3. – P. 491–530. DOI: 10.1080/15583724.2014.982821.
78. Li X., Zhang F., Liu G. Review on polymer flooding technology // *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*. – 2021. – Vol. 675. – Iss. 1. – P. 1–15. DOI: 10.1088/1755-1315/675/1/012199.
79. Balaban R.C., Vidal E.L., Borges M.R. Design of experiments to evaluate clay swelling inhibition by different combinations of organic compounds and inorganic salts for application in water base drilling fluids // *Applied Clay Science*. – 2015. – Vol. 105–106. – № 3. – P. 124–130. DOI: 10.1016/J.CLAY.2014.12.029.
80. Molecular insight into inhibitory performance of CTAB surfactant for montmorillonite swelling; implications for drilling fluid design / M. Karimi, M. Ghasemi, M. Babaei, K. Shahbazi // *Geoenergy Science and Engineering*. – 2023. – Vol. 231. – P. 231–263. DOI: 10.1016/j.geoen.2023.212399.
81. Ahmed H.M., Kamal M.S., Al-Harthi M. Polymeric and low molecular weight shale inhibitors // *Fuel*. – 2019. – Vol. 251. – P. 187–217. DOI: 10.1016/j.fuel.2019.04.038.
82. Shale inhibition by low-molecular-weight cationic polymer in water-based mud / M. Beg, P. Singh, S. Sharma, U. Ojha // *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. – 2018. – Vol. 9. – № 3. – P. 1995–2007. DOI: 10.1007/s13202-018-0592-7.
83. Pana O. Structure, morphology and magnetic properties of Fe-Au core-shell nanoparticles // *Surface Science*. – 2007. – Vol. 601. – Iss. 18. – № 9. – P. 79–81. DOI: 10.1016/j.susc.2007.06.024
84. Composition and structure of magnetic high-temperature-phase, stable Fe–Au core–shell nanoparticles with zero-valent bcc Fe core / M. Kamp, A. Tymoczko, R. Popescu, U. Schürmann, R. Nadarajah, B. Gökce, C. Rehbock, D. Gerthsen, S. Barcikowski, L. Kienle // *Nanoscale Advances*. – 2020. – Vol. 2. – № 9. – P. 3912–3920. DOI: <https://doi.org/10.1039/d0na00514b>.
85. Amanullah M.D. Dendrimers and dendritic polymers. Application for superior and intelligent fluid development for oil and gas field applications // *SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference*. – UAE: Abu Dhabi, 2013. – P. 96–113.
86. Application and research prospect of functional polymer gels in oil and gas drilling and development engineering / Y. Bai, Y. Liu, K. Yang, Y. Lang // *Gels*. – 2023. – Vol. 9. – № 5. – P. 413. DOI: <https://doi.org/10.3390/gels9050413>.
87. Advances in inhibitive water-based drilling fluids – can they replace oil-based muds? / A. Patel, E. Stamatakis, S. Young, J. Friedheim // *Proceedings of SPE International Symposium on Oilfield Chemistry*. – Houston, Texas, U.S.A., February 2007. – SPE-106476-MS. – P. 614–621. DOI: <https://doi.org/10.2118/106476-MS>
88. Xie G. Intercalation behavior of branched polyethyleneimine into sodium bentonite and its effect on rheological properties // *Applied Clay Science*. – 2017. – Vol. 141. – № 6. – P. 95–103. DOI: 10.1016/j.clay.2017.02.018.
89. Gholizadeh N. Development of high-performance water-based mud formulation based on amine derivatives // *SPE International Conference on Oilfield Chemistry*. – USA, Texas, 2009. – P. 20–22.
90. Effect on water-based drilling fluids and wellbore stability / A.H. Abdullah, S. Ridha, D.F. Mohshim, M. Yusuf, H. Kamyab, S. Krishna, M.A. Maoinser // *A comprehensive review of nanoparticles Chemosphere*. – 2022. – Vol. 308. – P. 136–274. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136274>.
91. Wang L. Effect of poly (propylene) diamine adsorption on hydration and dispersion of montmorillonite particles in aqueous solution // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. – 2011. – Vol. 381. – Iss. 1–3. – № 5. – P. 41–47. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2011.03.008.
92. Adsorption of different ionic types of polyacrylamide on montmorillonite surface: insight from QCM-D and molecular dynamic simulation / X. Ma, X. Sun, M. Chang, Q. Liu, X. Dong, Y. Fan, R. Chen // *Molecules*. – 2023. – Vol. 28. – P. 4–17. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules28114417>.
93. Guancheng J. Polyethyleneimine as shale inhibitor in drilling fluid // *Applied Clay Science*. – 2016. – Vol. 127–128. – P. 70–77. DOI: 10.1016/j.clay.2016.04.013.
94. Saleh T.A., Nur M.M. Synthesis of polyacrylic-melamine grafted graphene as efficient inhibitor for shale stabilization in water-based drilling fluid // *Materials Today Communications*. – 2023. – Vol. 35. – P. 106–264. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.106264>.
95. Zhong H. Poly (oxypropylene)-amidoamine modified bentonite as potential shale inhibitor in water-based drilling fluids // *Applied Clay Science*. – 2012. – Vol. 67–68. – № 10. – P. 36–43. DOI: 10.1016/j.clay.2012.06.002.
96. Arvind P. Designing for the future – a review of the design, development and testing of a novel // *Inhibitive Water-Based Drilling Fluid*. – 2017. – Vol. 141. – P. 95–114. DOI: 10.1145/2843592.
97. Arruda S.C. Nanoparticles applied to plant science: a review // *Talanta*. – 2015. – Vol. 131. – № 6. – P. 693–705. DOI: 10.1016/j.talanta.2014.08.050.
98. A comprehensive review of impacts of diverse nanoparticles on growth, development and physiological adjustments in plants under changing environment / U. Aqeel, T. Aftab, M.M.A. Khan, M. Naeem, M.N. Khan // *Chemosphere*. – 2022. – Vol. 291. – P. 132–672. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132672>.
99. Ghosh S.K., Pal T. Interparticle coupling effect on the surface plasmon resonance of gold nanoparticles: From theory to applications // *Chemical Reviews*. – 2007. – Vol. 107. – Iss. 11. – № 11. – P. 4797–4862. DOI: 10.1021/cr0680282.
100. Recent progress and challenges in plasmonic nanomaterials / H. Duan, T. Wang, Z. Su, H. Pang, C. Chen // *Nanotechnology Reviews*. – 2022. – Vol. 11. – P. 846–873. DOI: <https://doi.org/10.1515/ntrev-2022-0039>.
101. Khan Ib., Saeed K., Khan Id. Nanoparticles: properties, applications and toxicities // *Arabian Journal of Chemistry*. – 2019. – Vol. 12. – № 7. – P. 908–931. DOI: 10.1016/j.arabjc.2017.05.011.

102. Jeevanandam J. Review on nanoparticles and nanostructured materials: History, sources, toxicity and regulations // *Beilstein Journal of Nanotechnology*. – 2018. – Vol. 9. – P. 1050–1074. DOI: 10.3762/bjnano.9.98.
103. Buzea C., Pacheco I.L., Robbie K. Nanomaterials and nanoparticles: Sources and toxicity // *Journal of Biointerphases*. – 2007. – Vol. 2. – № 4. – P. 17. DOI: 10.1116/1.2815690.
104. Vargas-Estrada L. Role of nanoparticles on microalgal cultivation. – 2020 – Vol. 280. – № 11. – P. 118. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.118598.
105. Zhang T. Investigation of nanoparticle adsorption during transport in porous media // *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. – New Orleans, Louisiana, USA, September 2013. – Paper Number: SPE-166346-MS. – P. 1–20. DOI: 10.2118/166346-MS.
106. Xu Y. Supercritical CO₂-philic nanoparticles suitable for determining the viability of carbon sequestration in shale // *Environmental Science: Nano*. – 2015. – Iss. 3. – P. 288–296. DOI: 10.1039/C5EN00003C.
107. Liang S. Oil detachment by modified nanoparticles: a molecular dynamics simulation study // *Computational Materials Science*. – 2019. – Vol. 170. – P. 109–177.
108. Abdolbaghi S., Pourmahdian S., Saadat Y. Preparation of poly(acrylamide)/nanoclay organic-inorganic hybrid nanoparticles with average size of 250 nm via inverse Pickering emulsion polymerization // *Colloid and Polymer Science*. – 2014. – Vol. 292. – № 1. – P. 1091–1097. DOI: 10.1007/s00396-013-3158-8.
109. Wilczewska A.Z. Nanoparticles as drug delivery systems // *Pharmacological Reports*. – 2012. – Vol. 64. – № 5. – P. 1020–1037. DOI: 10.1016/s1734-1140(12)70901-5
110. Rizvi S.A., Saleh A.M. Applications of nanoparticle systems in drug delivery technology // *Saudi Pharmaceutical Journal*. – 2018. – Vol. 26. – № 1. – P. 64–70. DOI: 10.1016/j.jsps.2017.10.012.
111. Chandrakala V., Aruna V., Angajala G. Review on metal nanoparticles as nanocarriers: current challenges and perspectives in drug delivery systems // *Emergent Materials*. – 2022. – Vol. 5. – P. 1593–1615. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42247-021-00335-x>.
112. Hossain M.K., Mukhaimer A.W. Nanoparticles-decorated silicon absorber: absorption depth profile characteristics within absorbing layer // *Solar Energy*. – 2020. – Vol. 204. – P. 552–560. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.05.012>.
113. Pfeiffer T. Plasmonic nanoparticle films for solar cell applications fabricated by size-selective aerosol deposition // *Energy Procedia*. – 2014. – Vol. 60. – P. 3–12. DOI: 10.1016/j.egypro.2014.12.335.
114. Olayiwola S.O., Dejam M. Synergistic interaction of nanoparticles with low salinity water and surfactant during alternating injection into sandstone reservoirs to improve oil recovery and reduce formation damage // *Journal of Molecular Liquids*. – 2020. – Vol. 317. – № 11. – P. 114. DOI: 10.1016/j.molliq.2020.114228.
115. Zhao X. Formation damage mechanisms associated with drilling and completion fluids for deep water reservoirs // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2019. – Vol. 173. – P. 112–121. DOI: 10.1016/j.petrol.2018.09.098.
116. Minireview of formation damage control through nanotechnology utilization at fieldwork conditions/ M.R. Ngata, B. Yang, M.D. Aminu, B.L. Emmanuel, A.A. Said, D.C. Kalibwami, G.C. Mwikipunda, E. Ochilov, E.E. Nyakilla // *Energy & Fuels*. – 2022. – Vol. 36. – P. 4174–4185. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.2c00210>.
117. Cheraghian G. A review on applications of nanotechnology in the enhanced oil recovery part A: effects of nanoparticles on interfacial tension // *International Nano Letters*. – 2016. – Vol. 6. – P. 129–138. DOI: 10.1007/s40089-015-0173-4.
118. Aghajanzadeh M.R. Wettability modification of oil-wet carbonate reservoirs using silica-based nanofluid: an experimental approach // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2019. – Vol. 178. – P. 700–710. DOI: 10.1016/j.petrol.2019.03.059.
119. Pham H. Effect of silica nanoparticles on clay swelling and aqueous stability of nanoparticle dispersions // *Journal of Nanoparticle Research*. – 2014. – Vol. 16. – P. 1–11. DOI: 10.1007/s11051-013-2137-9.
120. De Lara L.S., Rigo V.A., Miranda C.R. Controlling clay swelling–shrinkage with inorganic nanoparticles // *Journal of Physical Chemistry C*. – 2017. – Vol. 121. – Iss. 37. – P. 142–147. DOI: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.jpcc.7b05130>
121. Rezaei A. Using surface modified clay nanoparticles to improve rheological behavior of Hydrolyzed Polyacrylamid solution for enhanced oil recovery with polymer flooding // *Journal of Molecular Liquids*. – 2016. – Vol. 222. – P. 1148–1156. DOI: 10.1016/j.molliq.2016.08.004.
122. Bayat A.E. Experimental investigation of rheological and filtration properties of water-based drilling fluids in presence of various nanoparticles // *Colloids and Surfaces: Physicochemical and Engineering Aspects*. – 2018. – Vol. 555. – P. 256–263. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2018.07.001.
123. Paul S.C. Properties of cement-based composites using nanoparticles: a comprehensive review // *Construction and Building Materials*. – 2018. – Vol. 189. – P. 1019–1034. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.09.062.
124. Kawashima S. Modification of cement-based materials with nanoparticles // *Cement and Concrete Composites*. – 2013. – Vol. 36. – № 1. – P. 8–15. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2012.06.012.
125. Kleibert A. Structure, morphology, and magnetic properties of Fe nanoparticles deposited onto single-crystalline surfaces // *Beilstein Journal of Nanotechnology*. – 2011. – Vol. 2. – № 1. – P. 47–56. DOI: 10.3762/bjnano.2.6.
126. Agarwal R. et al. Effect of shape, size, and aspect ratio on nanoparticle penetration and distribution inside solid tissues using 3D spheroid models // *Advanced Healthcare Materials*. – 2015. – Vol. 4. – № 15. – P. 2269–2280. DOI: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26376024/>
127. Харламов С.Н., Мехран Д., Филиппов К.А. Математическое моделирование и методы исследования гидродинамической очистки горизонтальных скважин // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2021. – Т. 332. – № 8. – С. 53–73. DOI: 10.18799/24131830/2021/8/3305.
128. Харламов С.Н., Джангхорбани М. Численное исследование вязкостно-инерционного ламинарного закрученного течения в круглой трубе с эксцентричным круглым ядром // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2021. – Т. 332. – № 11. – С. 7–21

129. Харламов С.Н., Джанхорбани М., Зайковский В.В. Транспорт шлама буровым раствором в горизонтальных скважинах. Часть 1. Моделирование структуры дисперсных течений // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 10. – С. 34–48.
130. Kharlamov S.N., Janghorbani M., Bryksin M.R. Aspects of computer simulation of transport and cleaning processes from cuttings in horizontal well sections // Mathematical Models and Computer Simulations. – 2023. – Vol. 15. – Iss. 3. – P. 502–519.

Сведения об авторах

Софьян Самеер Ал-обаиди, аспирант, отделение нефтегазового дела, Инженерная школа природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; Al_obaidi@tpu.ru

Даси Эван, аспирант, отделение нефтегазового дела, Инженерная школа природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; de01@tpu.ru

Сергей Николаевич Харламов, доктор физико-математических наук, профессор, отделение нефтегазового дела, Инженерная школа природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; kharsn@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0007-4362-2511>

Поступила в редакцию: 05.09.2024

Поступила после рецензирования: 16.09.2024

Принята к публикации: 19.09.2024

REFERENCES

1. Lyu Q. A review of shale swelling by water adsorption. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2015, vol. 27, pp. 1421–1431. DOI: 10.1016/j.jngse.2015.10.004.
2. Shen W., Li X., Cihan A., Lu X., Liu X. Experimental and numerical simulation of water adsorption and diffusion in shale gas reservoir rocks. *Advances in geo-energy research*, 2019, vol. 3, no. 2, pp. 165–174. DOI: 10.26804/ager.2019.02.06
3. Heidug W.K., Bm S.S., Miri M. Hydration swelling of water-absorbing rocks: a constitutive model. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 1996, vol. 20, pp. 403–430. DOI: 10.1002/(SICI)1096-9853(199606)20:6<403::AID-NAG832>3.0.CO;2-7.
4. Liu A., Liu S., Zhang R., Sang G., Xia K. Cyclical water vapor sorption-induced structural alterations of mine roof shale. *International Journal of Coal Geology*, 2023, vol. 273, pp. 1–11 (104267). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coal.2023.104267>.
5. Gomaa I., Mahmoud M. Stimulating illitic sandstone reservoirs using in-situ generated HF with the aid of thermochemicals. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, vol. 190, pp. 113–130. DOI: 10.1016/j.petrol.2020.107089.
6. Carpenter C. Thermochemical fluid used in field application of sandstone stimulation. *Journal of Petroleum Technology*, 2022, vol. 74, no. 3, pp. 98–100. DOI: 10.2118/0322-0098-jpt.
7. Murray H.H. Structure and composition of the clay minerals and their physical and chemical properties. Chapter 2. *Developments in Clay Science*, 2006, vol. 2, pp. 7–31. DOI: 10.1016/S1572-4352(06)02002-2.
8. Kumari N., Mohan C. *Basics of clay minerals and their characteristic properties*. Croatia, IntechOpen eBooks, 2021. 210 p. DOI: 10.5772/intechopen.97672.
9. Ochieng O. Characterization and classification of clay minerals for potential applications in Rugi Ward, Kenya. *African Journal of Environmental Science and Technology*, 2016, vol. 10, no. 11, pp. 415–431. DOI: 10.5897/AJEST2016.2184.
10. Ihekwe G.O., Shondo J.N., Orisekeh K.I., Kalu-Uka G.M., Nwuzor I.C., Onwualu A.P. Characterization of certain Nigerian clay minerals for water purification and other industrial applications. *Heliyon*, 2020, vol. 6, no. 4, pp. 1–7. DOI: 10.1016/j.heliyon.2020.e03783
11. Aksu I., Bazilevskaya E., Karpyn Z.T. Swelling of clay minerals in unconsolidated porous media and its impact on permeability. *GeoResJ*, 2015, vol. 7, pp. 1–13. DOI: 10.1016/j.grj.2015.02.003.
12. Mehdizad A., Pourafshary P., Sedaee B. Visual investigation of simultaneous clay swelling and migration mechanisms and formation damage consequences using micromodels. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, vol. 214, pp. 1–12. DOI: 10.1016/j.petrol.2022.110561.
13. Hamdi N., Srasra E. Acid-base properties of organosmectite in aqueous suspension. *Applied Clay Science*, 2014, vol. 99, pp. 1–6. DOI: 10.1016/j.clay.2014.07.009.
14. Mohammed I., Shehri D.A., Mahmoud M., Kamal M.S., Alade O., Arif M., Patil S. Effect of native reservoir state and oilfield operations on clay mineral surface chemistry. *Molecules*, 2022, vol. 27, no. 5, pp. 1739. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules27051739>.
15. Sun L. Molecular dynamics study of montmorillonite crystalline swelling: Roles of interlayer cation species and water content. *Chemical Physics*, 2015, vol. 455, pp. 23–31. DOI: 10.1016/j.chemphys.2015.04.005.
16. Zhang W., Chen S., Tong K., Li S., Huang K., Dai Z., Luo L. Effects of the layer charge location and interlayer cation on rectorite swelling properties: comparison between molecular dynamics simulations and experiments. *The Journal of Physical Chemistry*, 2022, ser. C, vol. 126, no. 22, pp. 9597–9609. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.2c02549>
17. Valkov M., Simha G. Vermiculite: structural properties and examples of the use. *Clay Minerals in Nature. Modification and Application*. Eds. M. Valášková, G.S. Martynková. Czech Republic, University of Ostrava, 2012. pp. 210–243.

18. Berdiev K.R., Sirojiddinov A.B., Yakubov Q.X., Dusmatov X.M. Study of structural properties and flame of vollastanite, dolomite, vermiculite minerals. *The American Journal of Applied Sciences*, 2021, vol. 3, no. 1, pp. 30–37. DOI: 10.37547/tajas/volume03issue01-07.
19. Brigatti M.F., Galán E., Theng B.K.G. Structure and mineralogy of clay minerals. *Journal Developments in Clay Science*, 2013, vol. 5, pp. 21–81. DOI: 10.1016/B978-0-08-098258-8.00002-X.
20. Choo K.Y., Bai K. Effects of bentonite concentration and solution pH on the rheological properties and long-term stabilities of bentonite suspensions. *Applied Clay Science*, 2015, vol. 108, pp. 182–190. DOI: 10.1016/j.clay.2015.02.023.
21. Shao J., Sun D., Peng F., Zeng Z. Effect of the alkaline solution concentration on swelling performance of MX80 granular bentonite. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2023, vol. 27, no. 14, pp. 4181–4196. DOI: 10.1080/19648189.2023.2177753.
22. Quainoo A.K. A perspective on the potential application of bio-inhibitors for shale stabilization during drilling and hydraulic fracturing processes. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2020, vol. 79, pp. 103–108. DOI: 10.1016/j.jngse.2020.103380.
23. Rahman M.T., Negash B.M., Moniruzzaman M., Quainoo A.K., Bavoh C.B., Padmanabhan E. An overview on the potential application of ionic liquids in shale stabilization processes. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2020, vol. 81, pp. 1–12. DOI: 10.1016/j.jngse.2020.103480.
24. Eveline V.F., Yucel A.I. Osmosis and clay swelling effects in gas shale formations under stress. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. San Antonio, Gonzalez Convention, 2018. Vol. 2, pp. 19–99.
25. Eveline V.F., Santos L.P., Akkutlu I.Y. Thermally-Induced secondary fracture development in shale formations during hydraulic fracture water invasion and clay swelling. *SPE Journal*, June 3, 2019, no. 6, pp. 1–10. DOI: 10.2118/195543-ms.
26. Al-Obaidi S.S., Kharlamov S.N. Analysis of pipe sticking at well drilling in the South Iraqi limestone and sandstone reservoirs. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 8, pp. 91–111. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4716
27. Ahmed H.M., Kamal M.S., Al-Harhi M. Polymeric and low molecular weight shale inhibitors. *Fuel*, 2019, vol. 251, pp. 187–217. DOI: 10.1016/j.fuel.2019.04.038.
28. Beg M., Singh P., Sharma S., Ojha U. Shale inhibition by low-molecular-weight cationic polymer in water-based mud. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2018, vol. 9, no. 3, pp. 1995–2007. DOI: 10.1007/s13202-018-0592-7.
29. Anderson R.L. Clay swelling – a challenge in the oilfield. *Earth-Science Reviews*, 2010, vol. 98, Iss. 3–4, pp. 201–216. DOI: 10.1016/j.earscirev.2009.11.003.
30. Cai W., Zhu H., Liang W. Three-dimensional stress rotation and control mechanism of deep tunneling incorporating generalized Zhang–Zhu strength-based forward analysis. *Engineering Geology*, 2022, vol. 308, pp. 21–34. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106806>.
31. Butscher C., Thomas M., Blum P. Swelling of clay-sulfate rocks: a review of processes and controls. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, vol. 49, pp. 1533–1549. DOI: 10.1007/s00603-015-0827-6.
32. Schweizer D., Prommer H., Blum P., Siade A.J., Butscher C. Reactive transport modeling of swelling processes in clay-sulfate rocks. *Water Resources Research*, 2018, vol. 54, no. 9, pp. 6543–6565. DOI: 10.1029/2018wr023579.
33. Müller V.M., Løken T. The shearing behaviour of clays. *Applied Clay Science*, 1989, vol. 4, no. 2, pp. 125–141. DOI: 10.1051/e3sconf/20199214003.
34. Swai R.E. A review of molecular dynamics simulations in the designing of effective shale inhibitors: application for drilling with water-based drilling fluids. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2020, vol. 10, no. 8, pp. 3515–3532. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13202-020-01003-2>.
35. Steiner W. Swelling rock in tunnels: rock characterization, effect of horizontal stresses and construction procedures. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1993, vol. 30, no. 4, pp. 361–380. DOI: 10.1016/0148-9062(93)91720-4.
36. Liu G.-Y., Chen Y.-L., Du X., Azzam R. A fractional viscoplastic model to predict the time-dependent displacement of deeply buried tunnels in swelling rock. *Computers and Geotechnics*, 2020, vol. 129, pp. 23–31. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2020.103901>
37. Wilson M.J., Wilson L.S. Clay mineralogy and shale instability: an alternative conceptual analysis. *Clay Minerals*, 2014, vol. 11, pp. 127–145. DOI: 10.1180/claymin.2014.049.2.01.
38. Andi A.A. Mineralogy and rock response analysis approach to mitigate wellbore stability issue in “B” cluster of East Java Field. *Journal of Petroleum and Geothermal Technology*, 2023, vol. 4, no. 1, pp. 1–21. DOI: 10.31315/jpgt.v4i1.7336.
39. Wang L.L. Swelling of shales: a multiscale experimental investigation. *Energy and Fuels*, 2017, vol. 31, pp. 10442–10451. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.7b01223.
40. Gao Q., Liu J., Leong Y.K., Elsworth D. A review of swelling effect on shale permeability: assessments and perspectives. *Energy & Fuels*, 2023, vol. 37, no. 5, pp. 3488–3500. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.2c04005.
41. Rahman M.T. An overview on the potential application of ionic liquids in shale stabilization processes. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2020, vol. 81, no. 9, pp. 103. DOI: 10.1016/j.jngse.2020.103480.
42. Saien J., Kharazi M., Pino V., Pacheco-Fernández I. Trends offered by ionic liquid-based surfactants: Applications in stabilization, separation processes, and within the petroleum industry. *Separation and Purification Reviews*, 2022, vol. 52, no. 3, pp. 164–192. DOI: 10.1080/15422119.2022.2052094.
43. Ruedrich J. Moisture expansion as a deterioration factor for sandstone used in buildings. *Environmental Earth Sciences*, 2011, pp. 1545–1564. DOI: 10.1007/s12665-010-0767-0.
44. López-Doncel R., Wedekind W., Dohrmann R., Siegesmund S. Moisture expansion associated to secondary porosity: an example of the Loseros Tuff of Guanajuato, Mexico. *Environmental Earth Sciences*, 2012, vol. 69, no. 4, pp. 1189–1201. DOI: 10.1007/s12665-012-1781-1.

45. Rana A., Arfaj M.K., Saleh T.A. Advanced developments in shale inhibitors for oil production with low environmental footprints. *Fuel*, 2019, vol. 247, pp. 237–249. DOI: 10.1016/j.fuel.2019.03.006.
46. Jingyuan M., Boru X., Yuxiu A. Advanced developments in low-toxic and environmentally friendly shale inhibitor: a review. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, vol. 208, pp. 109578. DOI: 10.1016/j.petrol.2021.109578.
47. Almubarak T. A collective clay stabilizers review. *International Petroleum Technology Conference*. Doha, Qatar, December 2015. Paper Number: IPTC-18394-MS, pp. 104. DOI: 10.2523/IPTC-18394-MS
48. Wang L. Clay stabilization in sandstone reservoirs and the perspectives for shale reservoirs. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2020, vol. 276, pp. 1–11. DOI: 10.1016/j.cis.2019.102087.
49. Gholami R. A review on borehole instability in active shale formations: Interactions, mechanisms and inhibitors. *Earth-Science Reviews*, 2018, vol. 177, pp. 2–13. DOI: 10.1016/j.earscirev.2017.11.002.
50. Yan C.-L., Dong L.-F., Zhao K., Cheng Y.-F., Li X.-R., Deng J.-G., Li Z.-Q., Chen Y. Time-dependent borehole stability in hard-brittle shale. *Petroleum Science*, 2022, vol. 19, no. 2, pp. 663–677. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petsci.2021.12.019>.
51. Liu X.D., Lu X.C. A thermodynamic understanding of clay-swelling inhibition by potassiumions. *Angewandte chemie. International edition*, 2006, vol. 45, Iss. 38, no. 9, pp. 6300–6303. DOI: 10.1002/anie.200601740.
52. Rahman M.T., Negash B.M., Danso D.K., Idris A., Elryes A.A., Umar I.A. Effects of imidazolium- and ammonium-based ionic liquids on clay swelling: experimental and simulation approach. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2021, vol. 12, no. 7, pp. 1841–1853. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13202-021-01410-z>.
53. Teixeira G.T. Hyperbranched polyglycerols, obtained from environmentally benign monomer, as reactive clays inhibitors for water-based drilling fluids. *Applied Polymer Science*, 2014, vol. 131, no.12, pp. 214–250. DOI: 10.1002/app.40384.
54. Bai X., Wang H., Luo Y. The structure and application of amine-terminated hyperbranched polymer shale inhibitor for water-based drilling fluid. *Journal of Applied Polymer Science*, 2017, vol. 134, no. 46, pp. 23–41. DOI: 10.1002/app.45466.
55. Zumrawi M. Effect of some chloride salts on swelling properties of expansive soil. *University of Khartoum Engineering Journal*, 2016, vol. 6, Iss. 2, pp. 35–41. DOI: 10.53332/kuej.v6i2.1005.
56. Brien D.E., Martin E. Stabilizing sensitive shales with inhibited, potassium-based drilling fluids. *Journal of Petroleum Technology*, 1973, vol. 25, no. 9, pp. 1089–1100. DOI: 10.2118/4232-PA.
57. Naeimavi M., Khazali F., Abdideh M., Saadati Z. Potassium sorbate as substitute for KCl to shale inhibition in water-base drilling fluids. *Energy Sources Part a Recovery Utilization and Environmental Effects*, 2019, vol. 43, no. 14, pp. 1691–1705. DOI: 10.1080/15567036.2019.1663303.
58. Zhong H. Shale inhibitive properties of polyether diamine in water-based drilling fluid. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2011, vol. 78, pp. 510–515. DOI: 10.1016/j.petrol.2011.06.003
59. Akhtarmanesh M., Shahrabi M.J., Atashnezhad A. Improvement of wellbore stability in shale using nanoparticles. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2013, vol. 112, pp. 290–295. DOI: 10.1016/j.petrol.2013.11.017.
60. Sudharsan J., Khare S.K. Role of nanocomposite additives in well bore stability during shale formation drilling with water-based mud – a comprehensive review. *Materials Today Proceedings*, 2022, vol. 62, pp. 6412–6419. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.04.009.
61. Ren Y. Adsorption of imidazolium-based ionic liquid on sodium bentonite and its effects on rheological and swelling behaviors. *Applied Clay Science*, 2019, vol. 182, no. 10, pp. 105–248. DOI: 10.1016/j.clay.2019.105248.
62. Khan R.A., Murtaza M., Abdulraheem A., Kamal M.S., Mahmoud M. Imidazolium-based ionic liquids as clay swelling inhibitors: mechanism, performance evaluation, and effect of different anions. *ACS Omega*, 2020, vol. 5, Iss. 41, pp. 26682–26696. DOI: 10.1021/acsomega.0c03560.
63. Shadizadeh S.R., Moslemizadeh A., Dezaki A.S. A novel nonionic surfactant for inhibiting shale hydration. *Applied Clay Science*, 2015, vol. 118, no. 15, pp. 74–86. DOI: 10.1016/j.clay.2015.09.006.
64. Aggrey W.N., Asiedu N.Y., Adenutsi C.D., Anumah P. A novel non-ionic surfactant extract derived from *Chromolaena odorata* as shale inhibitor in water-based drilling mud. *Heliyon*, 2019, vol. 5, Iss. 5, pp. 35–41. DOI: 10.1016/j.heliyon.2019.e01697.
65. Sehly K. Stability and ageing behaviour and the formulation of potassium-based drilling muds. *Applied Clay Science*, 2015, vol. 104, no. 2, pp. 309–317. DOI: 10.1016/j.clay.2014.12.013.
66. Xia Y., Guan J., Gao Y., Tang S., Rong J. Optimization of anti-collapse drilling fluid systems with high potassium content. *Fluid Dynamics & Materials Processing*, 2023, vol. 19, Iss. 6, pp. 1609–1622. DOI: 10.32604/fdmp.2023.025263.
67. Sepelri S. Effect of synthetic water-soluble polymers on the properties of the heavy water-based drilling fluid at high pressure-high temperature (HPHT) conditions. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, vol. 166, no. 7, pp. 850–856. DOI: 10.1016/j.petrol.2018.03.055.
68. Khodja M. Shale problems and water-based drilling fluid optimisation in the Hassi Messaoud Algerian oil field. *Applied Clay Science*, 2010, vol. 49, no. 4, pp. 383–393. DOI: 10.1016/j.clay.2010.06.008.
69. Saleh T.A. Advanced trends of shale inhibitors for enhanced properties of water-based drilling fluid. *Upstream Oil and Gas Technology*, 2022, vol. 8, pp. 100069. DOI: 10.1016/j.upstre.2022.100069.
70. Slaný M., Jankovič L., Madejová J. Structural characterization of organo-montmorillonites prepared from a series of primary alkylamines salts: mid-IR and near-IR study. *Applied Clay Science*, 2019, vol. 176, no. 8, pp. 11–20. DOI: 10.1016/j.clay.2019.04.016.
71. Barati P. Shale hydration inhibition characteristics and mechanism of a new amine-based additive in water-based drilling fluids. *Petroleum*, 2017, vol. 3, no. 4, pp. 476–482. DOI: 10.1016/j.petlm.2017.05.003.
72. Du W., Wang X., Chen G., Zhang J., Slaný M. Synthesis, property and mechanism analysis of a novel polyhydroxy organic amine shale hydration inhibitor. *Minerals*, 2020, vol. 10, no. 2, pp. 128–142. DOI: 10.3390/min10020128.
73. Muhammed N.S. Comparative study of green and synthetic polymers for enhanced oil recovery. *Polymers*, 2020, pp. 242. DOI: 10.3390/polym12102429.

74. Villabona E.S., Rodrigues J.A., Nascimento R.S. Understanding the clay-PEG (and hydrophobic derivatives) interactions and their effect on clay hydration and dispersion: a comparative study. *Applied Clay Science*, 2017, vol. 143, no. 8, pp. 89–100. DOI: 10.1016/j.clay.2017.03.021.
75. Zhang M., Mao H., Jin Z. Molecular dynamic study on structural and dynamic properties of water, counter-ions and polyethylene glycols in Na-montmorillonite interlayers. *Applied Surface Science*, 2021, vol. 536, pp. 147700. DOI: 10.1016/j.apsusc.2020.147700.
76. Yekeen N., Padmanabhan E., Idris A.K. A review of recent advances in foam-based fracturing fluid application in unconventional reservoirs. *Industrial and Engineering Chemistry*, 2018, vol. 66, no. 10, pp. 45–71. DOI: 10.1016/j.jiec.2018.05.039.
77. Kamal M.S. Review on polymer flooding: rheology, adsorption, stability, and field applications of various polymer systems. *Polymer Reviews*, 2015, vol. 55, no. 3, pp. 491–530. DOI: 10.1080/15583724.2014.982821.
78. Li X., Zhang F., Liu G. Review on polymer flooding technology. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 675, Iss. 1, pp. 1–15. DOI: 10.1088/1755-1315/675/1/012199.
79. Balaban R.C., Vidal E.L., Borges M.R. Design of experiments to evaluate clay swelling inhibition by different combinations of organic compounds and inorganic salts for application in water base drilling fluids. *Applied Clay Science*, 2015, vol. 105–106, no. 3, pp. 124–130. DOI: 10.1016/J.CLAY.2014.12.029.
80. Karimi M., Ghasemi M., Babaei M., Shahbazi K. Molecular insight into inhibitory performance of CTAB surfactant for montmorillonite swelling; implications for drilling fluid design. *Geoenergy Science and Engineering*, 2023, vol. 231, pp. 231–263. DOI: 10.1016/j.geoen.2023.212399.
81. Ahmed H.M., Kamal M.S., Al-Harhi M. Polymeric and low molecular weight shale inhibitors. *Fuel*, 2019, vol. 251, pp. 187–217. DOI: 10.1016/j.fuel.2019.04.038.
82. Beg M., Singh P., Sharma S., Ojha U. Shale inhibition by low-molecular-weight cationic polymer in water-based mud. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2018, vol. 9, no. 3, pp. 1995–2007. DOI: 10.1007/s13202-018-0592-7.
83. Pana O. Structure, morphology and magnetic properties of Fe-Au core-shell nanoparticles. *Surface Science*, 2007, vol. 601, Iss. 18, no. 9, pp. 79–81. DOI: 10.1016/j.susc.2007.06.024.
84. Kamp M., Tymoczko A., Popescu R., Schürmann U., Nadarajah R., Gökce B., Rehbock C., Gerthsen D., Barcikowski S., Kienle L. Composition and structure of magnetic high-temperature-phase, stable Fe-Au core-shell nanoparticles with zero-valent bcc Fe core. *Nanoscale Advances*, 2020, vol. 2, no. 9, pp. 3912–3920. DOI: <https://doi.org/10.1039/d0na00514b>.
85. Amanullah M.D. Dendrimers and dendritic polymers. Application for superior and intelligent fluid development for oil and gas field applications. *SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference*. UAE, Abu Dha, 2013. pp. 96–113.
86. Liu Y., Yang K., Lang Y. Application and research prospect of functional polymer gels in oil and gas drilling and development engineering. *Gels*, 2023, vol. 9, no. 5, pp. 413. DOI: <https://doi.org/10.3390/gels9050413>.
87. Patel A., Stamatakis E., Young S., Friedheim J. Advances in inhibitive water-based drilling fluids - can they replace oil-based muds? *Proceedings of SPE International Symposium on Oilfield Chemistry*. Houston, Texas, U.S.A., February 2007. SPE-106476-MS. pp. 614–621. DOI: <https://doi.org/10.2118/106476-MS>
88. Xie G. Intercalation behavior of branched polyethyleneimine into sodium bentonite and its effect on rheological properties. *Applied Clay Science*, 2017, vol. 141, no. 6, pp. 95–103. DOI: 10.1016/j.clay.2017.02.018.
89. Gholizadeh N. Development of high-performance water-based mud formulation based on amine derivatives. *SPE International Conference on Oilfield Chemistry*. USA, Texas, 2009. pp. 20–22.
90. Abdullah A.H., Ridha S., Mohshim D.F., Yusuf M., Kamyab H., Krishna S., Maoinsar M.A. A comprehensive review of nanoparticles: Effect on water-based drilling fluids and wellbore stability. *Chemosphere*, 2022, vol. 308, pp. 136–274. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136274>.
91. Wang L. Effect of poly (propylene) diamine adsorption on hydration and dispersion of montmorillonite particles in aqueous solution. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2011, vol. 381, Iss. 1–3, no. 5, pp. 41–47. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2011.03.008.
92. Ma X., Sun X., Chang M., Liu Q., Dong X., Fan Y., Chen R. Adsorption of different ionic types of polyacrylamide on montmorillonite surface: insight from QCM-D and molecular dynamic simulation. *Molecules*, 2023, vol. 28, pp. 4–17. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules28114417>.
93. Guancheng J. Polyethyleneimine as shale inhibitor in drilling fluid. *Applied Clay Science*, 2016, vol. 127–128, pp. 70–77. DOI: 10.1016/j.clay.2016.04.013.
94. Saleh T.A., Nur M.M. Synthesis of polyacrylic-melamine grafted graphene as efficient inhibitor for shale stabilization in water-based drilling fluid. *Materials Today Communications*, 2023, vol. 35, pp. 106–264. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.106264>.
95. Zhong H. Poly (oxypropylene)-amidoamine modified bentonite as potential shale inhibitor in water-based drilling fluids. *Applied Clay Science*, 2012, vol. 67–68, no. 10, pp. 36–43. DOI: 10.1016/j.clay.2012.06.002.
96. Arvind P. Designing for the future – a review of the design, development and testing of a novel. *Inhibitive Water-Based Drilling Fluid*, 2017, vol. 141, pp. 95–114. DOI: 10.1145/2843592.
97. Arruda S.C. Nanoparticles applied to plant science: a review. *Talanta*, 2015, vol. 131, no. 6, pp. 693–705. DOI: 10.1016/j.talanta.2014.08.050.
98. Aqeel U., Aftab T., Khan M.M.A., Naeem M., Khan M.N. A comprehensive review of impacts of diverse nanoparticles on growth, development and physiological adjustments in plants under changing environment. *Chemosphere*, 2022, vol. 291, pp. 132–672. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132672>.
99. Ghosh S.K., Pal T. Interparticle coupling effect on the surface plasmon resonance of gold nanoparticles: from theory to applications. *Chemical Reviews*, 2007, vol. 107, Iss. 11, no. 11, pp. 479–486. DOI: 10.1021/cr0680282.
100. Duan H., Wang T., Su Z., Pang H., Chen C. Recent progress and challenges in plasmonic nanomaterials. *Nanotechnology Reviews*, 2022, vol. 11, pp. 846–873. DOI: <https://doi.org/10.1515/ntrev-2022-0039>.

101. Khan Ib., Saeed K., Khan Id. Nanoparticles: properties, applications and toxicities. *Arabian Journal of Chemistry*, 2019, vol. 12, no. 7, pp. 908–931. DOI: 10.1016/j.arabjc.2017.05.011.
102. Jeevanandam J. Review on nanoparticles and nanostructured materials: history, sources, toxicity and regulations. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 2018, vol. 9, pp. 1050–1074. DOI: 10.3762/bjnano.9.98.
103. Buzea C., Pacheco I.I., Robbie K. Nanomaterials and nanoparticles: Sources and toxicity. *Journal of Biointerphases*, 2007, vol. 2, no. 4, pp. 17. DOI: 10.1116/1.2815690.
104. Vargas-Estrada L. Role of nanoparticles on microalgal cultivation. *Fuel*, 2020, vol. 280, no. 11, pp. 118. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.118598.
105. Zhang T. Investigation of nanoparticle adsorption during transport in porous media. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. New Orleans, Louisiana, USA, September 2013. Paper Number: SPE-166346-MS, pp. 1–20. DOI: 10.2118/166346-MS.
106. Xu Y. Supercritical CO₂-philic nanoparticles suitable for determining the viability of carbon sequestration in shale. *Environmental Science: Nano*, 2015, Iss. 3, pp. 288–296. DOI: 10.1039/C5EN00003C.
107. Liang S. Oil detachment by modified nanoparticles: a molecular dynamics simulation study. *Computational Materials Science*, 2019, vol. 170, pp. 109–177.
108. Abdolbaghi S., Pourmahdian S., Saadat Y. Preparation of poly(acrylamide)/nanoclay organic-inorganic hybrid nanoparticles with average size of 250 nm via inverse Pickering emulsion polymerization. *Colloid and Polymer Science*, 2014, vol. 292, no. 1, pp. 1091–1097. DOI: 10.1007/s00396-013-3158-8.
109. Wilczewska A.Z. Nanoparticles as drug delivery systems. *Pharmacological Reports*, 2012, vol. 64, no. 5, pp. 1020–1037. DOI: 10.1016/s1734-1140(12)70901-5
110. Rizvi S.A., Saleh A.M. Applications of nanoparticle systems in drug delivery technology. *Saudi Pharmaceutical Journal*, 2018, vol. 26, no. 1, pp. 64–70. DOI: 10.1016/j.jsps.2017.10.012.
111. Chandrakala V., Aruna V., Angajala G. Review on metal nanoparticles as nanocarriers: current challenges and perspectives in drug delivery systems. *Emergent Materials*, 2022, vol. 5, pp. 1593–1615. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42247-021-00335-x>.
112. Hossain M.K., Mukhaimer A.W. Nanoparticles-decorated silicon absorber: Absorption depth profile characteristics within absorbing layer. *Solar Energy*, 2020, vol. 204, no. 7, pp. 552–560. DOI: 10.1016/j.solener.2020.05.012
113. Pfeiffer T. Plasmonic nanoparticle films for solar cell applications fabricated by size-selective aerosol deposition. *Energy Procedia*, 2014, vol. 60, pp. 3–12. DOI: 10.1016/j.egypro.2014.12.335.
114. Olayiwola S.O., Dejam M. Synergistic interaction of nanoparticles with low salinity water and surfactant during alternating injection into sandstone reservoirs to improve oil recovery and reduce formation damage. *Journal of Molecular Liquids*, 2020, vol. 317, no. 11, pp. 114. DOI: 10.1016/j.molliq.2020.114228.
115. Zhao X. Formation damage mechanisms associated with drilling and completion fluids for deep water reservoirs. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, vol. 173, pp. 112–121. DOI: 10.1016/j.petrol.2018.09.098.
116. Ngata M.R., Yang B., Aminu M.D., Emmanuely B.L., Said A.A., Kalibwami D.C., Mwakipunda G.C., Ochilov E., Nyakilla E.E. Minireview of formation damage control through nanotechnology utilization at fieldwork conditions. *Energy & Fuels*, 2022, vol. 36, pp. 4174–4185. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.2c00210>.
117. Cheraghian G. A review on applications of nanotechnology in the enhanced oil recovery part A: effects of nanoparticles on interfacial tension. *International Nano Letters*, 2016, vol. 6, pp. 129–138. DOI: 10.1007/s40089-015-0173-4.
118. Aghajanzadeh M.R. Wettability modification of oil-wet carbonate reservoirs using silica-based nanofluid: An experimental approach. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, vol. 178, pp. 700–710. DOI: 10.1016/j.petrol.2019.03.059.
119. Pham H. Effect of silica nanoparticles on clay swelling and aqueous stability of nanoparticle dispersions. *Journal of Nanoparticle Research*, 2014, vol. 16, pp. 1–11. DOI: 10.1007/s11051-013-2137-9.
120. De Lara L.S., Rigo V.A., Miranda C.R. Controlling clay swelling–shrinkage with inorganic nanoparticles. *Journal of Physical Chemistry C*, 2017, vol. 121, Iss. 37, pp. 142–147. DOI: 10.1021/acs.jpcc.7b05130.
121. Rezaei A. Using surface modified clay nanoparticles to improve rheological behavior of Hydrolyzed Polyacrylamid solution for enhanced oil recovery with polymer flooding. *Journal of Molecular Liquids*, 2016, vol. 222, pp. 1148–1156. DOI: 10.1016/j.molliq.2016.08.004.
122. Bayat A.E. Experimental investigation of rheological and filtration properties of water-based drilling fluids in presence of various nanoparticles. *Colloids and Surfaces: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2018, vol. 555, pp. 256–263. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2018.07.001.
123. Paul S.C. Properties of cement-based composites using nanoparticles: a comprehensive review. *Construction and Building Materials*, 2018, vol. 189, pp. 1019–1034. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.09.062.
124. Kawashima S. Modification of cement-based materials with nanoparticles. *Cement and concrete composites*, 2013, vol. 36, no. 1, pp. 8–15. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2012.06.012.
125. Kleibert A. Structure, morphology, and magnetic properties of Fe nanoparticles deposited onto single-crystalline surfaces. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 2011, vol. 2, no. 1, pp. 47–56. DOI: 10.3762/bjnano.2.6.
126. Agarwal R. Effect of shape, size, and aspect ratio on nanoparticle penetration and distribution inside solid tissues using 3D spheroid models. *Advanced Healthcare Materials*, 2015, vol. 4, no. 15, pp. 2269–2280. DOI: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26376024/>
127. Kharlamov S.N., Mehran D., Filippov K.A. Mathematical modeling and methods of studying hydrodynamic cleaning of horizontal wells. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 332, no. 8, pp. 53–73. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2021/8/3305.
128. Kharlamov S.N., Janghorbani M. Numerical study of viscous-inertial laminar swirling flow in a round pipe with an eccentric round core. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 11, pp. 7–21. (In Russ.)

129. Kharlamov S.N., Janghorbani M., Zaikovsky V.V. Transport of cuttings by drilling fluid in horizontal wells. Part 1. Modeling the structure of dispersed flows. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 10, pp. 34–48. (In Russ.)
130. Kharlamov S.N., Janghorbani M., Bryksin M.R. Aspects of computer simulation of transport and cleaning processes from cuttings in horizontal well sections. *Mathematical Models and Computer Simulations*, 2023, vol. 15, Iss. 3, pp. 502–519.

Information about the authors

Sofyan Sameer Al-obaidi, Postgraduate Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; Al_obaidi@tpu.ru

Dasi Evan, Postgraduate Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; de01@tpu.ru

Sergey N. Kharlamov, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0007-4362-2511>

Received: 05.09.2024

Revised: 16.09.2024

Accepted: 19.09.2024

УДК 622.692.4.052-752

DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4729

Шифр специальности ВАК: 01.02.06

Негативное воздействие вибрации на технологические трубопроводы компрессорной станции с электроприводными газоперекачивающими агрегатами

А.С. Шредер, О.А. Курасов✉, П.В. Бурков, А.Н. Гаврилин, Д.В. Ермаков

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

✉Kurasov@tpu.ru

Аннотация. Актуальность. В газовой отрасли с каждым годом увеличивается количество оборудования, изживающего назначенный срок службы. В соответствии с законом «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» компрессорные станции, надежная работа которых во многом определяет состояние магистральных газопроводов, являются опасными объектами. Технологические трубопроводы компрессорной станции являются важными объектами данной системы. К ним предъявляются жесткие требования в связи с действием на них статических и динамических нагрузок. Надежность компрессорных станций опирается на результаты исследования состояния объекта и изучения основных факторов, влияющих на повышенный износ оборудования. Решением проблемы износа технологического оборудования является своевременный контроль оборудования, в частности измерение уровня и определение причин вибраций трубопроводной обвязки с помощью методов вибродиагностики, частотного и модального анализа. **Цель.** Изучение причин возникновения повышенных динамических нагрузок на технологическую обвязку, возникающих в процессе эксплуатации электро-газоперекачивающих агрегатов на компрессорной станции с помощью методов вибромониторинга. **Методы.** Методы вибромониторинга для анализа причин повышенных значений вибрации технологической обвязки компрессорной станции с электрогазоперекачивающим агрегатом. **Результаты и выводы.** Было произведено измерение вибрации в широкой полосе частот и дана оценка технологическому состоянию основного оборудования компрессорной станции с ЭГПА-6,3/8200-56/1,44-Р на основании нормативной документации СТО Газпром 2-2.3-324-2009. Были выделены основные частоты среднеквадратичного значения виброскорости, на которых наблюдались наибольшие значения вибрации, произведен модальный анализ с помощью программного обеспечения ANSYS. По результатам натуральных исследований и модального анализа сделан вывод о возникновении резонансных высокочастотных колебаний, кратных частоте вращения ротора.

Ключевые слова: технологический трубопровод, среднеквадратичные значения виброскорости, частотный спектр, газоперекачивающий агрегат, магнитный подшипник, лопаточные колебания, вибромониторинг, программное обеспечение

Для цитирования: Негативное воздействие вибрации на технологические трубопроводы компрессорной станции с электроприводными газоперекачивающими агрегатами / А.С. Шредер, О.А. Курасов, П.В. Бурков, А.Н. Гаврилин, Д.В. Ермаков // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 10. – С. 167–177. DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4729

UDC 622.691.4.052

DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4729

Negative impact of vibration on process pipelines of a compressor station with electrically driven gas pumping units

A.S. Schreder, O.A. Kurasov✉, P.V. Burkov, A.N. Gavrilin, D.V. Ermakov

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

✉kurasov@tpu.ru

Abstract. Relevance. In gas industry, the amount of equipment that has outlived its intended service life is increasing every year. In accordance with the law “On Industrial Safety of Hazardous Production Facilities,” compressor stations are dangerous objects, the reliable operation of which largely determines the condition of main gas pipelines. Technological pipelines of a compressor station are important objects of this system. They are subject to strict requirements due to the action of static and dynamic loads on them. Reliability of compressor stations is based on the results of a study of the condition of the object and the main factors affecting increased wear of equipment. The solution to wear problem is timely monitoring of equipment, in particular level measurement and determining the causes of pipeline vibrations using vibration diagnostics methods, and frequency and modal analysis methods. **Aim.** To study the causes of increased dynamic loads on the technological piping that arise during the operation of electric and gas pumping units at a compressor station using vibration monitoring methods. **Methods.** Vibration monitoring methods to analyze the causes of increased vibration values in the process piping of a compressor station with an electric gas pumping unit. **Results and conclusions.** The authors have measured vibration in a wide frequency band and assessed the technological condition of the main equipment of the compressor station with EGPA-6.3/8200-56/1.44-R based on the regulatory documentation STO Gazprom 2-2.3-324-2009. The main frequencies of the root-mean-square value of the vibration velocity, at which the highest vibration values were observed, were identified, and a modal analysis was performed using ANSYS software. Based on the results of natural studies and modal analysis, it was concluded about the occurrence of resonant high-frequency oscillations, multiple of the rotor rotation frequency.

Keywords: process pipeline, rms vibration velocity values, frequency spectrum, gas pumping unit, magnetic bearing, blade vibrations, vibration monitoring, software

For citation: Schreder A.S., Kurasov O.A., Burkov P.V., Gavrilin A.N., Ermakov D.V. Negative impact of vibration on process pipelines of a compressor station with electrically driven gas pumping units. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 10, pp. 167–177. DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4729

Введение

В условиях транспортировки газа на дальние расстояния одним из необходимых элементов является компрессорная станция (КС). На территории КС расположено технологически сложное и опасное оборудование, из-за чего возникает задача в обеспечении безопасной и надежной эксплуатации газотранспортной системы. Одним из важнейших элементов в системе КС являются технологические трубопроводы, к которым предъявляются особые требования по экологическому, технологическому и атомному надзору.

В настоящее время технологическое оборудование газотранспортной системы имеет ограниченный ресурс эксплуатации, и, хотя на смену устаревшим газоперекачивающим агрегатам (ГПА) и технологическим трубопроводам приходят новые, существуют проблемы с темпами технического «переворужения», которые в ближайшее время будут недостаточными. Проблема обеспечения надежности оборудования с околоресурсным и сверхресурсным сроком эксплуатации является актуальной. Во время реконструкции КС зачастую необходимо «переворужение» газоперекачивающего оборудования, а не трубопроводной обвязки (ТПО) [1]. В связи с этим стоит острая задача в необходимости поддержания эффективного и надежного состояния КС. Это достигается с помощью мониторинга и диагностики параметров ТПО, так как оценка надежности опирается на результаты наблюдений и фактических эксплуатационных показателей [2].

В процессе эксплуатации КС технологические трубопроводы подвергаются статическим и динамическим воздействиям, что может привести к отказу

оборудования по причине возникновения вибраций [3, 4]. Несовершенство методики определения эталонных уровней вибраций, дающих объективную информацию о напряжено-деформированном состоянии оборудования, не позволяет выявить точные причины и количественно оценить влияние динамических нагрузок, в отличие от статических. Использование большинства норм применимо только в первом приближении. Некоторые трубопроводы работают надежно при эффективных значениях виброскорости 45 мм/с и выше, в зависимости от конструкции трубопровода, местоположения сварочных соединений, арматуры и фасонных элементов, а в некоторых случаях при уровне виброскорости 12 мм/с установлены трещины трубопроводов, просадка опор или сварные соединения [5, 6].

Как показывает огромный опыт эксплуатации ТПО, КС как объект диагностирования является системой, на которую воздействуют переменные и постоянные нагрузки с распределенными параметрами, поэтому диагностическое обследование неспособно в полной мере определить причины изменения состояния только экспериментальными средствами, позволяющими получать диагностическую информацию в дискретных точках. Поэтому необходимым условием диагностирования таких систем является создание математических моделей и возмущений, позволяющих проводить унификацию технической диагностики по результатам измерений, для разработки рекомендаций или принятия мер по увеличению надежности эксплуатации [7]. Диагностика параметров ТПО и компьютерное моделирование позволяют добиться высокой точ-

ности в оценке технико-экономических показателей как на стадии строительства, так и на стадии эксплуатации технологического оборудования, когда необходимо понимание, какое явление вносит преобладающий эффект в возбуждение вибрации [8–10]. Так, основными источниками вибрации технологических трубопроводов в ходе эксплуатации принято считать:

- 1) турбулентность транспортируемого потока, сила которого зависит от режима течения и определяется числом Рейнольдса, и обычно большая часть энергии возбуждения сосредоточена на низких частотах (обычно ниже 100 Гц) [11];
- 2) механическое возбуждение от работающего оборудования или его опорной конструкции, передаваемое трубопроводу. Как правило, высокий уровень вибрации и сбои возникают только в том случае, если система трубопроводов имеет собственную частоту, кратную рабочей скорости машины. Поскольку этот тип оборудования имеет много гармоник скорости вращения с заметными энергетическими уровнями, которые могут возбуждать систему, проблема может возникнуть на многих порядках скорости движения. Чтобы гарантировать отсутствие связи, частота (частоты) возбуждения (включая гармоники) не должна находиться в пределах $\pm 20\%$ от собственных частот конструкции. В частности, опыт проведения работ по выяснению причин повышенной вибрации при эксплуатации ГПА показывает, что основными факторами, влияющими на вибрационное состояние, являются: выбор методов и последовательности балансировки роторов электродвигателей; соответствие профиля зубчатых втулок техническим условиям; диаметральные зазоры в зубчатых муфтах; правильность настройки положения ротора относительно статора в осевом направлении; жёсткость опорных конструкций [11–14];
- 3) пульсация потока, точно так же, как и пульсация конструкции, проявляет собственные частоты; жидкость в трубопроводных системах проявляет собственные акустические частоты. Это частоты, на которых устанавливаются паттерны стоячих волн в жидкости или газе. Собственные акустические частоты могут усиливать низкие уровни пульсаций давления в системе, вызывая их большие амплитуды, что может привести к чрезмерным силам тряски. В низкочастотном диапазоне (обычно менее 100 Гц) собственные акустические частоты зависят от длины трубы между акустическими окончаниями и параметров процесса (например, молекулярной массы, плотности и температуры). Примеры таких явлений и способы их оценки для разработки рекомендаций описаны в работах [15, 16];

- 4) высокочастотные акустические возбуждения в газовой системе, источниками которых могут являться устройства по снижению давления, такие как предохранительный клапан, регулирующий клапан или диафрагма. Устройство ограничения давления, часто с критическим падением давления, вызывает турбулентное перемешивание и ударные волны непосредственно после устройства, а также турбулентное перемешивание и ударные волны непосредственно после устройства, которые имеют тенденцию генерировать высокочастотную (500–2000 Гц) акустическую энергию, которая распространяется вниз по трубе в виде акустической волны с модами более высокого порядка. Это создает круговую вибрацию в стенке трубы без видимого движения трубы, что может привести к усталостным разрушениям при несимметричных несплошностях трубопроводов (соединения ответвлений, сварные опоры труб и т. д.), которые действуют как точки концентрации или интенсификации напряжений [12]. Примеры усталостных разрушений в промышленности приведены в [17–19];
- 5) высокочастотные пульсации давления, создаваемые при взаимодействии между лопастями рабочего колеса и неподвижными частями, такими как, например, направляющие лопатки диффузора. Частоты этих пульсаций зависят от скорости вращения и количества лопастей рабочего колеса и обычно превышают значения в 1 кГц [20, 21]. Моделирование газодинамики приведено в [22, 23];
- 6) возбуждение низкочастотных колебаний газа вблизи тупиковых ответвлений. Частым примером такого проявления являются места отключения коллекторов на КС. Резонанс наблюдается при совпадении собственной акустической частоты газа в тупике с частотой, генерируемой в тройнике тупика расходного трубопровода коллектора. Для их возникновения необходимо сочетание нескольких условий одновременно по геометрии трубопроводной обвязки и по скорости движения [24–27].

Постановка задачи, методы исследования

Постоянные изменения геодезического положения технологической обвязки КС связаны с ее расположением в болотистой местности, что приводит к повышенным вибрациям и образованию концентраторов напряжения, которые под действием циклических нагрузок могут вызывать усталостное разрушение. Поэтому важной задачей является проведение вибромониторинга для предупреждения потенциальных аварий. На исследуемой станции эксплуатируются электро-газоперекачивающие агрегаты ЭГПА-6,3/8200-56/1,44-Р.

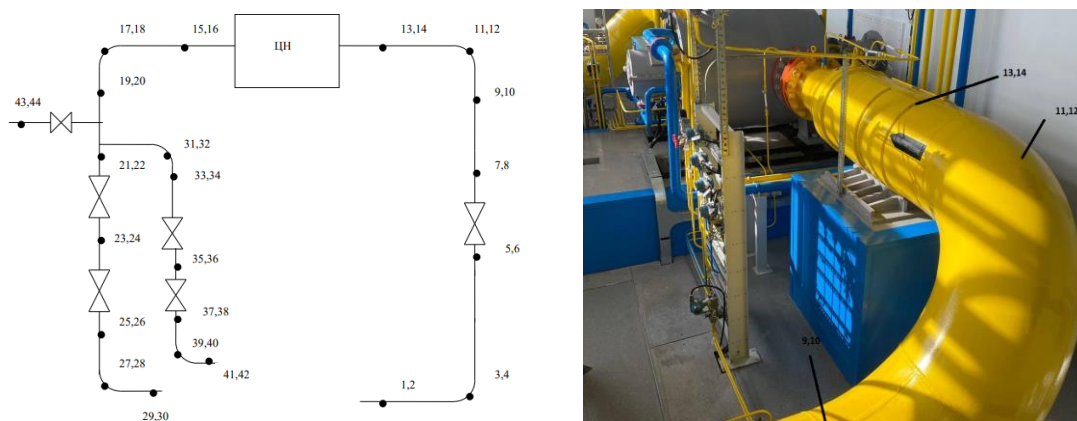


Рис. 1. Схема расположения точек измерения вибрации технологической обвязки

Fig. 1. Layout of process piping vibration measurement points

При проведении анализа причин высокой вибрации дополнительно были исследованы вибрации ТПО. Согласно [28], значения частот колебаний, при которых анализируется вибрация трубопроводов, разделены на низкочастотное (НЧ) и высоко-

частотное (ВЧ). Были проведены замеры средне-квадратичных значений (СКЗ) виброскорости в характерных точках ТПО (рис. 1) четырех агрегатов, в НЧ (рис. 2) и ВЧ (рис. 3) диапазонах.

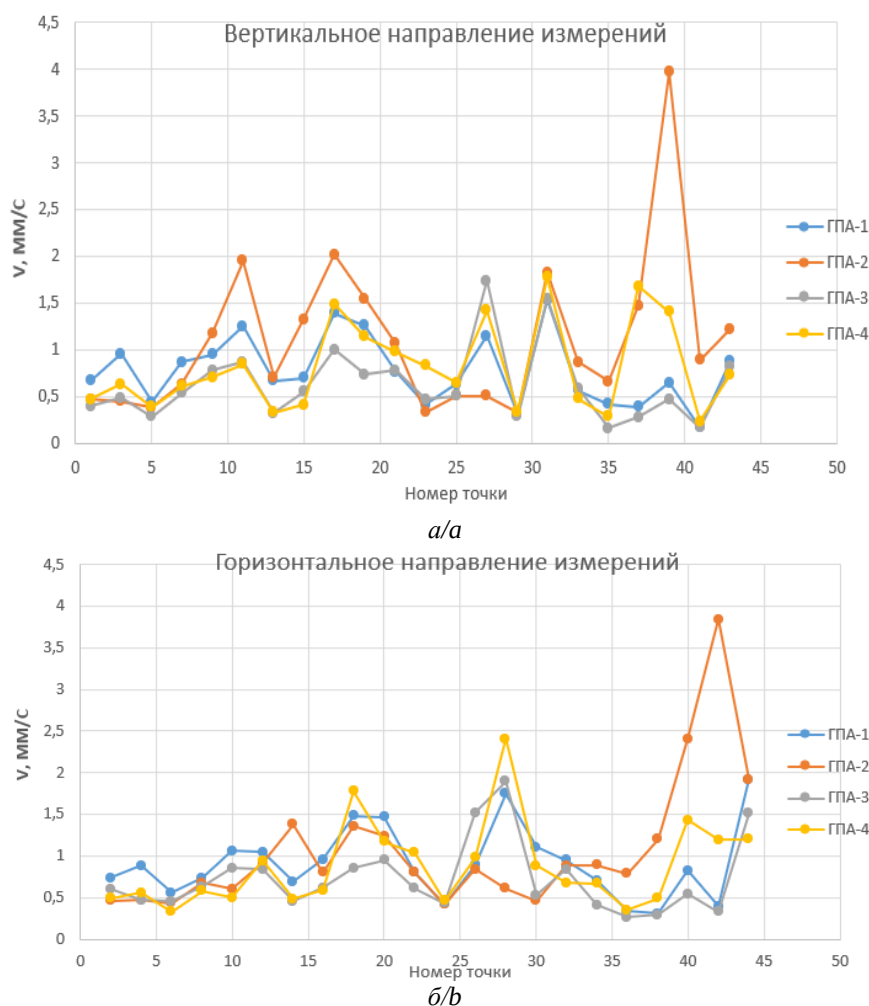


Рис. 2. Направление измерений в низкочастотном диапазоне: а) вертикальное; б) горизонтальное

Fig. 2. Direction of measurements in the low-frequency range: a) vertical; b) horizontal

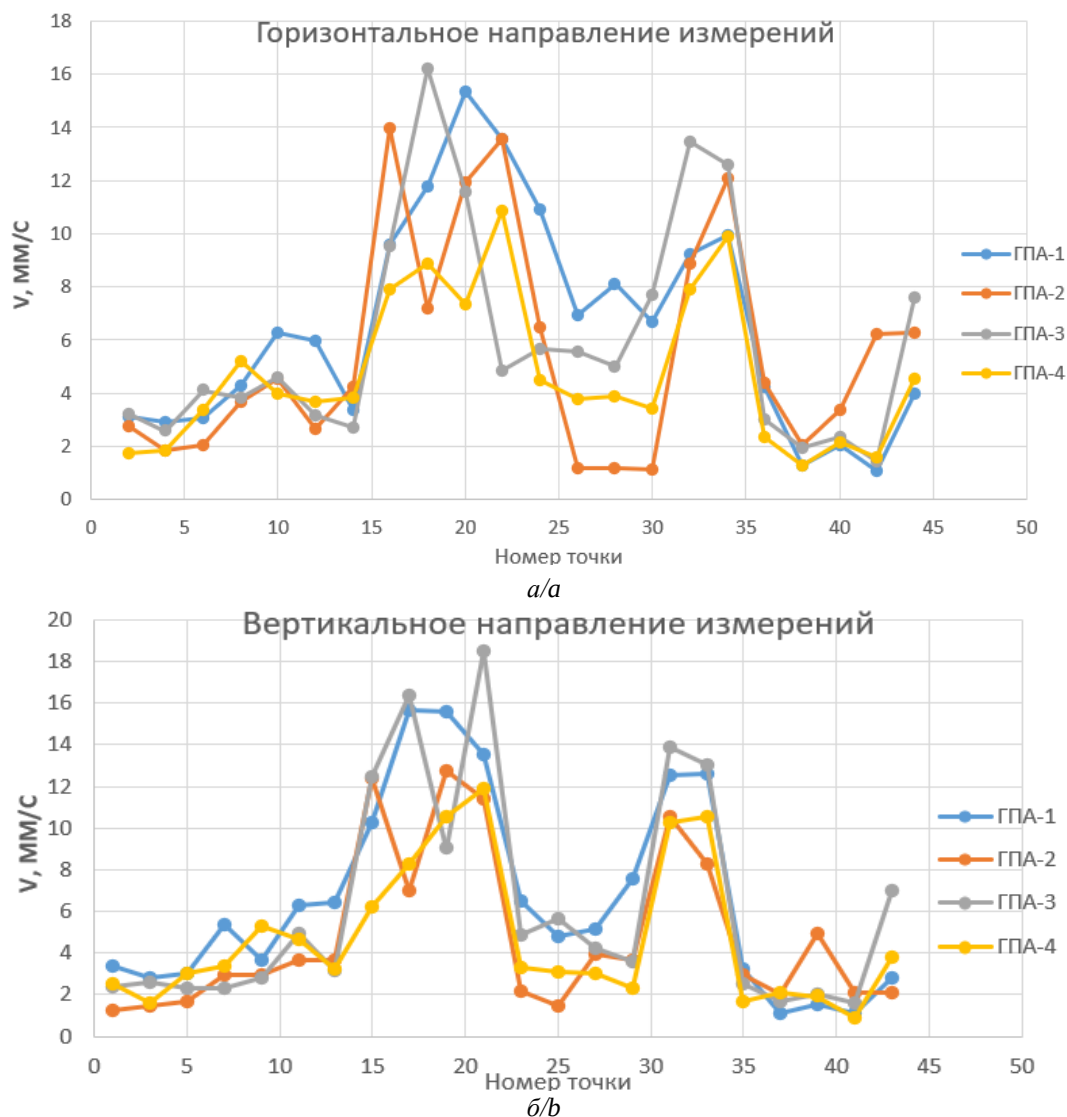


Рис. 3. Направление измерений в высокочастотном диапазоне: а) вертикальное; б) горизонтальное
Fig. 3. Direction of measurements in the high-frequency range: a) vertical; b) horizontal

Измерения были выполнены в двух взаимно перпендикулярных направлениях: горизонтальном (нечетные номера) и вертикальном (четные номера), при использовании виброметра SKF Microlog CMXA 70, датчик типа CMSS2200. В цеху расположены 4 ЭГПА. Во время проведения исследования два ЭГПА были в эксплуатации (1, 3), а второй и четвертый агрегат были запущены позже. Эксплуатационные режимы во время проведения замеров представлены в табл. 1.

На основании нормативной документации [25], используемой при эксплуатации ТПО профильными подразделениями, СКЗ виброскорости в НЧ- и ВЧ-диапазонах соответствуют допустимым значениям. Однако они являются относительно высокими и в силу изменения высотных отметок могут быть недостаточными для создания условий усталостных разрушений.

Таблица 1. Режимы эксплуатации

Table 1. Operating modes

Замеряемые характеристики Measured characteristics	ГПА-1 GPA-1	ГПА-2 GPA-2	ГПА-3 GPA-3	ГПА-4 GPA-4
Скорость вращения вала центробежного нагнетателя, об/мин Centrifugal blower shaft rotation speed, rpm	7835	5971	7840	5997
Давление газа на входе нагнетателя, МПа Gas pressure at the supercharger inlet, MPa	3,64	4,03	3,64	3,65
Давление газа на выходе нагнетателя, МПа Gas pressure at the supercharger outlet, MPa	4,7	4,59	4,69	4,97

Полученные результаты в НЧ-диапазоне (рис. 2) находятся в рамках допустимых значений. На линии рециркуляции ЭГПА 2 имеется небольшое

преувеличение СКЗ виброскорости по сравнению с другими линиями, но все они находятся также в допустимых пределах [28].

В ВЧ-диапазоне прослеживается закономерная зависимость СКЗ вибрации от режимов эксплуатации и расположения реперных точек. С увеличением частоты вращения нагнетателя и эксплуатационных параметров происходит увеличение СКЗ вибрации, а также резкое увеличение СКЗ виброскорости на линии нагнетания и линии рециркуляции.

Таблица 2. Спектральные составляющие среднеквадратичных значений виброскорости

Table 2. Spectral components of root-mean-square vibration velocity values

№ точки Point no.	Направление измерений Measurement direction	Спектральные составляющие (частота, Гц; среднеквадратичное значение виброскорости на частоте, мм/с) Spectral components (frequency, Hz; RMS vibration velocity at frequency, mm/s)			
		F1	V1	F2	V2
ГПА-1/GPA-1					
17	вертикальное vertical	609	1,82	1831	13,3
19		609	1,23	1831	13,7
31		56	0,99	1844	4,85
33		662	1,60	1844	3,38
ГПА-2/GPA-2					
15	вертикальное vertical	1397	8,98	–	–
16	горизонтальное horizontal	1397	10,32	–	–
19	вертикальное vertical	1400	8,01	–	–
20	горизонтальное horizontal	1397	5,79	–	–
21	вертикальное vertical	1397	6,07	–	–
22	горизонтальное horizontal	1397	6,75	–	–
34	горизонтальное horizontal	1397	7,79	–	–
ГПА-3/GPA-3					
17	вертикальное vertical	659	4,14	1866	7,33
18	горизонтальное horizontal	659	1,12	1866	6,74
20	горизонтальное horizontal	659	1,72	1866	2,88
21	вертикальное vertical	659	0,31	1866	9,02
22	горизонтальное horizontal	659	0,69	1866	5,88
31	вертикальное vertical	662	1,23	1866	6,15
32	горизонтальное horizontal	662	0,62	1866	4,26
33	вертикальное vertical	662	1,02	1866	7,25
34	горизонтальное horizontal	662	0,39	1866	6,66
ГПА-4/GPA-4					
21	вертикальное vertical	687	1,29	1397	7,02
22	горизонтальное horizontal	687	0,99	1397	4,58
33	вертикальное vertical	687	4,64	1397	2,85

Был проведен спектральный анализ вибрации и выделены спектральные составляющие максимальных значений вибрации в характерных точках для четырех агрегатов. В ходе диагностики были выставлены следующие параметры: диапазон 200–2500 Гц, число линий в спектре 800, разрешение по частоте 1,75 Гц, усреднений 10 (табл. 2).

При анализе полученных данных выявлено, что большинство характерных значений спектральных составляющих лежат на частотах, кратных числу лопаток (общее количество лопаток на роторе 14). Максимальные значения СКЗ виброскорости выделены в наивысших частотах, кратных четырнадцатой лопатке, за исключением нагнетателя ГПА-3 (окололопаточная частота)

$$F=n \cdot L \cdot F_n,$$

где $n=0,5; 1; 1,5; \dots$; L – число лопаток рабочего колеса центробежного нагнетателя; F_n – частота вращения вала.

Для определения собственной частоты колебаний системы хорошо подходит модальный анализ, который используется для расчета параметров вибрации конечно-элементной модели трубопроводной обвязки при воздействии внутренних и внешних нагрузок. ТПО четырех агрегатов были смоделированы в программном обеспечении ANSYS для определения собственных частот конструкции (рис. 4).

Модальный анализ показал, что частоты, полученные в ходе вибродиагностики, совпадают с собственной частотой ТПО. Такой процесс индирования вибрационных явлений в трубопроводе характерен для высокоскоростного потока с динамическим давлением газа в трубопроводе. Возмущаемые широкополосные пульсации давления потока обычно достигают 5000 Гц, вследствие этого возбуждаются резонансные колебания трубы с оболочечными формами колебаний и в результате этого могут возникать повреждения от высокочастотной усталости. Проблемой является то, что ТПО имеет большие геометрические размеры и большое количество собственных частот, совпадающих или кратных частоте вращения нагнетателя.

В ходе исследования наблюдалась важная особенность, связанная с проведением спектрального анализа вибрации на корпусах магнитных подшипников (МП) и магнитно-упорных подшипников (УМП). Были выявлены превалирующие пики вибрации на четырнадцатой лопаточной частоте на всех ЭГПА. Поэтому можно сделать вывод, что основной возмущающей силой является газодинамический поток. Это может быть связано с особенностью проточной части нагнетателя. Можно сделать вывод, что наибольшее «вредоносное» влияние эксплуатационным характеристикам несет высокочастотная пульсация, как в работе [20].

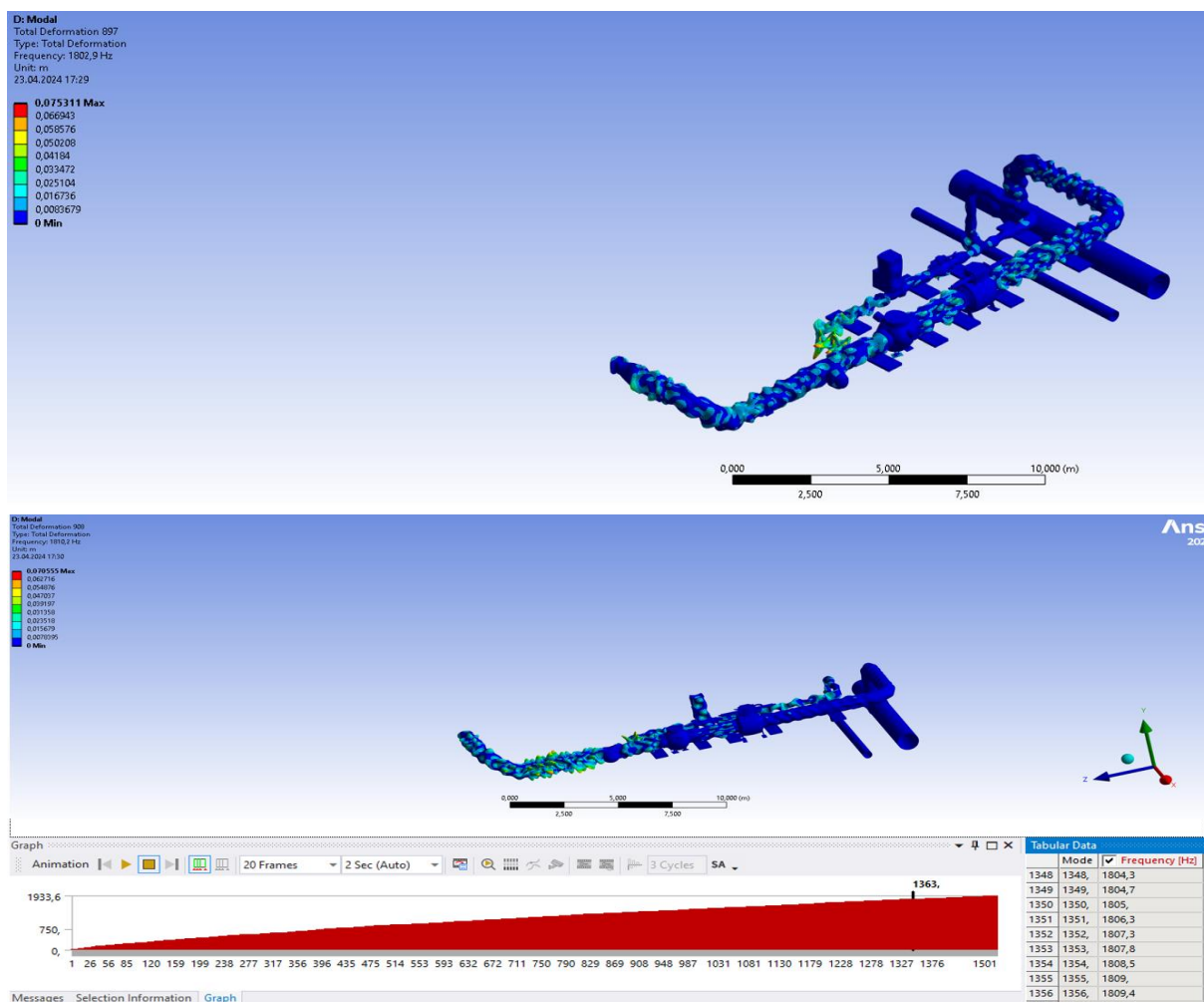


Рис. 4. Модальный анализ технологической обвязки

Fig. 4. Modal analysis of process piping

На рис. 5 приведен один из замеров: корпус УМП ЭГПА-1 и спектры вибрации корпуса УМП и МП.

По приведенным данным можно отметить, что основной причиной вибрации является пульсация потока. Необходимо проводить дополнительные исследования для разработки технических решений, направленных на борьбу с высокочастотной пульсацией. Это позволит в дальнейшем снизить амплитуду возмущающих колебаний на трубопроводную обвязку и корпуса МП, увеличивая ресурс технологического оборудования [28–31].

Заключение

В результате проведенного исследования трубопроводной обвязки при помощи вибромониторинга были получены результаты среднеквадратичной виброскорости в низкочастотном (от 4 до 200 Гц) и высокочастотном диапазонах (от 200 до 2500 Гц). Наибольшие значения среднеквадратичной виброскорости приходятся на высокочастотный диапазон,

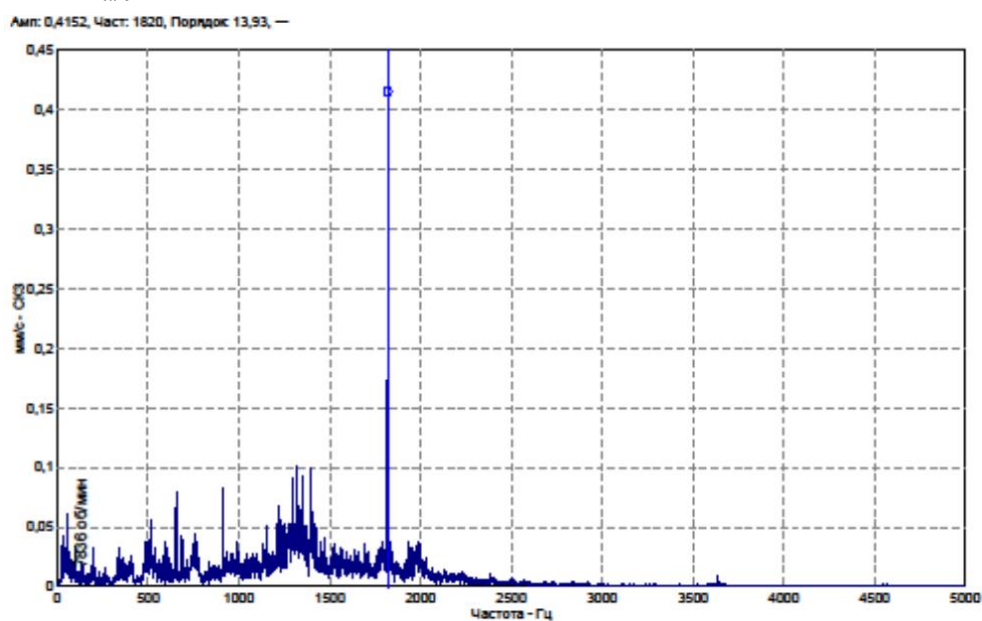
хотя результаты удовлетворительные. Согласно рабочей документации СТО Газпром 2-2.3-324-2009 гармонический анализ выявил образования высокочастотных колебаний, вызванные пульсацией давления. Газодинамические силы зависят от скорости вращения и количества лопастей. В большинстве полученных спектральных составляющих прослеживается частота, кратная общему количеству лопаток на роторе равному 14. Как показал модальный анализ, проведенный в программном обеспечении, данные частоты являются резонансными для трубопроводной обвязки. Спектры вибрации корпусов магнитного подшипника и упорного магнитного подшипника выявили максимальные значения среднеквадратичной виброскорости на тех же частотах, что и на трубопроводной обвязке, поэтому, вероятно, максимальный вклад в ухудшение эксплуатационных характеристик вносят газодинамические силы.



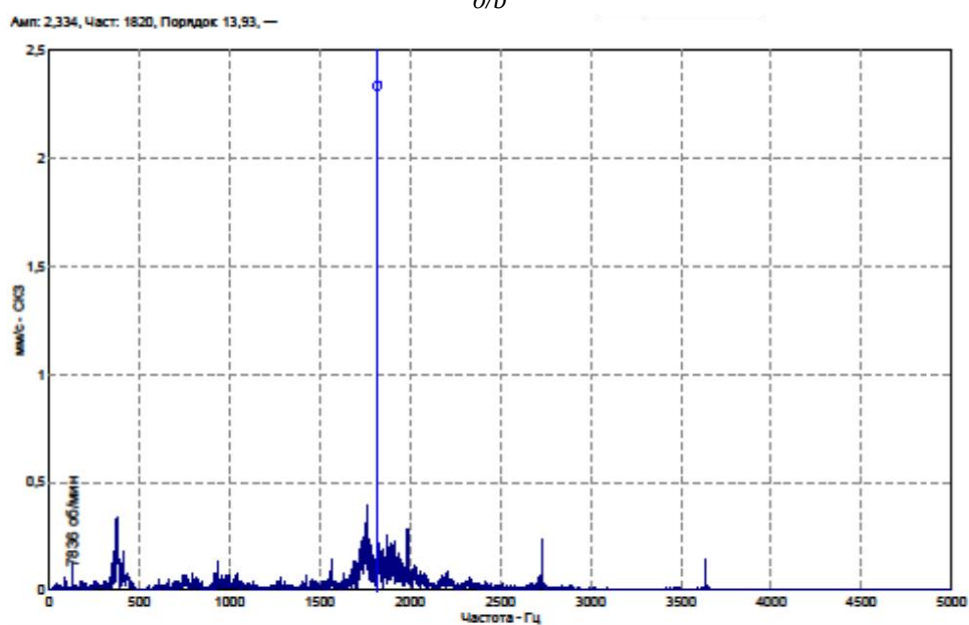
a/a

Рис. 5. а) корпус магнитно-упорного подшипника; б) спектр вибрации корпуса магнитного подшипника; в) спектр вибрации корпуса магнитно-упорного подшипника

Fig. 5. a) magnetic contact bearing housing; b) vibration spectrum of the magnetic bearing housing; c) vibration spectrum of the magnetic thrust bearing housing



b/b



v/c

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Саубанов О.М. Совершенствование удаленной диагностики газоперекачивающих агрегатов на базе штатного оборудования: дис. ... канд. наук. – Уфа, 2022. – 187 с.
2. Джваршеишвили А.Г. Надежность эксплуатации трубопроводов горных предприятий. – М.: Недра, 1983. – 192 с.
3. Фик А.С., Кунина П.С., Буякин А.В. Анализ повреждений технологических трубопроводов компрессорных станций // Современные проблемы науки и образования. – 2007. – № 4. – С. 23.
4. Improving the surface of titanium alloys with wave cutters / G. Korovin, A. Gavrilin, S. Petrushin, G. Odnokopylov, D. Ermakov // Recent Developments in the Field of Non-Destructive Testing, Safety and Materials Science ICMTNT 2021. Studies in Systems, Decision and Control // Eds. E. Lysenko, A. Rogachev, O. Starý. – 2023. – Vol. 433. DOI: 10.1007/978-3-030-99060-2_7.
5. Рамазанов Р.М. Диагностирование состояния трубопроводных обвязок компрессорных станций // Достижения науки и образования. – 2020. – № 2 (56). – С. 5–10.
6. Гридасова Е.А., Середа М.А., Шохрух Ш.З.У. Исследование влияния высокочастотного циклического нагружения на структуру и свойства сварных соединений технологических трубопроводов // Вестник МГСУ. – 2021. – Т. 16. – № 1. – С. 75–90.
7. Якубович В.А. Вибрационная диагностика трубопроводов компрессорных станций. – М.: Недра-Бизнесцентр, 2004. – 334 с.
8. Рудаченко А.В., Поварнищев С.В. Методика проведения конечно-элементного анализа строительства подземных сооружений // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2012. – № 3. – С. 398–402.
9. Идентификация параметров механической системы на примере вибрационного электромеханического преобразователя энергии / А.С. Глазырин, В.В. Тимошкин, С.В. Цурпал, Т.А. Глазырина // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 316. – № 4. – С. 174–177.
10. Оптимизация порядка редуцированной динамической модели ненагруженного нефтепогружного кабеля на основе аппроксимации амплитудно-частотной характеристики / А.С. Глазырин, Ю.Н. Исаев, С.Н. Кладиев, А.П. Леонов, И.В. Раков, С.В. Колесников, С.В. Ланграф, А.А. Филипас, В.А. Копырин, Р.Н. Хамитов, В.З. Ковалев // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 9 – С. 154–167. DOI: 10.18799/24131830/2021/9/3365.
11. Guidelines for the avoidance of vibration induced fatigue failure in process pipework. 2nd ed. – London: Energy Institute, 2008. – 226 p.
12. Ковалёв В.К. Причины вибрации газоперекачивающих агрегатов // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2014. – № 2. – С. 23–27.
13. Снижение виброактивности вентилятора системы жизнеобеспечения нефтегазовых станций / А.Н. Гаврилин, В.С. Дмитриев, Д.В. Ермаков, Д.А. Дерусова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 11. – С. 128–137. DOI: 10.18799/24131830/2023/11/4293.
14. Минимизация виброактивности малошумных вентиляторов / В.С. Дмитриев, Л.Я. Миньков, Т.Г. Костюченко, В.В. Дердященко, Д.С. Панфилов, Д.В. Ермаков // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2022. – № 76. – С. 101–117. DOI: 10.17223/19988621/76/8.
15. Shuangshuang Li, Zhang L., Kong C. Vibration failure analysis and countermeasures of the inlet pipelines at a gas Compressor Station // Shock and Vibration. – 2019. – Vol. 2019. – P. 6032962.
16. Vibration characteristics of pressure pipelines at pumping stations and optimized design for vibration attenuation / Y. Xu, Z. Liu, D. Zhou, J. Tian, X. Zhu // Water Supply. – 2022. – Vol. 22. – № 1. – P. 990–1003.
17. Cowling J. Acoustic and turbulence flow induced vibration in piping systems: a real problem for LNG facilities. – Houston, TX, USA: Perth Convention and Exhibition Centre, 2016. – 112 p.
18. Coulon A., Salanon R., Ancian L. Innovative numerical fatigue methodology for piping systems: qualifying Acoustic Induced Vibration in the Oil&Gas industry // Procedia engineering. – 2018. – Vol. 213. – P. 762–775.
19. Harper C.B. AIV and FIV in pipelines, plants, and facilities // International Pipeline Conference. – USA: American Society of Mechanical Engineers, 2016. – Vol. 50251. – P. V001T03A092.
20. High frequency acoustic excitation in centrifugal compressor and adjacent piping vibration / D. Hirata, Y. Nekomoto, F. Ibrahim, A. Nakaniwa, P. van Beek, L. Frediani // Proceedings of the 50th Turbomachinery Symposium. – Texas: Turbomachinery Laboratory, Texas A&M Engineering Experiment Station, 2021. – P. 12–23.
21. Бутусов Д.С. Исследование пульсации потока в технологических трубопроводах компрессорных станций магистральных газопроводов: дис. ... канд. техн. наук. – М., 2000. – 202 с.
22. Kalyulin S.L., Modorskii V.Y., Shmakov A.F. Numerical coupled 2FSI analysis of gas-dynamic and deformation processes in the discharger of the model compressor of a gas transmittal unit // AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing, 2018. – Vol. 2027. – № 1. – P. 1–6.
23. Galerkin Y., Reksin A., Soldatova K. Aerodynamic designing of supersonic centrifugal compressor stages // WASET Inter. J. of Mech., Aerospace, Industrial, Mech. and Manuf. Eng. – 2015. – Vol. 9. – № 1. – P. 123–127.
24. Устюжанин А.В., Свердлик Ю.М., Репин Д.Г. Применение акустического анализа для исследования возбудимости тупиковых ответвлений в обвязках компрессорных станций // Газовая промышленность. – 2018. – № 11 (777). – С. 42–49.
25. Khayrullina R., Valeev A. Assessment of the negative impact of low-frequency vibrations on technological pipelines of compressor stations // Liquid and Gaseous Energy Resources. – 2021. – Vol. 1. – № 1. – P. 21–29.
26. Бураншин А.Р., Годовский Д.А., Токарев А.П. Устранение тупиковой вибрации трубопроводной обвязки компрессорного цеха в условиях эксплуатации // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 9. – С. 164–171.

27. Пономаренко Ю.Б. О возбуждении низкочастотных колебаний газа в акустической системе «Коллектор–три тупика» // Вести газовой науки. – 2012. – № 2 (10). – С. 122–126.
28. СТО Газпром 2-2.3-324-2009 Диагностическое виброобследование технологических трубопроводов компрессорных цехов с центробежными нагнетателями. Нормы оценки и методы проведения работ. – М.: Газпром экспо, 2009. – 65 с.
29. Соколинский Л.И., Лопатин А.С., Пайдак В.Б. Обеспечение динамической устойчивости технологических трубопроводов дожимных компрессорных станций на основе результатов расширенных виброобследований и расчетов акустических колебаний // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. – 2020. – № 2. – С. 104–109.
30. Изучение напряженно-деформированного состояния трубопровода сложной формы под действием комплексной нагрузки методом конечных элементов с использованием программного обеспечения AUTODESK INVENTOR / П.В. Бурков, В.П. Бурков, П.О. Дедеев, В.Ю. Тимофеев // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2018. – № 4 (128). – С. 84–93.
31. Ermakov D., Dmitriev V. Solid state damper based on foam aluminum to reduce vibration activity of electromechanical devices // Recent Developments in the Field of Non-Destructive Testing, Safety and Materials Science. ICMTNT 2021. Studies in Systems, Decision and Control / Eds. E. Lysenko, A. Rogachev, O. Starý. – 2023. – Vol. 433. DOI: 10.1007/978-3-030-99060-2_8.

Сведения об авторах

Александр Сергеевич Шредер, аспирант отделения машиностроения Инженерной школы новых производственных технологий, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30; ass106@tpu.ru

Олег Александрович Курасов, аспирант отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30; kurasov@tpu.ru

Петр Владимирович Бурков, доктор технических наук, профессор отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30; burkovpv@tpu.ru

Алексей Николаевич Гаврилин, доктор технических наук, профессор отделения машиностроения Инженерной школы новых производственных технологий, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30; gawral@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9205-2283>

Дмитрий Владимирович Ермаков, кандидат технических наук, ассистент отделения машиностроения Инженерной школы новых производственных технологий, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30; dvermakov@tpu.ru

Поступила в редакцию: 07.06.2024

Поступила после рецензирования: 21.06.2024

Принята к публикации: 10.09.2024

REFERENCES

1. Saubanov O.M. *Improving remote diagnostics of gas pumping units based on standard equipment*. Cand. Diss. Moscow, 2022. 187 p. (In Russ.)
2. Dzhvarsheishvili A.G. *Reliability of operation of pipelines of mining enterprises*. Moscow, Nedra Publ., 1983. 192 p. (In Russ.)
3. Fik A.S., Kunina P.S., Bunyakina A.V. Analysis of damage to technological pipelines of compressor stations. *Modern problems of science and education*, 2007, no. 4, pp. 23. (In Russ.)
4. Korovin G., Gavrilin A., Petrushin S., Odnokopylov G., Ermakov D. Improving the surface of titanium alloys with wave cutters. *Recent Developments in the Field of Non-Destructive Testing, Safety and Materials Science. ICMTNT 2021. Studies in Systems, Decision and Control*. Eds. E. Lysenko, A. Rogachev, O. Starý. Cham, Springer, 2023. Vol. 433. DOI: 10.1007/978-3-030-99060-2_7.
5. Ramazanov R.M., Ramazanov M.I., Gubaidullin K.Z. Diagnosis of the condition of pipelines of compressor stations. *Achievements of science and education*, 2020, no. 2 (56), pp. 5–10. (In Russ.)
6. Gridasova E.A., Sereda M.A., Shokhrukh Sh.Z.U. Study of the influence of high-frequency cyclic loading on the structure and properties of welded joints of technological pipelines. *Bulletin of MGSU*, 2021, vol. 16, no. 1, pp. 75–90 (In Russ.)
7. Yakubovich V.A. *Vibration diagnostics of pipelines of compressor stations*. Moscow, Nedra-Business Center Publ., 2004. 334 p. (In Russ.)
8. Rudachenko A.V., Povarnitsyn S.V. Methodology for conducting finite element analysis of the construction of underground structures. *Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*, 2012, no. 3, pp. 398–402. (In Russ.)
9. Glazyrin A.S., Timoshkin V.V., Tsurpal S.V., Glazyrina T.A. Identification of parameters of a mechanical system by the example of a vibrating electromechanical energy converter. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2010, vol. 316, no. 4, pp. 174–177. (In Russ.)
10. Glazyrin A.S., Isaev Yu.N., Kladiev S.N., Leonov A.P., Rakov I.V., Kolesnikov S.V., Langraf S.V., Filipas A.A., Kopyrin V.A., Khamitov R.N., Kovalev V.Z. Optimization of the order of a reduced dynamic model of an unloaded oil-submersible cable based on the approximation of the amplitude-frequency response. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 9, pp. 154–167. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2021/9/3365.
11. *Guidelines for the avoidance of vibration induced fatigue failure in process pipework*. 2nd ed. London, Energy Institute, 2008. 226 p.

12. Kovalev V.K. Causes of vibration of gas pumping units. *Transport and storage of petroleum products and hydrocarbon raw materials*, 2014, no. 2, pp. 23–27. (In Russ.)
13. Gavrilin A.N., Dmitriev V.S., Ermakov D.V., Derusova D.A. Reduction of a fan vibration activity in a life support system of oil and gas stations. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 11, pp. 128–137. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2023/11/4293.
14. Dmitriev V.S., Minkov L.Ya., Kostyuchenko T.G., Derdiyashchenko V.V., Panfilov D.S., Ermakov D.V. Minimization of vibration activity of low-noise fans. *Bulletin of Tomsk State University. Mathematics and mechanics*, 2022, no. 76, pp. 101–117. (In Russ.) DOI: 10.17223/19988621/76/8.
15. Shuangshuang Li, Zhang L., Kong C. Vibration failure analysis and countermeasures of the inlet pipelines at a gas Compressor Station. *Shock and Vibration*, 2019, vol. 2019, pp. 6032962.
16. Xu Y., Liu Z., Zhou D., Tian J., Zhu X. Vibration characteristics of pressure pipelines at pumping stations and optimized design for vibration attenuation. *Water Supply*, 2022, vol. 22, no. 1, pp. 990–1003.
17. Cowling J. *Acoustic and turbulence flow induced vibration in piping systems: a real problem for LNG facilities*. Houston, TX, USA, Perth Convention and Exhibition Centre, 2016. 112 p.
18. Coulon A., Salanon R., Ancian L. Innovative numerical fatigue methodology for piping systems: qualifying Acoustic Induced Vibration in the Oil&Gas industry. *Procedia engineering*, 2018, vol. 213, pp. 762–775.
19. Harper C.B. AIV and FIV in pipelines, plants, and facilities. *International Pipeline Conference*. USA, American Society of Mechanical Engineers, 2016. Vol. 50251, pp. V001T03A092.
20. Hirata D., Nekomoto Y., Ibrahim F., Nakaniwa A., Van Beek P., Frediani L. High frequency acoustic excitation in centrifugal compressor and adjacent piping vibration. *Proceedings of the 50th Turbomachinery Symposium*. Texas, Turbomachinery Laboratory, Texas A&M Engineering Experiment Station, 2021. pp. 12–23.
21. Butusov D.S. *Study of flow pulsation in technological pipelines of compressor stations of main gas pipelines*. Cand. Sc. Moscow, 2000. 202 p. (In Russ.)
22. Kalyulin S.L., Modorskii V.Y., Shmakov A.F. Numerical coupled 2FSI analysis of gas-dynamic and deformation processes in the discharger of the model compressor of a gas transmittal unit. *AIP Conference Proceedings*. AIP Publishing, 2018. Vol. 2027, no. 1, pp. 1–6.
23. Galerkin Y., Rekstin A., Soldatova K. Aerodynamic designing of supersonic centrifugal compressor stages. *WASET Inter. J. of Mech., Aerospace, Industrial, Mech. and Manuf. Eng.*, 2015, vol. 9, no. 1, pp. 123–127.
24. Ustyuzhanin A.V., Sverdlik Yu.M., Repin D.G. Application of acoustic analysis to study the excitability of dead-end branches in the piping of compressor stations. *Gas Industry*, 2018, no. 11 (777), pp. 42–49. (In Russ.)
25. Khayrullina R., Valeev A. Assessment of the negative impact of low-frequency vibrations on technological pipelines of compressor stations. *Liquid and Gaseous Energy Resources*, 2021, vol. 1, no. 1, pp. 21–29.
26. Buranshin A.R., Godovsky D.A., Tokarev A.P. Elimination of dead-end vibration of the compressor shop piping under operating conditions. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assetss Engineering*, 2019, vol. 330, no. 9, pp. 164–171. (In Russ.)
27. Ponomarenko Yu.B. On the excitation of low-frequency gas oscillations in the acoustic system “Collector–three dead ends”. *Vesti gazovoy nauki*, 2012, no. 2 (10), pp. 122–126. (In Russ.)
28. *STO Gazprom 2-2.3-324-2009 Diagnostic vibration inspection of process pipelines of compressor shops with centrifugal blowers. Assessment standards and work methods*. Moscow, Gazprom Expo Publ., 2009. 65 p. (In Russ.)
29. Sokolinsky L.I., Lopatin A.S., Paidak V.B. Ensuring the dynamic stability of process pipelines of booster compressor stations based on the results of extended vibration surveys and calculations of acoustic vibrations. *Equipment and technologies for the oil and gas complex*, 2020, no. 2, pp. 104–109. (In Russ.)
30. Burkov P.V., Burkov V.P., Dedeev P.O., Timofeev V.Yu. Study of the stress-strain state of a pipeline of complex shape under the influence of a complex load using the finite element method using AUTODESK INVENTOR software. *Vestnik Kuzbass State Technical University*, 2018, no. 4 (128), pp. 84–93. (In Russ.)
31. Ermakov D., Dmitriev V. Solid state damper based on foam aluminum to reduce vibration activity of electromechanical devices. *Recent Developments in the Field of Non-Destructive Testing, Safety and Materials Science. ICMTNT 2021. Studies in Systems, Decision and Control*. Eds. E. Lysenko, A. Rogachev, O. Starý. 2023, vol. 433. DOI: 10.1007/978-3-030-99060-2_8.

Information about the authors

Alexander S. Schreder, Postgraduate Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; ass106@tpu.ru

Oleg A. Kurasov, Postgraduate Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; kurasov@tpu.ru

Petr V. Burkov, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; burkovpv@tpu.ru

Alexey N. Gavrilin, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; gawral@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9205-2283>

Dmitry V. Ermakov, Cand. Sc., Assistant, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; dvermakov@tpu.ru

Received: 07.06.2024

Revised: 21.06.2024

Accepted: 10.09.2024

УДК 622.271
DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4700
Шифр специальности ВАК: 2.8.8

Блоковый способ отработки карьерных полей как инструмент снижения воздействия на окружающую среду в условиях интенсификации производства

А.В. Селюков, А.В. Герасимов[✉]

Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, Россия, г. Кемерово

[✉]and-95.2010@mail.ru

Аннотация. Актуальность. Интенсификация открытых горных работ в угольных бассейнах Российской Федерации сопровождается ростом негативного воздействия на окружающую среду. Непосредственно в Кузбассе окружающая среда подвергается воздействию угольной промышленности, особенно при ведении открытых работ с применением углубочных систем разработки с внешним отвалообразованием, что сопровождается изъятием большого количества ненарушенных земель. Известный в горном деле блоковый способ отработки карьерных полей малочисленно реализован на действующих и проектируемых карьерных полях. Генеральной линией его применения является отсутствие единого подхода к проектированию параметров блоков, в том числе к эколого-экономической оценке воздействия данного технологического решения на окружающую среду. **Цель.** Снижение воздействия на окружающую среду горнодобывающими предприятиями при обоснованных параметрах блоков для разработки карьерных полей перспективных наклонных и крутопадающих угольных залежей. **Методы.** Системное обобщение фактического положения горных работ на разрезах при блоковом способе отработки карьерных полей, метод вариантов и технико-экономического моделирования с использованием электронных таблиц. **Результаты и выводы.** Предложены эколого-экономические критерии оценки применения блокового способа отработки карьерных полей, которые позволяют исследовать закономерности изменения экологических показателей. На примере разреза «Краснобродский» рассчитаны затраты по экологическим платежам за пользование земельными ресурсами, выбросы и пыление по двум вариантам, отличным от проектной документации. По результатам расчета доказана эффективность применения блокового порядка отработки перспективных угольных залежей, позволяющая снижать затраты за воздействие на окружающую среду на 22,5 и 63 %, соответственно, при изменении длин первоначального блока по дну с 2,2 до 1,4 км. Из чего следует, что совокупные эколого-экономические показатели позволяют в полной мере оценить целесообразность применения методики расчета параметров блоков, что в целом отражается в снижении затрат за негативное воздействие на окружающую среду.

Ключевые слова: карьерные поля, перспективные угольные залежи, блоковый способ, параметры, эколого-экономическая эффективность

Для цитирования: Селюков А.В., Герасимов А.В. Блоковый способ отработки карьерных полей как инструмент снижения воздействия на окружающую среду в условиях интенсификации производства // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 10. – С. 178–188. DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4700

UDC 622.271
DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4700

Block method of mining quarry fields as a tool to reduce environmental impact in conditions of intensification of production

A.V. Selyukov, A.V. Gerasimov[✉]

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russian Federation

[✉]and-95.2010@mail.ru

Abstract. Relevance. The intensification of open-pit mining in the coal basins of the Russian Federation is accompanied by an increase in negative impact on the environment. Directly in Kuzbass, the environment is exposed to the impact of the coal industry, especially when conducting open-pit mining using deep mining systems, with external dumping, which is accompanied by the withdrawal of a large amount of undisturbed land. The block method of mining quarry fields, well known in mining, has been rarely implemented in existing and planned quarry fields. The general line of its application is the lack of a unified approach to the design of block parameters, including environmental and economic assessment of the impact of this technological solution on the environment. **Aim.** Reduce environmental payments of mining enterprises with justified parameters of blocks for the development of quarry fields of promising inclined and steeply dipping coal deposits. **Methods.** Systematic generalization of the actual situation of mining operations in open-pit mines using the block method of mining quarry fields, the method of options and technical and economic modeling using spreadsheets. **Results and conclusions.** The authors have proposed the ecological and economic criteria for assessing the application of the block method of quarry field development. This allows us to study the patterns of change in environmental indicators. Using the example of the Krasnobrodskoe open-pit mine, the costs of environmental payments for the use of land resources, emissions and dusting are calculated for two options different from the design documentation. Based on the calculation results, the authors proved the efficiency of applying the block procedure for developing promising coal deposits, allowing us to reduce the costs for environmental impact by 22.5 and 63%, respectively, when changing the length of the initial block along the bottom from 2.2 to 1.4 km. From which it follows that the combined ecological and economic indicators allow us to fully assess the feasibility of applying the method for calculating block parameters, which is generally reflected in reduction in the costs for negative impact on the environment.

Keywords: quarry fields, promising coal deposits, block method, parameters, ecological and economic efficiency

For citation: Selyukov A.V., Gerasimov A.V. Block method of mining quarry fields as a tool to reduce environmental impact in conditions of intensification of production. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 10, pp. 178–188. DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4700

Введение

В 2020 г. Правительством Российской Федерации утверждена программа развития угольной промышленности России на период до 2035 г. [1]. Данная программа предусматривает два сценария развития угольной промышленности, непосредственно открытыми горными работами, в зависимости от уровня добычи к 2035 г.: консервативный – 390,0 млн т; оптимистический – 554,0 млн т. С учетом опубликованных данных [1] добыча по Кузбассу должна составить по вышеуказанным вариантам 48,4 и 44,5 % в общей добыче Российской Федерации, что соответствует уровню добычи открытым способом в 2035 г. по вариантам (рис. 1): консервативный – 188,0 млн т; оптимистический – 246,5 млн т.

На основании представленных на рис. 1 данных, с ростом годового объема добычи угля происходит увеличение отработки вскрышных пород, следовательно, для обеспечения установленных показателей при существующих системах открытой разработки необходимо будет изыскивать новые площади для развития фронта горных работ, строительства внешних отвалов, объектов инфраструктуры и т. п. Согласно данным, изложенным в проектной документации угольных разрезов, производственная мощность предприятий Кузбасса изменяется от 500 до 15000 тыс. т/год при среднем значении в 3600 тыс. т/год и среднем коэффициенте вскрыши в $11,9 \text{ м}^3/\text{т}$.

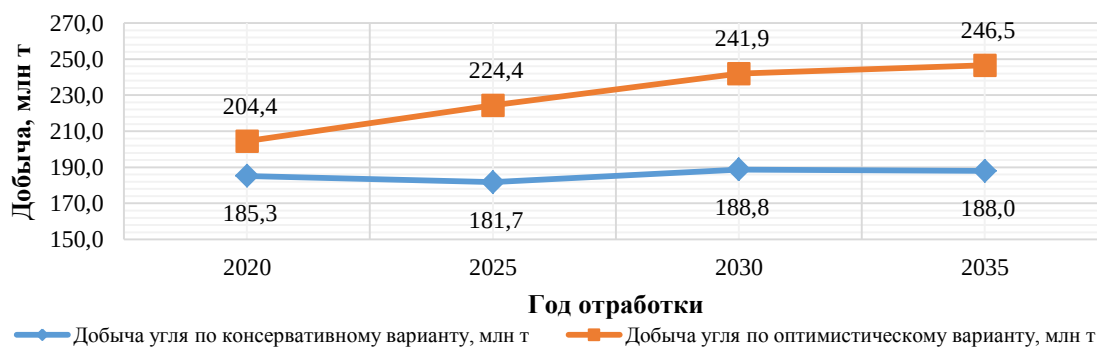


Рис. 1. Прогнозное изменение уровня добычи угля открытым способом по Кузбассу, согласно программе развития угольной промышленности России на период до 2035 г.

Fig. 1. Forecasted change in the level of open-pit coal mining in Kuzbass, according to the program for the development of the coal industry in Russia for the period up to 2035

Согласно исследованиям [2–4], внешние отвалы составляют порядка 67 %, внутренние – 33,0 %. При средневзвешенных объемах внешних отвалов и площадей, занимаемых этими отвалами, объем вскрыши, приходящийся на 1,0 м², составит 84,4 м³. По итогам прогноза, к концу 2035 г. минимальные площади земель, нарушенных внешними отвалами, составят 70,2 млн м².

В связи с этим необходимость разработки землесберегающих технологий отработки месторождений твердых полезных ископаемых является актуальной задачей для горнодобывающей промышленности и входит в перечень актуальных технологий Российской Федерации.

Объекты и методика исследования

Согласно анализу проектной документации по угольным разрезам Кемеровской области, порядок отработки оказывает основное влияние на изъятие земель под промышленное назначение. Подавляющее большинство угольных разрезов Кузбасса применяет углубочную продольную одно- или двухбуртовую систему разработки (по классификации, предложенной академиком В.В. Ржевским) [5]. При отработке наклонных и крутопадающих угольных залежей использование углубочных систем открытой разработки приводит к необходимости размещения пород вскрыши на внешних отвалах [4]. Как видно из графика на рис. 2, площади, занимаемые внешними отвалами, значительно превышают площади, занимаемые внутренними отвалами, а в некоторых случаях о внутренних отвалах речи и не идет. С учетом представленных данных доля площадей, занимаемых внутренним отвалом, составляет порядка 26,5 %.

Из представленного графика (рис. 2) следует, что наибольшая доля использования внешнего отвалообразования наблюдается на предприятиях, разрабатывающих Краснобродское, Соколовское, Талдинское и Нарыкское месторождения. В большей степени внутреннее отвалообразование используется на предприятиях Краснобродского и Соколовского месторождений.

Программа развития угольной промышленности и логистические возможности по реализации товарной продукции угольных предприятий предполагают увеличение проектных мощностей горнодобывающего сектора экономики. Объем внешних отвалов и площади изъятия земель под внешнее отвалообразование по годам представлены в табл. 1.

Объем пород, слагающих внешние отвалы, в среднем составляет порядка 66,9 %, внутренние – 33,1 %. Годовой объем вскрышных пород в размере 42766 тыс. м³ будет распределен как 28610,6 и 14155,6 тыс. м³ по внешним и внутренним отвалам соответственно. Внутренние отвалы по своей сущности располагаются в выработанном пространстве, изъятие земель под них не требуется, следовательно, наиболее негативное влияние с точки зрения изъятия земель будут иметь только внешние отвалы.

В настоящее время в проекты горных предприятий внедряется с целью сбережения ресурсов (рис. 3, б) блочный способ отработки карьерных полей, предложенный к.т.н. Б.Т. Рутковским [6] и предусматривающий некоторую долю внутреннего отвалообразования. Сущность способа заключается в предварительном разделении карьерного поля по длине на отдельные блоки, разрабатываемые последовательно (рис. 3, а).

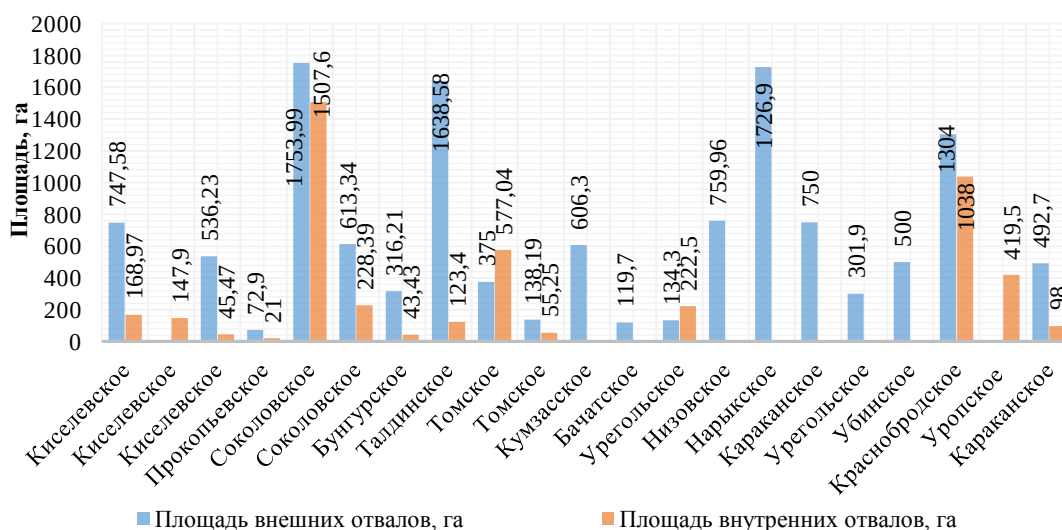


Рис. 2. Показатели соотношения площадей, занимаемых внешними и внутренними отвалами
 Fig. 2. Indicators of the ratio of the areas occupied by external and internal dumps

Таблица 1. Объемы размещаемых вскрышных пород и изъятие земель под внешнее отвалообразование

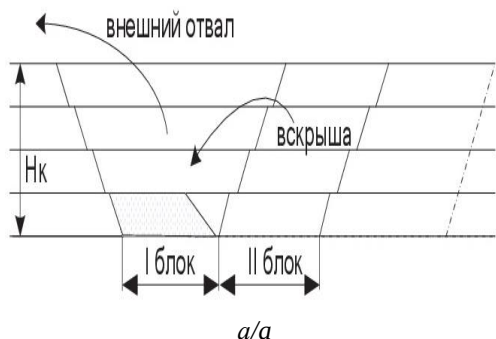
Table 1. Volumes of overburden and withdrawal of land for external dumping

Год Year	2020	2025	2030	2035	Итого Total
Объем внешних отвалов (консервативный вариант), млн м ³ Volume of external dumps (conservative option), million m ³	1966,4	1878,8	1878,8	1870,9	7594,9
Площадь изъятия земель под внешние отвалы, га Area of land acquisition for external dumps, ha	2328,5	2224,8	2224,8	2215,3	8993,4
Объем внешних отвалов (оптимистический вариант), млн м ³ Volume of external dumps (optimistic option), million m ³	2141,5	2260,9	2348,6	2364,5	9115,5
Площадь изымаемых земель под внешние отвалы, га Area of land acquisition for external dumps, ha	2535,9	2677,3	2781,0	2799,8	10794

Сперва обрабатывается первоначальный блок до конечной глубины с вывозкой породы на внешние отвалы. После его доработки до конечной глубины образуется емкость для формирования внутреннего отвала. Затем обрабатывается второй блок с размещением вскрышных пород второго блока в выработанном пространстве первоначального блока. Далее выработанное пространство второго блока заполняется вскрышей третьего и т. д. Основными недостатками данного способа являются отсутствие в

трудах ученых-горняков [7–19] системных рекомендаций определения параметров блоков.

Центры мировой угольной промышленности играют ключевую роль в экономике, они обеспечивают около 25 % всего производства энергии и являются основой для развития других отраслей, таких как металлургия, химическая промышленность и транспорт. Начиная с начала 2000-х гг. лидирующие позиции по добыче угля занимают такие страны, как Китайская Народная Республика, США, Индия, Австралия, Индонезия и др. Большая часть залежей представлена антрацитами, каменным и бурыми углями, в таких условиях предпочтение отдается технологиям, минимально нарушающим площади земной поверхности. Зарубежные угольные компании активно инвестируют в такие технологии, как добыча угля подземным способом, что позволяет снизить экологические риски и повысить эффективность добычи. В [20–24] отмечается, что угольные предприятия характеризуются высокой степенью автоматизации и экологической безопасности, и, следовательно, низким уровнем выбросов. Дополнительным фактором, способствующим долевному росту применения подземного способа за рубежом, является ликвидация предприятий с открытым способом добычи и горно-геологические условия разработки месторождений твердых полезных ископаемых, разработка угольных бассейнов в Российской Федерации, напротив, сопровождается разнообразными горно-техническими условиями, не имеющими аналогов в мире [25]. Следует сделать промежуточный вывод, что в иностранной практике открытой угледобычи блоковый способ не реализован к настоящему моменту времени.



а/а

10

Основные технологические решения по отработке пластов угля

2. Рассчитать, обосновать и отстроить оптимальный контур карьера;
3. Для оптимизации технико-экономических показателей, предусмотреть максимально возможное внутреннее отвалообразование, блочную систему отработки запасов;
4. Исключить или минимизировать увеличение санитарно-защитной зоны разреза;
5. Выполнить подсчет запасов (оценку ресурсов) в отстроенном оптимальном контуре карьера;
6. Отстроить технические границы отработки участка в границах лицензий;
7. Обосновать расчетами годовой уровень добычи, с учетом фактически достигнутого уровня добычи в границах лицензии КЕМ 11669 ТЭ за 2016 год 2,07 млн. тонн и максимального годового проектного уровня добычи в соответствии с действующим проектом 2,5 млн. тонн.

б/б

Рис. 3. а) общий вид блокового способа разработки (продольное сечение карьерного поля), где H_k – глубина карьера, м; б) фрагмент технического задания на разработку проектной документации с использованием блокового способа отработки

Fig. 3. а) general view of the block development method (longitudinal section of the quarry field), where H_k is the depth of the quarry, m; б) fragment of the technical specification for the development of project documentation using the block method of working out

Всестороннее изучение научных трудов [1–25] позволило установить, что нет единого методического подхода к определению параметров блоков, что обуславливается отсутствием взаимосвязи параметров разрабатываемого блока и выработанного пространства отработанного блока, при котором объем разрабатываемых пород невозможно разместить в выработанном пространстве предыдущего блока. Это обстоятельство определяет следующий недостаток: неравномерность размещения вскрышных пород отработываемого блока в выработанное пространство отработанного, что негативно сказывается на технико-экономических показателях разреза – увеличиваются объемы и площади под внешние отвалы. С целью устранения вышеуказанного недостатка разработан методический подход, взаимоувязывающий параметры блоков, дальность транспортирования вскрышных пород, вместимость отвалов. Данный методический подход апробирован в [26].

В настоящее время при разработке проектной документации все большее число угольных разрезов старается внедрять технологии отработки с использованием внутреннего отвалообразования. Так, угольные разрезы при разработке проектов на освоение участков недр все чаще делают акцент на ресурсосберегающих технологиях с использованием внутреннего отвалообразования. Например, при разработке проектной документации на отработку и утверждение запасов полезного ископаемого недропользователем в техническом задании указаны требования проектной документации с участием блокового способа разработки карьерного поля (рис. 3, б).

Как видно, во всех представленных случаях для разработки месторождений недропользователями внедряется ресурсосберегающая технология – блоковый способ. В связи с этим можно сделать промежуточный вывод, что недропользователи заинтересованы в рациональном освоении месторождения в части максимального использования внутреннего отвалообразования.

Результаты исследования и их обсуждение

Рассмотрим данную проблему на примере угольного разреза, ведущего разработку Киселевского каменноугольного месторождения. Настоящий угольный разрез ведет свою производственную деятельность с 1947 г. по углубочной продольной двухбортовой системе разработки с размещением вскрышных пород только на внешних отвалах. Данный участок ведет разработку угольных пластов крутонаклонного и крутого залегания. В настоящее время горные работы ведутся по углубочной продольной двухбортовой системе разработки с применением блокового способа разработки карьерного поля [27]. При этом решения по делению карьерного поля на блоки носят «условный» характер. Данная «условность» определяется тем,

что разделение карьерного поля на блоки производится не обоснованно и зачастую выражена каким-либо характерным объектом – например разведочными линиями (рис. 4). К сравнению предлагаются варианты параметров блоков [26, 27] на примере угольного разреза Киселевского каменноугольного месторождения: по проектной документации; при максимальных и минимальных параметрах блоков.

Методика расчета эколого-экономических показателей основана на нормативном документе «Отраслевая методика расчета количества отходящих, уловленных и выбрасываемых в атмосферу загрязняющих веществ при сжигании угля и технологических процессах горного производства на предприятиях угольной промышленности» [28] и включает в себя нижеприведенные критерии, за исключением землеемкости, так как в проектной документации отсутствует оценка землеемкости.

Минимальная землеемкость (3) является критерием оценки эффективности при обосновании параметров блоков:

$$Z=f(H_{16л}, V_{16л}, L_{16л}) \rightarrow \min. \quad (1)$$

Основываясь на исследованиях объемов вскрыши и площади, занимаемой отвалами (табл. 1) существующих угольных разрезов Кузбасса, разрабатывающих наклонные и крутопадающие залежи, выявлено, что площади изъятия земель изменяются в значительных пределах – от 39,5 до 16635,1 га. Учитывая полученные результаты размещения объемов вскрыши на площади, установлено значение среднего объема вскрыши, приходящегося на 1 м² площади, который составляет 84,4 м³. При этом за размещение вскрышных пород на внешнем отвале предприятию необходимо будет производить плату за воздействие на окружающую среду (экологические платежи).

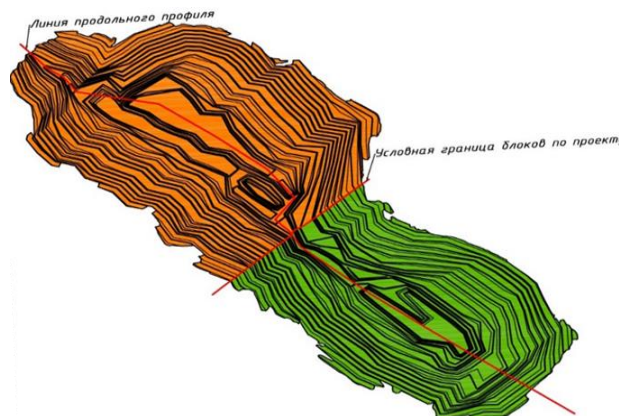


Рис. 4. Общий вид карьерного поля с делением на блоки при разработке перспективного участка Киселевского каменноугольного месторождения

Fig. 4. General view of the quarry field with division into blocks during the development of a promising section of the Kiselevsky coal deposit

Выбросы и пыление при отвалообразовании включают в себя сумму выбросов при выгрузке породы из транспортного средства, формирования породного отвала и при сдувании твердых частиц с пылящей поверхности и выбросы при сгорании топлива в двигателе работающей техники.

Основные исходные величины для расчета экологических платежей при отвалообразовании представлены в табл. 2. Основные исходные величины для расчета пыления и выбросов при отвалообразовании представлены в табл. 3, а исходные данные для расчета пыления и выбросов при транспортировании вскрыши по автомобильным дорогам приведены в табл. 4.

Таблица 2. Исходные величины для расчета экологических платежей

Table 2. Initial values for calculating environmental payments

Наименование показателей Indicator	Обозн. Designation	По проекту By project	L _{бл,дн} (км/км)	
			2,2	1,4
Объем горной массы, млн м ³ Rock mass volume, million m ³	V _{гм}	1799,9		
Объем вскрыши, приходящийся на 1 м ² площади, м ³ /м ² Volume of overburden per 1 m ² of area, m ³ /m ²	V _{вск} ^{1м3}	84,4		
Объем первоначального блока, млн м ³ Original block volume, million m ³	V _{гм} ^{1блок}	1025,9	1019,4	778,70
Объем вскрыши первоначального блока, млн м ³ Initial block overburden volume, million m ³	V _{вск} ^{1блок}	950,9	940,2	723,6
Объем вскрыши первоначального блока, млн т Initial block overburden volume, million tons		2092,1	2068,5	1591,9
Объем оставшейся вскрыши, млн м ³ Remaining overburden volume, million m ³	V _{вск}	591,2	601,9	818,6
Дальность транспортирования вскрыши из первоначального блока, км Distance of overburden transportation from the original block, km	L ^{1блок}	7,5	7,5	6,6

Таблица 3. Исходные величины для расчета пыления и выбросов при отвалообразовании

Table 3. Initial values for calculating dusting and emissions during dumping

Наименование показателей Indicators	Обозн. Designation	По проекту By project	L _{бл,дн} (км/км)	
			2,2	1,4
Общая площадь пылящей поверхности отвала, млн м ² Total area of dump dusty surface, million m ²	S ₀	11,3	11,1	8,6
Рабочая площадь поверхности действующего отвала, где производятся работы по его формированию, млн м ² Working surface area of the operating dump, where work on its formation is carried out, million m ²	S ₀₁	0,9	0,9	0,7
Площадь поверхности действующего отвала, прекращение подачи породы на которую не превышает трех месяцев, млн м ² Surface area of an operating dump, the cessation of rock supply to which does not exceed three months, million m ²	S ₀₂	1,9	1,8	1,4
Площадь поверхности действующего отвала, прекращение подачи породы на которую составляет три и более месяцев, млн м ² Surface area of an active dump, the supply of rock to which has been interrupted for three or more months, million m ²	S ₀₃	8,5	8,4	6,5
Суммарное чистое время работы бульдозеров j-й марки за период, тыс. ч Total net operating time of j-brand bulldozers for the period, thousand h	T _j	429,2	374,9	261
Мощность бульдозера, кВт/Bulldozer power, kW.	H _j	480		

Примечание: для упрощения расчета принята одна марка бульдозера при отвалообразовании.

Note: to simplify the calculation, one brand of bulldozer is used for dumping.

Таблица 4. Исходные величины для расчета пыления и выбросов при транспортировании вскрыши по автомобильным дорогам

Table 4. Initial values for calculating dust and emissions during overburden transportation by road

Наименование показателей Indicators	Обозн. Designation	По проекту By project	L _{бл,дн} (км/км)	
			2,2	1,4
Площадь поверхности транспортируемого материала транспортным средством j-й марки за один рейс, м ² Surface area of transported material by vehicle of the j-brand in one trip, m ²	S _j	44		
Средняя длительность движения транспорта с грузом за один рейс по территории предприятия, ч Average duration of movement of transport with cargo per a trip across the enterprise territory, hours	τ _j	429240	374908,9	261048
Длина временных дорог в пределах территории предприятия, км Length of temporary roads within the enterprise territory, km	L _{вп}	0,2	0,2	0,2
Длина стационарных дорог в пределах территории предприятия, км Length of stationary roads within the enterprise territory, km	L _{ст}	7,3	7,3	6,4

Таким образом, предлагается система критериев, включающих оценку землеемкости, экологические платежи за выбросы и пыление при транспортировании вскрышных пород автотранспортом и отвалообразовании.

В дальнейшем к сравнению предлагаются варианты: по проектной документации; при максимальных и минимальных параметрах блоков. По результатам расчета землеемкости разреза, с учетом среднего значения объема вскрышных пород, приходящихся на 1 га площади, по трем принятым вариантам выявлено явно выраженное снижение уровня изымаемых земель, что сопровождается снижением размера экологических платежей (рис. 5).

Уровень пыления и выбросов от работы оборудования при отвалообразовании от размеров блоков (рис. 6) также изменяются при уменьшении размеров блоков.

По результатам расчета плата за пыление и выбросы при транспортировании вскрыши по автомо-

бильным дорогам (рис. 7) изменяются аналогично уровню экологических платежей.

Пыление и выбросы при транспортировании вскрыши совокупно включают в себя следующее: количество пыли, сдуваемой с поверхности материала, транспортируемого самосвалами, т/год; количество пыли, образуемой на автодороге при движении транспортных средств, т/год; количество выбросов загрязняющих веществ, образующихся при сгорании топлива в дизельных двигателях карьерных самосвалов, т/год.

По итогам расчета каждого показателя строятся зависимости вышеуказанных загрязняющих веществ от размеров блоков (рис. 8). Как видно из представленного графика (рис. 8), тенденция изменения показателей по выбросам и пылению при транспортировании также снижается при уменьшении размеров блоков.

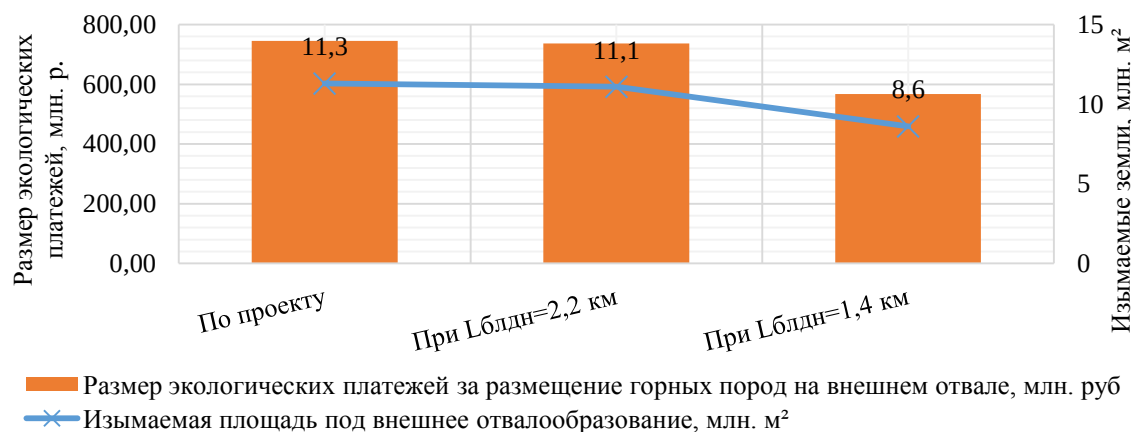


Рис. 5. График зависимости уровня изъятия земель под внешнее отвалообразование, совмещенное с уровнем экологических платежей, от размеров блоков

Fig. 5. Graph of the dependence of the level of land withdrawal for external dumping, combined with the level of environmental payments on the size of blocks

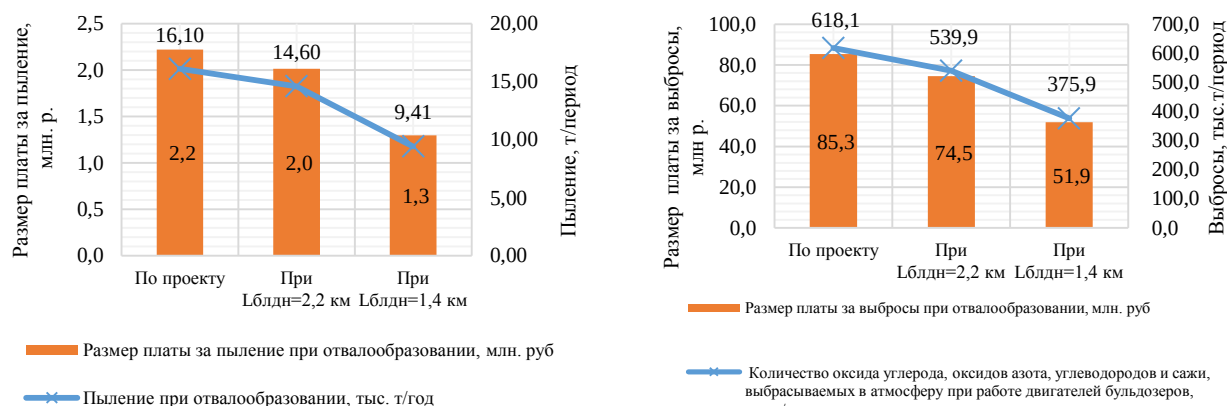


Рис. 6. График зависимости уровня пыления (а) и выбросов от работы оборудования (б) при отвалообразовании от размеров блоков

Fig. 6. Graph of the dependence of dusting level (a) and emissions from equipment operation (b) during dumping on the size of blocks

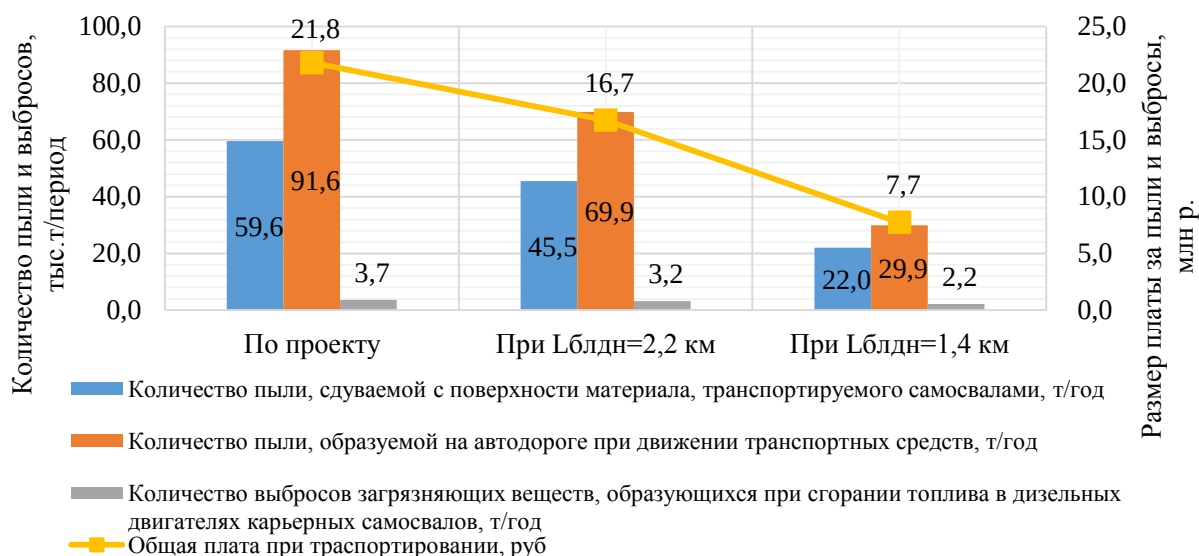


Рис. 7. График зависимости уровня пыления и выбросов от работы оборудования при транспортировании от размеров блоков

Fig. 7. Graph of the dependence of the level of dust and emissions from equipment operation during transportation on the size of the blocks

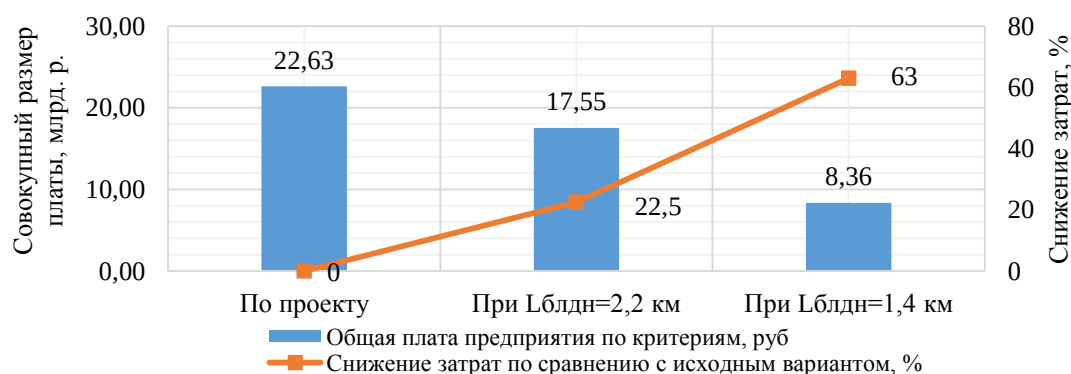


Рис. 8. График изменения совокупной платы за воздействие на окружающую среду и процента снижения затрат от размеров блоков

Fig. 8. Graph of the dependence of the total environmental impact fee and the percentage of cost reduction on the size of the blocks

Совокупно рассмотренные показатели позволяют сформировать полную картину снижения негативного воздействия на окружающую (рис. 8).

Заключение

Предложены эколого-экономические критерии оценки применения блочного способа обработки карьерных полей, которые позволяют исследовать закономерности изменения экологических показателей, таких как выбросы от работы двигателей автотранспортного оборудования и пыления с поверхности отвалов и горных выработок, а также оценить их с позиции экологических платежей горного предприятия.

Применительно к условиям разреза «Краснобродский» Киселевского каменноугольного месторождения рассчитаны затраты по экологическим

платежам за пользование земельными ресурсами, выбросы и пыление по трем вариантам: по проектной документации; при максимальных и минимальных параметрах первоначального блока. Установлено, что при изменении длины первоначального блока с 2,2 до 1,4 км, соответственно, происходит изменение уровня пыления и выбросов с 76,5 до 53,2 тыс. т/год, что составляет 30,5 %, и уменьшаются площади изъятия земель для размещения внешнего отвала с 11,1 до 8,6 млн м², снижение составило 23 %. Доказана эффективность применения блочного порядка обработки перспективных угольных залежей, позволяющая снижать затраты за воздействие на окружающую среду на 22,5 и 63 %, соответственно, при изменении длин первоначального блока с 2,2 до 1,4 км.

Как видно из представленных выше расчетов, совокупные эколого-экономические показатели позволяют в полной мере оценить целесообразность при-

менения методики расчета параметров блоков, что в целом отражается в снижении затрат на плату за негативное воздействие на окружающую среду.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Распоряжение Правительства РФ «Программа развития угольной промышленности России на период до 2035 года» от 13.06.2020 № 1582-р. // Официальный интернет-портал правовой информации. URL: http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&link_id=1&nd=102762578&intelsearch=% (дата обращения: 24.04.2024).
2. Селюков А.В. Оценка землеемкости угольных разрезов видоизменением системы открытой разработки // Известия Уральского государственного горного университета. – 2016. – № 3 (43). – С. 82–86. DOI: 10.21440/2307-2091-2016-3-82-86.
3. Селюков А.В. Обоснование и разработка ресурсосберегающих технологий открытой угледобычи на карьерных и отработанных шахтных полях: дис.... д-ра техн. наук. – Кемерово, 2019. – 308 с.
4. Рутковский Б.Т. Блочный способ отработки месторождений открытым способом // Добыча угля открытым способом. – Кемерово: Изд-во: КузПИ, 1972. – С. 81–87.
5. Федорин В.А., Татарина О.А. Цифровой метод в задачах доступа к георесурсам // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2022. – № 12-1. – С. 134–142. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_121_0_134.
6. Многокритериальный анализ стратегий устойчивого развития глубоких карьеров / К.В. Бурмистров, Н.А. Осинцев, А.Н. Рахмангулов, М.Э. Юсупов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 12. – С. 76–96. DOI: 10.18799/24131830/2023/12/4223.
7. Стратегии повышения эффективности комплексного освоения участка недр при открытой геотехнологии / В.Ю. Заляднов, К.В. Бурмистров, С.Е. Гавришев, Г.В. Михайлова // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2023. – № 4. – С. 400–412.
8. Каплунов Д.Р., Федотенко В.С. Устойчивое развитие горно-технических систем, как переход от добычи полезных ископаемых к освоению георесурсов и сохранению недр // Горный журнал. – 2021. – № 8. – С. 4–7. DOI: 10.17580/gzh.2021.08.01.
9. Супрун В.И., Ворошилин К.С. Оценка условий, предопределяющих использование панельной отработки рабочих бортов карьера // Рациональное освоение недр. – 2022. – № 3 (65). – С. 44–49. DOI: 10.26121/RON.2022.25.54.004.
10. Методика определения параметров техногенной емкости для условий крутопадающих месторождений полезных ископаемых / Т.С. Кравчук, И.А. Пыталев, Е.Е. Швабенланд, В.В. Якшина // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2021. – № 4. – С. 425–435. DOI: 10.46689/2218-5194-2021-4-1-425-435.
11. Обоснование системы разработки с внутренним отвалом при освоении крутопадающего месторождения Курасан / И.А. Пыталев, В.В. Якшина, А.А. Козловский, А.А. Полинов // Рациональное освоение недр. – 2022. – № 4 (66). – С. 34–38. DOI: 10.26121/RON.2022.78.94.005.
12. Ческидов В.И., Резник А.В. Особенности внутреннего отваломобразования вскрышных пород при открытой разработке месторождений полезных ископаемых // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2022. – № 2. – С. 61–68. DOI: 10.15372/FTPRPI20220206.
13. Zhironkin S., Cehlar M. Green economy and sustainable development: the outlook and suitable development // Energies. – 2022. – Vol. 1167. – P. 1–8. DOI: 10.3390/en15031167.
14. Zhironkin S., Szurgacz D. Mining technologies innovative development: industrial, environmental and economic perspectives // Energies. – 2022. – Vol. 15. – P. 1–9. DOI: 10.3390/en15051756.
15. Cai X., Zhu B., Zhang H. Can direct environmental regulation promote green technology innovation in heavily polluting industries? Evidence from Chinese listed companies // Science of the Total Environment. – 2020. – Vol. 746. – P. 2–18. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.140810.
16. Evaluating and predicting blast-induced ground vibration in open-cast mine using ANN: a case study in Vietnam / H. Nguyen, X.N. Bui, Q.H. Tran, T.Q. Le, N.H. Do, L.T.T. Hoa // Springer Nature Applied Sciences. – 2019. – P. 2–11. DOI: 10.1007/s42452-018-0136-2.
17. López Vinielles J., Fernández-Merodo J.A., Ezquerro P. Combining satellite in SAR, slope units and finite element modeling for stability analysis in mining waste disposal area // Remote Sens. – 2021. – P. 1–24. DOI: 10.20944/preprints202104.0696.v1.
18. Michieka N.M. Energy and the environment: the relationship between coal production and the environment in China // Natural Resources Research. – 2014. – P. 285–298. DOI: 10.1007/s11053-013-9223-7.
19. A coupling method for eco-geological environmental safety assessment in mining areas using PCA and catastrophe theory / X. Sun, H. Shao, X. Xiang, L. Yuan, Y. Zhou, W. Xian // Natural Resources Research. – 2020. – P. 4133–4148. DOI: 10.1007/s11053-020-09682-8.
20. Adams S., Nsiah C. Reducing carbon dioxide emissions; Does renewable energy matter? // Science of the Total Environment. – 2019. – Vol. 693. – P. 133288. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.07.094.
21. Retrieval of precise land surface temperature from ASTER night-time thermal infrared data by split window algorithm for improved coal fire detection in Jharia Coalfield, India / N. Singh, R.S. Chatterjee, Dh. Kumar, D.C. Paningrahi, R. Mujawdiya // Geocarto International. – 2020. – Vol. 37. – P. 926–943. DOI: 10.1080/10106049.2020.1753820.
22. Bedini E. Application of WorldView-3 imagery and ASTER TIR data to map alteration minerals associated with the Rodalquilar gold deposits, southeast Spain // Advances in Space Research. – 2019. – Vol. 63. – P. 3346–3357. DOI: 10.1016/j.asr.2019.01.047.
23. Способ открытой разработки месторождений полезных ископаемых: пат. № 2800752, Российская Федерация, С1; заявл. 27.12.2022; опубл. 27.07.2023, Бюл. № 21. – 13 с.

24. Проектная документация «Технико-экономическое обоснование постоянных разведочных кондиций для подсчета запасов каменного угля в границах лицензий ООО «Горнорудная компания Урала» КЕМ 01800 ТЭ на участке Краснобродский Глубокий и ОАО «УК «Кузбассразрезуголь» КЕМ 11669 ЕЭ Краснобродского каменноугольного месторождения. Кн. 1. – Кемерово, 2018. – 293 с.
25. Отраслевая методика расчета количества отходящих, уловленных и выбрасываемых в атмосферу загрязняющих веществ при сжигании угля и технологических процессах горного производства на предприятиях угольной промышленности. – Пермь, 2014. – 186 с.

Информация об авторах

Алексей Владимирович Селюков, доктор технических наук, профессор кафедры открытых горных работ, Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, Россия, 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28. sav.ormpi@kuzstu.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7827-822X>

Андрей Викторович Герасимов, аспирант кафедры открытых горных работ, Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, Россия, 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28. and-95.2010@mail.ru

Поступила в редакцию: 16.05.2024

Поступила после рецензирования: 17.06.2024

Принята к публикации: 19.09.2024

REFERENCES

1. Order of the Government of the Russian Federation «Program for the development of the Russian coal industry for the period until 2035» dated June 13, 2020 No. 1582-r. Official Internet portal of legal information. (In Russ.) Available at: http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&link_id=1&nd=102762578&intelsearch=% (accessed: 24 April 2024).
2. Selyukov A.V. Evaluation of ground capacity of coal mines by modification of opencast mining system. *News of the Ural State Mining University*, 2016, vol. 134, no. 3 (43), pp. 82–86. (In Russ.) DOI: 10.21440/2307-2091-2016-3-82-86.
3. Selyukov A.V. *Justification and development of resource-saving technologies for open-pit coal mining in open-pit and waste mine fields*. Dr. Diss. Kemerovo, 2019. 308 p. (In Russ.)
4. Rutkovsky B.T. Block method of open-pit mining of deposits. *Open-pit coal mining*. Kemerovo, KuzPI Publ. house, 1972. pp. 81–87. (In Russ.)
5. Fedorin V.A., Tatarinova O.A. Digital method in the problems of georesourser accessibility optimization. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*, 2022, vol. 166, no. 12-1, pp. 134–142. (In Russ.) DOI: 10.25018/0236_1493_2022_121_0_134.
6. Burmistrov K.V., Osintsev N.A., Rakhmangulov A.N., Yusupov M.E. Multi-criteria analysis of deep pits sustainable development strategy. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 233, no. 12, pp. 76–96. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2023/12/4223.
7. Zalyadnov V.Yu., Burmistrov K.V., Gavrishev S.E., Mihaylova G.V. Strategies for increasing the efficiency of integrated development of the open geotechnology subsoil site. *News of the Tula state university. Sciences of Earth*, 2023, vol. 771, no. 4, pp. 400–412. (In Russ.)
8. Kaplunov D.R., Fedotenko V.S. Sustainable development of mining and technical systems, as a transition from mining to the development of georesources and conservation of subsoil. *Mining Journal*, 2021 vol. 95, no. 8, pp. 4–7. (In Russ.) DOI: 10.17580/gzh.2021.08.01.
9. Suprun V.I., Voroshilin K.S. Assessment of conditions predetermining the use of panel mining of quarry working sides. *Rational development of subsoil*, 2022 vol. 75, no. 3 (65), pp. 44–49. (In Russ.) DOI: 10.26121/RON.2022.25.54.004.
10. Kravchuk T.S., Shvabenland E.E., Pytalev I.A., Yakshina V.V. The method of determining the parameters of the technogenic container for the conditions of steeply falling deposit of mineral. *News of the Tula state university. Sciences of Earth*, 2021, vol. 640, no. 4, pp. 425–435. (In Russ.) DOI: 10.46689/2218-5194-2021-4-1-425-435.
11. Pytalev I.A., Yakshina V.V., Kozlovsky A.A., Polinov A.A. Justification of a development system with internal dumping during the development of the steeply sloping Kurasan deposit. *Rational development of subsoil*, 2022, vol. 66, no. 4 (66), pp. 34–38. (In Russ.) DOI: 10.26121/RON.2022.78.94.005.
12. Cheskidov V.I., Reznik A.V. Specifics of internal overburden dumping in open pit mining. *Journal of mining science*, 2022 vol. 188, no. 2, pp. 61–68. (In Russ.) DOI: 10.15372/FTPRPI20220206.
13. Zhironkin S., Cehlar M. Green economy and sustainable development: the outlook and suitable development. *Energies*, 2022, vol. 1167, pp. 1–8. DOI: 10.3390/en15031167.
14. Zhironkin S., Szurgacz D. Mining technologies innovative development: industrial, environmental and economic perspectives. *Energies*, 2022, vol. 15, pp. 1–9. DOI: 10.3390/en15051756.
15. Cai X., Zhu B., Zhang H. Can direct environmental regulation promote green technology innovation in heavily polluting industries? Evidence from Chinese listed companies. *Science of the Total Environment*, 2020, vol. 746, pp. 2–18. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.140810.
16. Nguyen H., Bui X.N., Tran Q.H., Le T.Q., Do N.H., Hoa L.T.T. Evaluating and predicting blast-induced ground vibration in open-cast mine using ANN: a case study in Vietnam. *Springer Nature Applied Sciences*, 2019, pp. 2–11. DOI: 10.1007/s42452-018-0136-2.
17. López Vinielles J., Fernández-Merodo J.A., Ezquerro P. Combining satellite in SAR, slope units and finite element modeling for stability analysis in mining waste disposal area. *Remote Sens*, 2021, pp. 1–24. DOI: 10.20944/preprints202104.0696.v1.

18. Michieka N.M. Energy and the environment: the relationship between coal production and the environment in China. *Natural Resources Research*, 2014, pp. 285–298. DOI: 10.1007/s11053-013-9223-7.
19. Sun X., Shao H., Xiang X., Yuan L., Zhou Y., Xian W. A coupling method for eco-geological environmental safety assessment in mining areas using PCA and catastrophe theory. *Natural Resources Research*, 2020, pp. 4133–4148. DOI: 10.1007/s11053-020-09682-8.
20. Adams S., Nsiah C. Reducing carbon dioxide emissions; Does renewable energy matter? *Science of the Total Environment*, 2019, vol. 693, pp. 133288. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.07.094.
21. Singh N., Chatterjee R.S., Kumar Dh., Paningrahi D.C., Mujawdiya R. Retrieval of precise land surface temperature from ASTER night-time thermal infrared data by split window algorithm for improved coal fire detection in Jharia Coalfield, India. *Geocarto International*, 2020, vol. 37, pp. 926 – 943. DOI: 10.1080/10106049.2020.1753820.
22. Bedini E. Application of WorldView-3 imagery and ASTER TIR data to map alteration minerals associated with the Rodalquilar gold deposits, southeast Spain. *Advances in Space Research*, 2019, vol. 63, pp. 3346–3357. DOI: 10.1016/j.asr.2019.01.047.
23. Gerasimov A.V., Selyukov A.V. *Method of open-pit mining of mineral deposits*. Patent RF, no. 2800752, 2023. (In Russ.)
24. *Project documentation «Feasibility study of permanent exploration conditions for calculating coal reserves within the boundaries of the licenses of LLC Mining Company of the Urals KEM 01800TE at the Krasnobrodsky Gluboky site and OJSC Management Company Kuzbassrazrezugol» KEM 11669 EE of the Krasnobrodsky coal deposit. Book 1*. Kemerovo, 2018. 293 p. (In Russ.)
25. *Industry methodology for calculating the amount of waste pollutants captured and released into the atmosphere during coal combustion and mining processes at coal industry enterprises*. Perm, 2014. 186 p. (In Russ.)

Information about the author

Alexey V. Selyukov, Dr. Sc., Professor, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28, Vesennya street, Kemerovo, 650000, Russian Federation. sav.ormpi@kuzstu.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7827-822X>

Andrey V. Gerasimov, Postgraduate Student, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28, Vesennya street, Kemerovo, 650000, Russian Federation. and-95.2010@mail.ru

Received: 16.05.2024

Revised: 17.06.2024

Accepted: 19.09.2024

УДК 556.531.4:550.84.094

DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4799

Шифр специальностей ВАК: 1.6.4, 1.6.6, 1.6.21

Определение геохимической устойчивости болотных экосистем таежной зоны Западной Сибири к антропогенному влиянию

О.Г. Савичев[✉], Е.Ю. Пасечник

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

[✉]OSavichev@mail.ru

Аннотация. *Актуальность* определяется необходимостью научно обоснованного нормирования воздействий на болотные экосистемы с учетом их специфики и геохимической устойчивости. *Цель:* определение геохимической устойчивости болот таежной зоны Западной Сибири к поступлению загрязняющих веществ для двух характерных случаев, связанных: 1) с эксплуатацией шламовых амбаров; 2) сбросом хозяйственно-бытовых и производственных сточных вод. *Методы:* методы математического моделирования, статистические методы. *Результаты и выводы.* Выполнен анализ результатов исследований химического состава болотных вод и вытяжек из торфов и минеральных грунтов болот таежной зоны Западной Сибири (преимущественно, на территории Томского района, а также прилегающих территориях Ханты-Мансийского автономного округа, Новосибирской и Омской областей). Получены оценки средних значений геохимических показателей болотных вод и торфов по глубине торфяной залежи в торфяных болотах с разной степенью антропогенного воздействия. Предложена методика оценки антропогенного влияния на болота сброса сточных вод и геомиграции на участках размещения объектов нефтегазового комплекса (допустимые концентрации в сточных водах, поступающих в болотные экосистемы) с учетом «геохимического фона» и сорбционной способности торфов. В том числе обоснован и апробирован способ оценки значений допустимых концентраций, которые следует рассматривать как «относительно безопасный» уровень воздействия на болотные экосистемы, при котором не ожидается вторичного загрязнения болотных вод. Показано, что антропогенные изменения в основном ограничены по вертикали верхним слоем торфяной залежи до 1–2 м, а по горизонтали (в пределах деятельного горизонта торфяной залежи) – участками до 100–200 м.

Ключевые слова: геохимическое состояние, влияние сточных вод, допустимое антропогенное воздействие, болотные воды, Западная Сибирь, таежная зона

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта РФФИ (проект № 23-27-00039).

Для цитирования: Савичев О.Г., Пасечник Е.Ю. Определение геохимической устойчивости болотных экосистем таежной зоны Западной Сибири к антропогенному влиянию // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 10. – С. 189–202. DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4799

UDC 556.531.4:550.84.094

DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4799

Determination of geochemical stability of swamp ecosystems of the taiga zone of Western Siberia to anthropogenic impact

O.G. Savichev[✉], E.Yu. Pasechnik

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

[✉]OSavichev@mail.ru

Abstract. Relevance. The need for scientifically based regulation of impacts on wetland ecosystems taking into account their specificity and geochemical stability. **Aim.** To determine the geochemical stability of wetlands in the taiga zone of Western Siberia to pollutants for two typical cases associated with: 1) operation of sludge pits; 2) discharge of domestic and industrial

wastewater. **Methods.** Mathematical modeling, statistical methods. **Results and conclusions.** The authors have carried out the analysis of the results of studies of the chemical composition of wetland waters and extracts from peat and mineral soils of wetlands in the taiga zone of Western Siberia (mainly in the Tomsk region, as well as in the adjacent territories of the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug, Novosibirsk and Omsk regions). They obtained the estimates of the average values of geochemical indicators of wetland waters and peat by the depth of the peat deposit in peat bogs with varying degrees of anthropogenic impact. The paper introduces the method for assessing the anthropogenic impact of wastewater discharge and geomigration on swamps in areas where oil and gas facilities are located (permissible concentrations in wastewater entering swamp ecosystems), taking into account the «geochemical background» and sorption capacity of peat. In particular, the authors substantiated and tested the method for assessing the values of permissible concentrations, which should be considered as a «relatively safe» level of impact on swamp ecosystems, at which secondary pollution of swamp waters is not expected. It is shown that anthropogenic changes are mainly limited vertically by the upper layer of the peat deposit up to 1–2 m, and horizontally (within the active horizon of the peat deposit) – by areas up to 100–200 m.

Keywords: geochemical state, wastewater impact, permissible anthropogenic impact, swamp waters, Western Siberia, taiga zone

Acknowledgements: The research was carried out using the RSF grant (project no. 23-27-00039).

For citation: Savichev O.G., Pasechnik E.Yu. Determination of geochemical stability of swamp ecosystems of the taiga zone of Western Siberia to anthropogenic impact. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 10, pp. 189–202. DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4799

Введение

В Российской Федерации на сильно заболоченных территориях Западной Сибири сосредоточена значительная часть запасов нефти и газа. Торфяные болота, под которыми, согласно [1, 2], понимаются природные образования в виде насыщенных водой и покрытых специфической растительностью отложений торфа [1–4] толщиной 0,3 м и более в неосушенном состоянии, занимают 20–40 % водосборов многих крупных притоков р. Оби [3–9]. В процессе добычи и транспортировки нефти и газа возможны ситуации, связанные с загрязнением болотных экосистем, в частности, при: 1) плановом размещении объектов обустройства месторождений, например, шламовых амбаров; 2) при плановом и аварийном сбросах сточных (очищенных и неочищенных) вод; 3) атмосферном загрязнении в результате плановых и аварийных выбросов; 4) чрезвычайных ситуациях при строительстве и эксплуатации разведочных и эксплуатационных скважин, промысловых и магистральных трубопроводов и иных объектов [10–22]. Негативные воздействия также могут быть связаны с деятельностью жилищно-коммунального хозяйства населенных пунктов и иных предприятий, а также с рядом других причин [15, 23–26]. Все это обуславливает необходимость более тщательного обоснования различных видов хозяйственной деятельности [27–29], что и определило цель рассматриваемого исследования – оценку геохимической устойчивости болот таежной зоны Западной Сибири к поступлению загрязняющих веществ для двух характерных случаев, связанных: 1) с эксплуатацией шламовых амбаров; 2) сбросом сточных вод.

Для достижения этой цели были рассмотрены следующие задачи: 1) оценка средних значений геохимических показателей болотных и сточных

вод в южно- и среднетаежной подзонах Западной Сибири (преимущественно, в пределах Томского района); 2) построение математических моделей распространения загрязняющих веществ с учетом описания основных процессов и максимальной совместимости с существующими системой экологического мониторинга и методологией нормирования сбросов [30]; 3) оценка условий распространения характерных загрязняющих веществ (Na^+ и Cl^-) на примере типовых для таежной зоны Западной Сибири объектах. В последнем случае выбор именно Na^+ и Cl^- обусловлен их распространенностью в сточных водах (подземные воды с высоким содержанием указанных элементов используются при поддержании пластового давления; в хозяйственно-бытовых стоках их содержание также повышено, как в результате дезинфекции, так и вследствие более высоких концентраций в исходных питьевых водах из палеогеновых отложений), значительной миграционной способностью, что позволяет оценить максимальную зону воздействия, а также экономической целесообразностью при проведении экологического мониторинга.

Объекты и методика исследования

Болота – весьма специфические во многих отношениях объекты со свойствами, характерными для поверхностных и подземных водных объектов (в большинстве случаев на болотах акватория – «водное пространство в пределах естественных, искусственных или условных границ» [31. С. 1] – отсутствует, более того, значительная часть болот покрыта древесной и кустарниковой растительностью, по характеру движения болотные воды ближе к подземным, а не к поверхностным водам, но их нельзя рассматривать как «верховодку», поскольку болото по определению не может функционировать

без болотных вод), лесных экосистем и почвенного покрова, что обуславливает некоторую неопределенность в подходах к их использованию (могут выступать одновременно как объекты земле-, водо-, недро- и лесопользования, а ущерб при авариях на болотах оценивается с использованием методик, разработанных для минеральных почв) и изучению.

В настоящее время достаточно подробно разработаны способы оценки гидрохимического фона и допустимых сбросов загрязняющих веществ в моря, реки, озера и водохранилища. Тем не менее при оценке соответствующих показателей болот остается много вопросов, в том числе в части определения параметров основного уравнения для оценки допустимой концентрации вещества в сточных водах C_{lim} , поступающих в водный объект (1):

$$C_{lim} = k_n \cdot (C_{n,lim} - C_b) + C_b, \quad (1)$$

где $C_{n,lim}$ и C_b – предельно допустимая (устанавливаемая нормативно для каждого вида водопользования) и фоновая концентрация; k_n – кратность общего разбавления. Например, каким образом оценить величину C_b с учетом разных типов болот и многообразия химического состава болотных вод? Даже «обычное» требование к снижению концентраций тех или иных веществ в болотных водах в целом не применимо, поскольку означает усиление выноса веществ, образующихся в процессе формирования торфов, а следовательно, деградацию торфяного болота, что не допускается действующим российским законодательством. С учетом этого и принимая во внимание рекомендации, изложенные в [32–36], для описания распространения загрязняющих веществ в торфяном болоте нами использован следующий подход [37–41]:

1. В структуре торфяной залежи (естественного напластования отдельных видов торфа – органической горной породы, образующейся в результате отмирания и неполного распада болотных растений в условиях повышенного увлажнения при недостатке кислорода и содержащей не более 50 % минеральных компонентов на сухое вещество [2]) по фильтрационным свойствам могут быть выделены: 1) деятельный и 2) инертный горизонты (по [1, 42]). В пределах деятельного горизонта глубиной 0,2–0,6 м преобладает адвективный и адвективно-диффузионный перенос, причем скорости горизонтального переноса могут быть существенно выше, чем вертикального; в ниже расположенном инертном горизонте в зависимости от типа торфяной залежи наблюдается в случае верховых болот постепенное уменьшение интенсивности диффузионного переноса от поверхности к минеральному дну (на верховых болотах), или в случае низинных болот – диффузионный перенос с выходами подземных вод, включая напорные [39, 40].

2. С учетом относительно постоянного или слабо меняющегося ботанического и химического состава торфов рассматривается одномерный стационарный процесс в соответствии с уравнениями (2), (3):

$$D_{h,n} \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial n^2} - v_n \cdot \frac{\partial C}{\partial n} + k_a \cdot f(C) = 0, \quad (2)$$

$$f(C) = k_r \cdot (C_e - C), \quad (3)$$

где n – направление основного распространения веществ: x – по горизонтали в деятельном горизонте; z – по вертикали в инертном горизонте в пределах условно однородного (по ботаническому и химическому составу) слоя; v_n и $D_{h,n}$ – скорость движения воды и коэффициент гидродисперсии в n -направлении; в первом приближении величина $D_{h,n}$ линейно пропорциональна скорости v_n ; k_a – активная пористость; C – фактическая концентрация вещества в водной среде; k_r – удельная скорость изменения C ; C_e – концентрация, соответствующая решению уравнения (4) в виде (5), учитывающем сорбционные процессы по Лэнгмюру и приближение к локальному равновесию относительно содержаний в водной среде (5) и водовмещающих отложениях (6) при отсутствии внешних воздействий [38, 39, 41]:

$$f(C) = k_{p1} \cdot (k_{p2} \cdot C_{eq} - C) + k_s \cdot (S - k_m \cdot (S_m - C) \cdot C) = 0, \quad (4)$$

$$C_e = \frac{k_{p1} \cdot k_{p2} \cdot C_{eq} + k_s \cdot S}{k_{p1} + k_s \cdot k_m \cdot (S_m - S)} = \frac{k_{p1} \cdot k_{p2} \cdot C_{eq} + k_s \cdot S}{k_r}, \quad (5)$$

$$S_e = \frac{\frac{k_{p1}}{k_s} (C - k_{p2} \cdot C_{eq}) + k_m \cdot S_m \cdot C}{1 + k_m \cdot C}, \quad (6)$$

$$S_m = S_{m,0} \cdot pH^{k(pH)}, \quad (7)$$

где k_{p1} – удельная скорость изменения концентрации C в зависимости от отклонения от равновесной концентрации C_{eq} , которая при ряде допущений может оцениваться как среднее геометрическое (в предположении, что концентрации C распределены по логнормальному закону, и рассматривается обобщенное уравнение химических реакций в водной среде в условно равновесных условиях $\Delta G_T = R \cdot T \cdot (\sum \Pi_i - \ln K_T^0)$, которое для конкретного вещества C_c приводится к виду $\ln C_c = b_0 + \sum b_j \cdot \ln C_j$, где ΔG_T и K_T^0 – общее изменение свободной энергии и суммарная константа равновесия при температуре T ; b_0 , b_j – константы), что фактически используется в гидрогеохимических поисках [43] либо как среднее арифметическое при нормировании сбросов в поверхностные водные объекты. В последнем случае используется коэффициент k_{p2} – отношение среднего геометрического к среднему арифметическому (при использовании среднего геометрического $k_{p2}=1$); k_s , k_m – коэффициен-

ты, учитывающие изменение концентрации вещества в растворе в зависимости от содержания в торфах S (с учетом разности единиц измерения); S_m – максимальная сорбционная способность торфов, которая, как показали исследования болот Западной Сибири [38–41], связана с величиной pH водных вытяжек из торфов (6), где $S_{m,0}$ и $k(pH)$ – коэффициенты.

3. Частное аналитическое решение уравнения (2) может быть получено в виде (8):

$$C_n = C_{e,n} + (C_{0,n} - C_{e,n}) \cdot \exp(\varphi \cdot n), \quad (8)$$

$$\varphi = \frac{v_n}{2 \cdot D_n} \cdot \left(1 - \sqrt{1 + \frac{4 \cdot k_r \cdot k_a \cdot D_n}{v_n^2}} \right), \quad (9)$$

где $C_{0,n}$ – начальная концентрация вещества в водной среде слоя в направлении n , в том числе концентрация C_{ws} в сточных водах. При этом следует отметить, что, как показал анализ результатов ранее выполненных исследований [24, 25, 37, 39, 40], использование уравнения (8) имеет практический смысл, прежде всего, при изучении (горизонтального) распространения загрязняющих веществ в деятельном горизонте торфяной залежи. Расчет вертикального переноса с учетом структуры торфяной залежи и дискретности свойств отдельных слоев может быть органичен оценкой параметров уравнений (5)–(7) и определением концентраций C или S по известным или предполагаемым значениям S и C , соответственно [25, 38–40].

4. Расчет по уравнению (1) допустимой концентрации вещества в сточных водах C_{lim} , поступающих в болотные воды, весьма затруднителен в части определения и фоновых концентраций (с учетом строения торфяной залежи и ее пространственной неоднородности), и кратности разбавления. По этой причине нами использован способ, основанный на совмещении уравнения (8) для горизонтального переноса и критерия Стьюдента [41], исходя из сопоставимости процедур оценки C_{lim} и проверки на однородность двух выборок – «фоновых» концентраций C_b и суммы «фона» и постоянной добавки ΔC_{ws} . Если допустить, что $C_b \approx C_e$, а наибольшее допустимое воздействие соответствует $S=S_m$, при оценке допустимой концентрации C_{lim} в сточных водах должно выполняться условие (10) или его модификация в виде (11):

$$\frac{|C_{lim} - C_e|}{\sqrt{2 \cdot \frac{\sigma^2}{N}}} = \frac{(C_{lim} - k_{p2} \cdot C_{eq} - S_m \cdot \frac{k_s}{k_{p1}}) \cdot \exp(\varphi \cdot x)}{\sqrt{2 \cdot \frac{\sigma^2}{N}}} < t_\alpha, \quad (10)$$

$$C_{lim} < k_{p2} \cdot C_{eq} \times \left(1 + \frac{k_s \cdot S_m}{k_{p1} \cdot k_{p2} \cdot C_{eq}} + \sqrt{2} \cdot \delta \cdot t_\alpha \cdot \exp(-\varphi \cdot x) \right), \quad (11)$$

где t_α – коэффициент Стьюдента при уровне значимости α ; N – объем выборки; σ – среднее квадратическое отклонение; δ – погрешность определения «фона». Если рассматривается случай загрязнения болота с поверхности (например, при аварийном сбросе), то концентрация, которая не приведет к значимому загрязнению торфов и болотных вод, оценивается по уравнению (11) при $x=0$.

5. Ранее [38] модель (2)–(9) была апробирована по данным о кислотных (с использованием азотной кислоты) и водных вытяжках из торфов верхового участка (сосново-кустарничково-мохового болота – «ряма») в восточной части одного из крупнейших в мире Васюганского болотного комплекса [3, 6, 7], а также на территории водосбора озера Поян в Китае в воде и водных вытяжках из отложений ветландов [41, 44, 45]. Сходимость расчетных и измеренных значений концентраций изученных веществ оценивалась по условию:

$$Kr_{sim} = \sqrt{\frac{\sum (Y_{obs} - Y_{sim})^2}{(N-1) \cdot D_{obs}}} \leq 0,8, \quad (12)$$

где Y_{obs} и Y_{sim} – измеренные и расчетные значения величины Y ; D_{obs} – дисперсия измеренных значений Y ; N – объем выборки.

Полученные результаты свидетельствуют о возможности использования уравнений (2)–(9) для описания распространения изученных веществ (главные ионы, редкоземельные элементы) в торфяной залежи. Однако нельзя однозначно интерпретировать связь между составом воды и водных вытяжек из торфов, с одной стороны, и составом водных и кислотных вытяжек из торфов, с другой, по причине существенных различий в составе болотных вод, торфов, водных и кислотных вытяжек из торфов, в том числе с учетом разных методов определения [46–51].

С учетом этого нами в рассматриваемой работе использованы данные о составе болотных вод и кислотных вытяжек из торфов применительно к двум случаям при расчете: 1) горизонтального переноса от выпуска сточных вод или шламового амбара – по данным в слое 0,0–0,25 м, где наблюдаются относительно максимальные скорости адвективного переноса [39, 42]; 2) вертикального переноса по глубине торфяной залежи – по данным о составе болотных вод в слое 0,0–0,25 м и кислотных вытяжек (с использованием азотной кислоты [39]) по интервалам 0,25 от поверхности болота до минеральных грунтов включительно. Соответствующие исследования были выполнены в Томском политехническом университете (ТПУ) под руководством и при непосредственном участии авторов в период с 2001 по 2021 гг. с учетом требований [43, 52–55]. Районы исследования располо-

жены на верховых участках Васюганского болота у села Полынянка [37–39, 52] и в верховом болоте в водосборе р. Васюган [14, 52], на участках низинного Обского болота у сел Нашеково (принят как фоновый участок без явного антропогенного загрязнения) и Мельниково (участок многолетнего сброса хозяйственно-бытовых стоков, образующихся при использовании подземных вод палеогенового комплекса (минерализация 0,7–1,1 г/дм³) в районе, прилегающем к северной оконечности Томь-Колыванской складчатой зоны с поправкой на влияние р. Оби [24, 25, 37, 40, 52]). При проведении исследований также использовались опубликованные материалы других авторов и организаций о структуре и свойствах торфяных залежей [6, 7, 56–59]. Схема размещения участков послонного изучения состава торфяной залежи приведена на рис. 1.

6. В рамках общей оценки химического состава болотных и сточных вод, а также растворов в шламовых амбарах было проведено обобщение

результатов ранее выполненных исследований на территории Томского района и прилегающих участках Новосибирской, Омской областей и Ханты-Мансийского округа [14, 15], дополненных неопубликованными материалами, в том числе полученными в последние годы до 2023 г. включительно. Методика отбора проб и определения их состава приведена в [24, 25, 40]. Погрешности δ_A определения среднего арифметического A рассчитаны по формуле (13), верхняя граница G_1 среднего геометрического G – по формуле (14):

$$\delta_A \approx \frac{\sigma_C}{\sqrt{N}} \quad (13)$$

$$G_1 = G \cdot \exp\left(\frac{\sigma_{\ln C}}{\sqrt{N}}\right), \quad (14)$$

где σ_C и $\sigma_{\ln C}$ – средние квадратические отклонения концентраций C и их натуральных логарифмов $\ln C$; N – объем выборки.

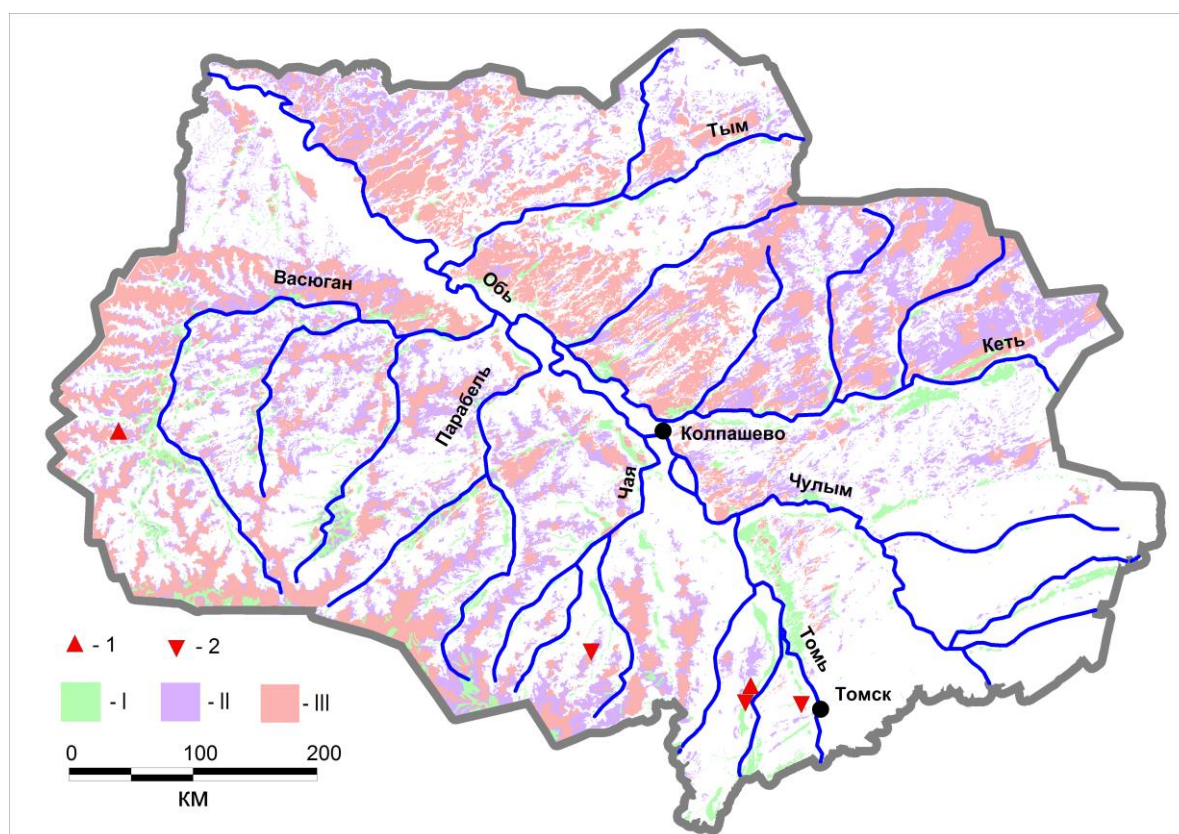


Рис. 1. Схема размещения участков исследования; условные обозначения: участки исследований распространения загрязняющих веществ по: 1 – плоскости в деятельном горизонте торфяной залежи (в водосборе р. Ягыльях, система «Ягыльях–Васюган–Обь»; Обское болото у села Мельниково); 2 – вертикали (Обское болото у сел Нашеково и Мельниково, Тимирязевское болото у г. Томска, восточный участок Васюганского болота у с. Полынянка); типы болот: I – низинные; II – переходные; III – верховые

Fig. 1. Layout of study sites; legend: study sites of pollutant distribution: 1) along the plane in the active horizon of the peat deposit (in the Yaglyakh basin, the Yaglyakh river – the Vasyugan river – the Ob river system; the Obskoe fen near the Melnikovo village); 2) vertically (the Obskoe fen near the Nashchekovo and Melnikovo villages, the Timiryazevskoe bog near the city of Tomsk, the eastern section of the Vasyugan bog near the Polynyanka village); peat bog types: I – low-moor; II – transition-moor; III – high moor

Результаты исследования и их обсуждение

С учетом требований [60], в пределах рассматриваемой территории в среднем водный раствор шламовых амбаров характеризуется как соленый (минерализация 10–50 г/дм³), хозяйственно-бытовые сточные воды, поступающие в болота, солоноватые (минерализация 1–10 г/дм³), в то время как болотные воды всех типов – пресные (минерализация до 1 г/дм³). По классификациям О.А. Алекина [61]: воды шламовых амбаров – «солоноватые», хлоридные натриевые III-го типа; хозяйственно-бытовые (если точнее – преимущественно хозяйственно-бытовые, но с примесью ливневых и производственных) – также «солоноватые», но хлоридные кальциевые I-го типа; болотные воды: низинных болот – пресные со средней минерализацией, гидрокарбонатные кальциевые III-го типа; переходных и верховых бо-

лот – «пресные» с очень малой минерализацией, гидрокарбонатные кальциевые III-го типа (табл. 1, 2), с закономерным уменьшением суммы главных ионов от переходных болот к верховым. Соответственно, обнаружение болотных вод с минерализацией более 0,5 г/дм³ и с повышенными (абсолютно и относительно) содержаниями Na⁺, K⁺, Cl⁻, SO₄²⁻ уже является основанием для необходимости оценки антропогенного влияния на болотные экосистемы, особенно в болотах переходного и верхового типов. Причем, судя по результатам сопоставления различных водных объектов [52, 62], этот вывод может рассматриваться как наиболее обоснованный и отражающий базовые постулаты теории формирования химического состава вод природно-техногенных объектов [34–36, 62].

Таблица 1. Среднемноголетний химический состав антропогенных вод

Table 1. Average long-term chemical composition of anthropogenic waters

Показатель Index	Ед. изм. Units	Шламовые амбары Drilling waste storage				Сточные воды Wastewater			
		A	δ_A	G	G ₁	A	δ_A	G	G ₁
pH	ед. pH pH units	7,99	0,59	7,89	8,48	7,49	0,08	7,48	7,56
Σ_{mi}	мг/дм ³ mg/dm ³	11250,2	6933,2	4013,9	6262,9	2213,2	600,1	1240,4	1528,9
Ca ²⁺	то же the same	449,9	303,2	130,6	208,6	81,7	30,0	64,7	88,7
Mg ²⁺	-//-	27,9	9,0	20,1	26,8	15,0	3,2	13,1	16,0
Na ⁺	-//-	2124,7	1344,1	948,5	1490,0	58,3	40,2	26,8	44,0
K ⁺	-//-	202,2	142,7	48,1	77,7	6,2	3,7	3,7	5,9
HCO ₃ ⁻	-//-	338,3	106,1	190,7	251,9	391,4	74,2	186,2	220,0
Cl ⁻	-//-	3874,4	2291,8	1297,4	2002,8	752,1	297,7	104,6	135,8
SO ₄ ²⁻	-//-	388,1	313,3	6,0	10,0	17,6	3,4	11,5	13,5
NO ₃ ⁻	-//-	4,96	1,72	3,64	4,91	3,96	1,70	0,81	1,07
NO ₂ ⁻	-//-	0,03	0,02	0,01	0,01	0,42	0,20	0,01	0,01
NH ₄ ⁺	-//-	1,59	0,53	1,17	1,57	38,26	12,30	10,69	13,48
F ⁻	-//-	-	-	-	-	0,99	0,43	0,13	0,18
Si	-//-	7,32	2,03	6,62	8,61	13,72	1,77	10,03	11,35
Fe	-//-	19,277	11,740	4,724	7,349	3,239	0,974	1,518	1,897
Al	мкг/дм ³ mkg/dm ³	-	-	-	-	2,5	0,0	2,5	2,5
Cu	то же the same	7,2	4,6	4,2	6,9	1,9	0,3	1,8	2,2
Zn	-//-	33,6	17,0	24,8	37,7	-	-	-	-
Pb	-//-	0,38	0,37	0,02	0,04	-	-	-	-
БПК ₅ BOD ₅	мгО ₂ /дм ³ mgO ₂ /dm ³	-	-	-	-	135,29	30,73	80,56	97,66
ПО/РО	мгО/дм ³ mgO/dm ³	62,70	13,59	54,12	66,33	187,40	70,99	96,84	133,59
БО/ДО	мгО/дм ³ mgO ₂ /dm ³	207,77	37,66	199,90	238,62	323,23	72,79	212,19	257,28
Нефтепродукты Petroleum products	мг/дм ³ mg/dm ³	-	-	-	-	0,269	0,140	0,036	0,049

Примечание: A и δ_A – среднее арифметическое и погрешность его определения (13); G и G₁ – среднее геометрическое и принятый в работе верхний предел его изменения по (14); Σ_{mi} – сумма главных ионов (Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, HCO₃⁻, CO₃²⁻, Cl⁻, SO₄²⁻); БПК₅, ПО и БО – биохимическое потребление за 5 суток, перманганатная и бихроматная окисляемость; прочерк означает отсутствие данных.

Note: A and δ_A are the arithmetic mean and the error in its determination (13); G and G₁ are the geometric mean and the upper limit of its change adopted in the work according to (14); Σ_{mi} is the sum of the main ions (Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, HCO₃⁻, CO₃²⁻, Cl⁻, SO₄²⁻); BOD₅, PO and DO are the biochemical consumption for 5 days, permanganate and dichromate oxidizability; a dash means no data.

Таблица 2. Среднемноголетний химический состав болотных вод в подзоне южной тайги без признаков явного загрязнения

Table 2. Average long-term chemical composition of swamp waters in the southern taiga subzone without signs of obvious pollution

Показатель Index	Ед. изм. Units	Низинные болота Low-moor peat bogs (fens)			Переходные болота Transition-moor peat bogs			Верховые болота High-moor peat bogs		
		A	δ_A	G	A	δ_A	G	A	δ_A	G
pH	Ед. pH pH units	6,27	0,15	6,15	4,90	0,16	4,78	4,49	0,10	4,41
Σ_{mi}	мг/дм ³ mg/dm ³	293,5	33,9	157,0	63,7	11,0	38,1	36,2	4,9	23,7
Ca ²⁺	то же the same	49,8	6,6	23,2	10,1	1,8	5,9	8,4	1,1	4,8
Mg ²⁺	—/—/—	12,4	1,5	7,5	3,2	0,6	1,8	3,3	0,5	1,4
Na ⁺	—/—/—	7,9	1,1	4,4	3,0	0,6	1,4	1,5	0,3	0,7
K ⁺	—/—/—	1,8	0,2	1,1	1,6	0,2	1,0	0,8	0,1	0,5
HCO ₃ ⁻	—/—/—	200,4	26,7	67,3	30,2	8,6	6,6	12,2	2,7	4,4
Cl ⁻	—/—/—	5,0	0,8	3,0	4,6	0,7	2,7	3,2	0,4	2,4
SO ₄ ²⁻	—/—/—	2,5	0,7	0,8	8,8	1,3	2,3	3,0	0,6	0,7
NO ₃ ⁻	—/—/—	1,47	0,30	0,51	1,05	0,22	0,24	1,23	0,17	0,33
NO ₂ ⁻	—/—/—	0,33	0,27	0,01	0,04	0,01	0,01	0,05	0,01	0,01
NH ₄ ⁺	—/—/—	3,27	0,43	1,52	3,12	0,47	1,31	3,35	0,36	1,42
F ⁻	—/—/—	0,15	0,05	0,06	0,08	0,02	0,04	0,05	0,01	0,03
Si	—/—/—	6,13	0,61	4,99	4,56	0,61	3,46	3,64	0,33	2,84
P	—/—/—	1,836	0,569	0,941	0,140	0,042	0,084	0,032	0,009	0,021
Fe	—/—/—	8,250	3,145	2,454	2,589	0,647	1,467	1,725	0,121	1,353
Al	мкг/дм ³ mkg/dm ³	106,0	29,6	26,0	511,8	170,0	124,1	470,7	63,0	230,2
Mn	то же the same	1171,6	498,4	278,1	182,5	49,5	104,9	102,2	12,0	88,3
Cu	—/—/—	3,0	1,0	0,9	21,2	10,4	2,6	3,6	0,8	1,3
Zn	—/—/—	28,6	5,4	14,9	33,4	8,2	12,0	30,8	5,6	13,1
Cd	—/—/—	0,15	0,07	0,02	0,91	0,40	0,04	0,07	0,03	0,01
Pb	—/—/—	2,15	0,50	0,56	3,74	1,24	0,58	2,12	0,92	0,29
La	—/—/—	0,213	0,102	0,042	0,436	0,170	0,195	0,111	0,023	0,091
Ce	—/—/—	0,451	0,220	0,091	0,920	0,374	0,422	0,247	0,040	0,214
Sm	—/—/—	0,054	0,023	0,009	0,102	0,038	0,054	0,030	0,005	0,026
Eu	—/—/—	0,045	0,013	0,029	0,027	0,010	0,012	0,006	0,001	0,004
ПО/PO	мгО/дм ³ mgO/dm ³	61,64	8,85	35,70	82,24	6,78	75,23	84,30	4,66	74,91
БО/DO	мгО/дм ³ mgO/dm ³	255,42	71,21	119,23	272,55	65,14	171,00	193,47	17,14	160,95
ФК/FA	мг/дм ³ mg/dm ³	116,35	37,44	75,11	121,32	17,64	100,82	145,92	9,44	144,30
ГК/HA	то же the same	64,75	34,12	12,57	42,93	14,04	23,06	67,82	20,55	29,41
Нефтепродукты Petroleum product	—/—/—	0,233	0,073	0,043	0,108	0,054	0,013	0,303	0,095	0,050

Примечание: ФК и ГК – фульво- и гуминовые кислоты; прочие обозначения – в примечаниях к табл. 1.

Note: FA and HA are fulvic and humic acids; other designations are in the notes to Table 1.

Для получения более детальных количественных оценок антропогенного влияния на болотные экосистемы был проведен анализ изменения содержаний исследуемых веществ по глубине торфяной залежи в кислотных вытяжках как на «фоновых», так и на загрязненных участках болот (рис. 2). В результате выявлено, во-первых, существенно неоднородное распределение содержаний многих веществ в «фоновом» состоянии, связанное с наличием геохимических барьеров примерно на границе перехода от деятельного к инертному горизонту, а также вблизи минерального дна, что подтверждается и различиями состава минеральных включений в торфа [25, 39]. Во-вторых, на участке Обского болота наблюдается существенное снижение концентраций

Na и Cl на глубинах 1–2 м даже в условиях многолетнего сброса сточных вод (рис. 2). В-третьих, по данным о химическом составе болотных вод в деятельном горизонте и кислотных вытяжек из торфов в слое 0,00–0,25 м методом общего понижающего градиента были определены значения параметров модели (5)–(7): для Na⁺ $Kr_{sim}=0,004$ (12); $S_{m0}=7036,087$; $k(pH)=-1,246$; $k_s=0,008$; $k_m=0,158$; $k_{p1}=0,771$; для Cl⁻ $Kr_{sim}=0,039$ (12); $S_{m0}=35145,871$; $k(pH)=-1,732$; $k_s=0,022$; $k_m=0,368$; $k_{p1}=0,631$. По полученным данным рассчитано распределение концентраций Na⁺ и Cl⁻ по глубине, согласующееся с результатами измерений в кислотных вытяжках из торфов, – антропогенное влияние в общих чертах приурочено к верхнему слою до 1–2 м (рис. 3).

В-четвертых, на поверхности низинного Обско-го болота влияние многолетних сбросов сточных вод может сказываться на участках более 500 м, хотя обычно в пределах 100–200 м наблюдается существенное снижение минерализации и содер-

жаний отдельных веществ (рис. 4). Еще меньше зона влияния шламового амбара на верховое болото на прилегающей территории (рис. 4). Но в данном случае, как мы полагаем, большое значение имеет качество гидроизоляции амбара.

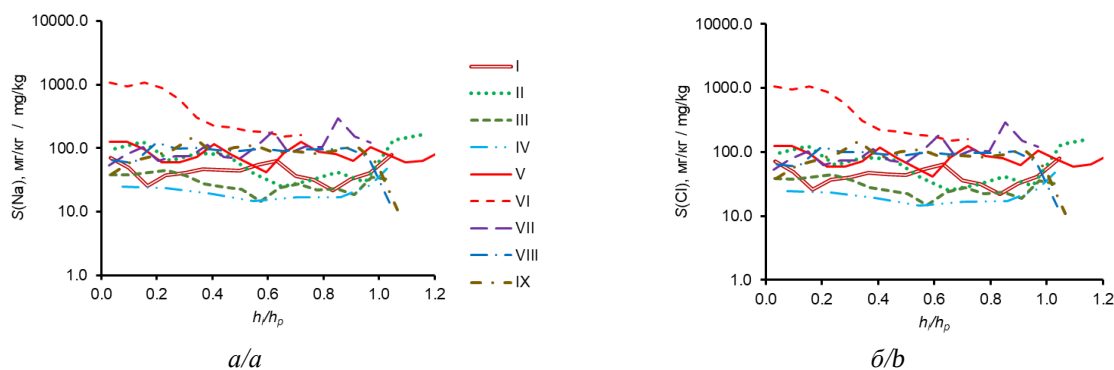


Рис. 2. Изменение концентраций Na (a) и Cl (b) в кислотных вытяжках из торфов таежной зоны Западной Сибири в зависимости от относительной глубины h_i/h_p ; условные обозначения: h_i – средняя глубина интервал опробования; h_p – глубина отложений торфа; при опробовании органо-минеральных отложений и минеральных грунтов ($h_i/h_p > 1$); объекты: I – верховой участок Васюганского болота (грядово-мочажинный комплекс, гряда; 09.11.2018 г.); II – верховой участок Васюганского болота (сосново-сфагново-кустарничковое болото – «рям»; 21.03.2017 г.); III – верховой участок Васюганского болота («рям»; 09.11.2018 г.); IV – верховой участок Васюганского болота; 09.11.2018 г.); V – низинное Обское болото («фоновый» участок у с. Нащечково; 26.11.2018 г.); VI – низинное Обское болото (загрязненный участок у с. Мельниково; 26.11.2018 г.); переходное Тимирязевское болото (25.11.2019 г.); VII – центр болота; VIII – между центром и окраиной; IX – край болота с элементами евтрофной растительности

Fig. 2. Changes in Na (a) and Cl (b) concentrations in acidic extracts from peat in the taiga zone of Western Siberia depending on the relative depth h_i/h_p ; legend: h_i is the average depth of the sampling interval; h_p is the depth of peat deposits; when sampling organo-mineral deposits and mineral soils ($h_i/h_p > 1$); objects: I is the upland area of the Vasyugan bog (ridge-hollow complex, ridge; 09.11.2018); II is the upland area of the Vasyugan bog (pine-sphagnum-shrub bog is "ryam"; 21.03.2017); III is the high-moor-peat bog area of the Vasyugan bog ("ryam"; 09.11.2018); IV is the high-moor peat bog area of the Vasyugan bog; 09.11.2018); V is the low-moor peat Obskoe fen (the "background" area near the village of Nashchekovo; 26.11.2018); VI is the low-moor peat the Obskoe fen (polluted area near the village of Melnikovo; 26.11.2018); transitional Timiryazevskoe swamp (25.11.2019); VII is the center of the swamp; VIII is the area between the center and the outskirts; IX is the edge of the swamp with elements of eutrophic vegetation

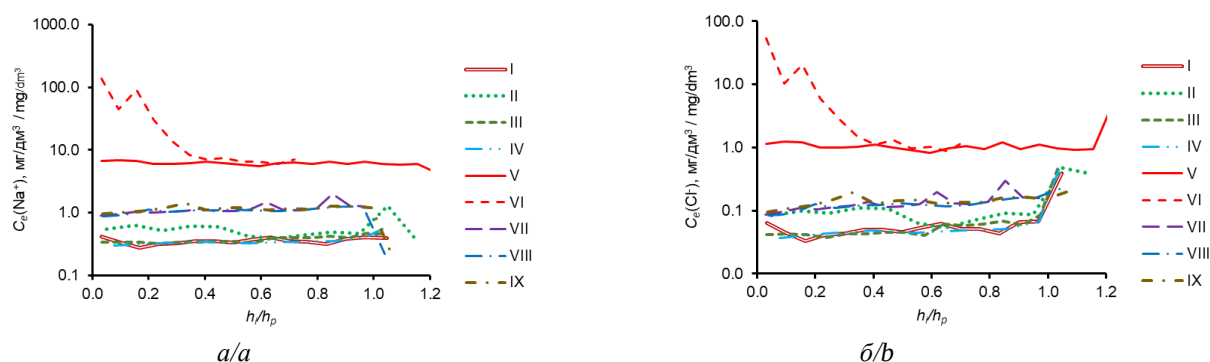


Рис. 3. Изменение концентраций Na (a) и Cl (b) в кислотных вытяжках из торфов таежной зоны Западной Сибири в зависимости от относительной глубины h_i/h_p (h_i – средняя глубина интервал опробования; h_p – глубина отложений торфа; при опробовании органо-минеральных отложений и минеральных грунтов $h_i/h_p > 1$)

Fig. 3. Changes in Na (a) and Cl (b) concentrations in acidic extracts from peat in the taiga zone of Western Siberia depending on the relative depth h_i/h_p (h_i is the average depth of the sampling interval; h_p is the depth of peat deposits; when sampling organomineral deposits and mineral soils $h_i/h_p > 1$)

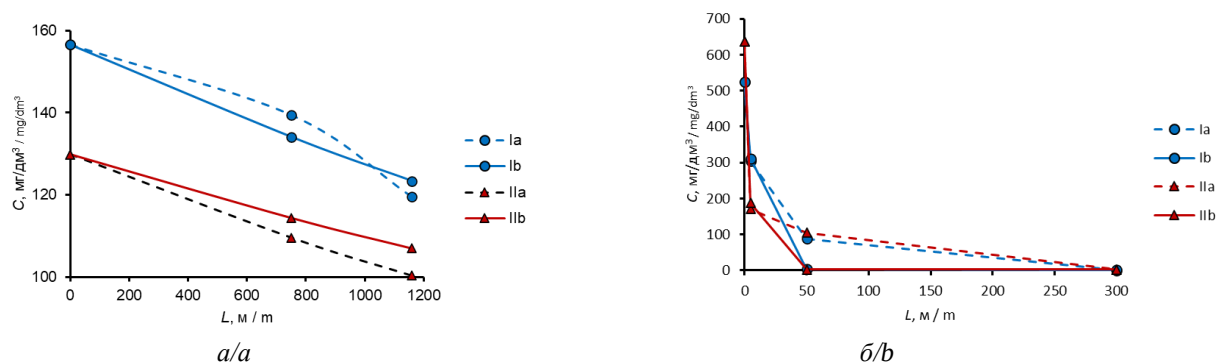


Рис. 4. Изменение измеренных и расчетных концентраций ионов Na^+ и Cl^- в водах (деятельный горизонт) низинного Обского болота (а) на участке сброса хозяйственно-бытовых стоков с. Мельниково (центр Шегарского административного района Томского района; 09.11.2018; исходные данные о химическом составе вод и торфов опубликованы в [14]; содержания Na^+ и Cl^- рассчитаны по зависимости от удельной электропроводности) и верхового болота в районе размещения шламового амбара на Западно-Моисеевском нефтяном месторождении (б) в водосборе р. Васюган (14.08.2003 г.); условные обозначения: Ia и Ib – измеренные и рассчитанные (8), (9) концентрации Na^+ ; IIa и IIb – измеренные и рассчитанные (8), (9) концентрации Cl^- ; C – концентрация; L – расстояние от источника загрязнения: а) выпуска сточных вод; б) шламового амбара

Fig. 4. Changes in measured and calculated concentrations of Na^+ and Cl^- ions in waters (active horizon) of the low-moor peat Obskoe fen (a) at the discharge site of domestic wastewater in the village of Melnikovo (the center of the Shegarsky administrative district of Tomsk region; 09.11.2018; the initial data on the chemical composition of waters and peat were published in [14]; Na^+ and Cl^- contents were calculated based on the dependence on specific electrical conductivity) and the raised bog in the area of the sludge pit at the Zapadno-Moiseevskoe oil field (b) in the catchment area of the Vasyugan river (14.08.2003 g.); legend: Ia and Ib are the measured and calculated (8), (9) Na^+ concentrations; IIa and IIb are the measured and calculated (8), (9) Cl^- concentrations; C is the concentration; L is the distance from the source of pollution: a) wastewater outlet; b) sludge pit

В-пятых, используя условие (11) были рассчитаны допустимые концентрации в сточных водах (фильтрате из шламового амбара), в пределах которых статистически значимые изменения в составе болотных вод с уровнем значимости 5 % будут отсутствовать: а) для низинного Обского болота $C_{eq}(\text{Na}^+) = 10,1 \text{ мг/дм}^3$; $C_{lim}(\text{Na}^+) = 21,5 \text{ мг/дм}^3$; $C_{eq}(\text{Cl}^-) = 2,4 \text{ мг/дм}^3$; $C_{lim}(\text{Cl}^-) = 42,7 \text{ мг/дм}^3$; б) для верхового болота вблизи шламового амбара на Западно-Моисеевском месторождении $C_{eq}(\text{Na}^+) = 0,7 \text{ мг/дм}^3$; $C_{lim}(\text{Na}^+) = 12,2 \text{ мг/дм}^3$; $C_{eq}(\text{Cl}^-) = 1,8 \text{ мг/дм}^3$; $C_{lim}(\text{Cl}^-) = 91,0 \text{ мг/дм}^3$ (условно равновесные концентрации приняты как средние геометрические для «фонового» участка Обского болота у с. Нащекново и для верховых участков Васюганского болота, соответственно).

Заключение

На основе анализа многолетних исследований болот в таежной зоне Западной Сибири оценены средние значения геохимических показателей болотных вод и распределение химических элементов в кислотных вытяжках из торфов. На этой основе предложена методика оценки антропогенного влияния на болота в результате сброса сточных вод и геомиграции на участках размещения объектов нефтегазового комплекса. С использованием этой

методики показано, что состояние изученных болот отличается от исходного, но эти изменения в основном ограничены по вертикали верхним слоем торфяной залежи до 1–2 м. По горизонтали влияние многолетнего сброса хозяйственно-бытовых стоков отражается на составе болотных вод деятельного горизонта на участках в основном до 500 м, на нефтяных месторождениях в отсутствие аварийных ситуаций – обычно не более 100–200 м. В целом значения допустимых концентраций C_{lim} по уравнению (11) можно оценивать как «относительно безопасный» уровень воздействия на болотные экосистемы, при котором не ожидается вторичного загрязнения болотных вод.

С учетом закономерностей формирования состава болотных вод и торфов, отраженных в общих чертах в модели (2)–(9), при проведении рекультивации целесообразно учитывать тип торфяной залежи и минимизировать внесение удобрений на нарушенные участки верховых болот с учетом вышеуказанных предложений [14, 15, 52, 63, 64]. По мнению авторов, игнорирование особенностей верховых болот может привести к возникновению достаточно устойчивых природно-техногенных болотных систем со свойствами, более характерными для низинных, а не для верховых болот.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 19179-73. Гидрология суши. Термины и определения. – М.: Госстандарт СССР, 1988. – 47 с.
2. ГОСТ 21123-85. Торф. Термины и определения. Дата введения 01.07.1986 г. – М.: Издательство стандартов, 1985. – 85 с.
3. Болотные системы Западной Сибири и их природоохранное значение / О.Л. Лисс, Л.И. Абрамова, Н.А. Аветов, Н.А. Березина, Л.И. Инишева, Т.В. Курнишкова, З.А. Слука, Т.Ю. Толпышева, Н.К. Шведчикова / под ред. В.Б. Куваева. – Тула: Гриф и К°, 2001. – 584 с.
4. Инишева Л.И. Биосферные аспекты болотного почвообразования // Жизнь Земли. – 2023. – Т. 45. – № 3. – С. 355–362.
5. Основные гидрологические характеристики. Т. 15. Алтай, Западная Сибирь и Северный Казахстан. Вып. 1. Верхняя и Средняя Обь. – Л.: Гидрометеиздат, 1979. – 488 с.
6. Торфяные ресурсы Томского района. Справочник по состоянию изученности на 01.01.1998 г. – Новосибирск: СНИИГТИМС, 1998. – 405 с.
7. Карта торфяных месторождений Западной Сибири. Масштаб 1:1000000: объяснительная записка / под ред. Р.Г. Матухина. – Новосибирск: Изд-во СО РАН: Филиал «Гео», 2000. – 33 с.
8. Eurasian mires of the Southern Taiga Belt: modern features and response to Holocene palaeoclimate / T. Minayeva, W. Bleuten, A. Sirin, E.D. Lapshina // Wetlands and Natural Resource Management. Ecological Studies / Eds. J.T.A. Verhoeven, B. Beltman, R. Bobbink, D.F. Whigham. – Berlin: Heidelberg: Springer-Verlag, 2006. – Vol. 190 – P. 315–341.
9. Great Vasyugan mire: how the world's largest peatland helps addressing the world's largest problems / S.N. Kirpotin, F. Tanneberger, H. Joosten, I.V. Volkov // Ambio. – 2021. – Vol. 50. – № 11. – P. 2038–2049. DOI: 10.1007/s13280-021-01520-2.
10. Охрана окружающей среды в территориальном Западно-Сибирском комплексе / В.А. Шишов, В.Ю. Шеметов, В.И. Рябенко, В.П. Парфенов. – М.: ВНИИОЭНГ, 1988. – 50 с.
11. Shoty W. Review of the inorganic geochemistry of peats and peatland waters // Earth-Science Reviews. – 1988. – № 25. – P. 95–176. DOI: 10.1016/0012-8252(88)90067-0.
12. Солнцева Н.П. Добыча нефти и геохимия природных ландшафтов. – М.: Изд-во МГУ, 1998. – 376 с.
13. Ecosystem recovery and natural degradation of spilled crude oil in peat bog ecosystems of West Siberia / W. Bleuten, E. Lapshina, W. Ivens, V. Shinkarenko, E. Wiersma // International Peat Journal. – 1999. – № 9. – P. 73–82.
14. Влияние шламовых амбаров на геохимическое состояние болотных экосистем в бассейне реки Васюган / В.А. Базанов, О.Г. Савичев, Д.В. Волостнов, Б.А. Егоров, А.О. Крутовский, Е.Г. Языков // Известия Томского политехнического университета. – 2004. – Т. 307. – № 2. – С. 72–75.
15. Льготин В.А., Савичев О.Г., Нигороженко В.Я. Состояние поверхностных водных объектов, водохозяйственных систем и сооружений на территории Томского района в 2000–2005 гг. – Томск: ОАО «Томскгеомониторинг», «АГРАФ-ПРЕСС», 2006. – 88 с.
16. Hydrological landscape settings of base-rich fen mires and fen meadows: an overview / A.P. Grootjans, E.B. Adema, W. Bleuten, H. Joosten, M. Madaras, M. Janáková // Applied Vegetation Science. – 2006. – № 9. – P. 175–184.
17. Global wetlands: potential distribution, wetland loss, and status / S. Hu, Zh. Niu, Y. Chen, L. Li, H. Zhang // Science of the Total Environment. – 2017. – Vol. 586. – P. 319–327. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.02.001.
18. Состояние геологической среды (недр) территории Сибирского федерального округа в 2021 г. Информационный бюллетень, выпуск 18. – Томск: Филиал «Сибирский региональный центр ГМСН», 2022. – 204 с.
19. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2022 году. Государственный доклад. – М.: Минприроды России; МГУ имени М.В. Ломоносова, 2023. – 686 с.
20. Водный кадастр. Ресурсы поверхностных и подземных вод, их использование и качество. Ежегодное издание. 2022 год. – СПб: Росгидромет, 2023. – 153 с.
21. Li X. Application of artificial wetlands in water pollution // Highlights in Science, Engineering and Technology. – 2023. – Vol. 73. – P. 471–477. DOI: <https://doi.org/10.54097/hset.v73i.14057>
22. Moskovchenko D.V., Pozhitkov R.Yu., Tigeev A.A. Assessment of the concentration of metals and metalloids in the snow cover at oil production sites in the middle Ob region // Water Resources. – 2023. – Vol. 50. – № S1. – P. S57–S67. DOI: 10.1134/s009780782370032x.
23. Bradshaw R.H.M., Sykes M.T. Ecosystem dynamics. From the past to the future. – Chichester, West Sussex, UK: John Wiley & Sons, Ltd., 2014. – 321 p.
24. Условия трансформации коммунально-бытовых сточных вод в болотных экосистемах (на примере Обского болота, Западная Сибирь) / И.С. Иванова, О.Г. Савичев, Е.А. Солдатова, Н.Г. Наливайко, Д.С. Корнеев, Н.В. Гусева, Н.А. Смирнова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 3. – С. 39–51. DOI: 10.18799/24131830/2020/3/2530.
25. Mineralogical and geochemical features of peat deposit of eutrophic the Obskoye fen in anthropogenous conditions (the Western Siberia) / O.G. Savichev, M.A. Rudmin, A.K. Mazurov, N.G. Nalivaiko, V.I. Sergienko, I.P. Semiletov // Doklady Earth Sciences. – 2020. – Vol. 492. – P. 1. – P. 320–322. DOI: 10.1134/S1028334X20050219.
26. Геоэкологическая оценка современного состояния верховых болот (рямов) барабинской лесостепи в условиях антропогенного воздействия / Г.А. Леонова, А.Е. Мальцев, Ю.И. Прейс, В.А. Бобров // Геосферные исследования. – 2022. – № 4. – С. 76–95. DOI: 10.17223/25421379/25/5
27. Лепихин А.П. К совершенствованию технологии регламентации антропогенных нагрузок на водные объекты // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2022. – № 4. – С. 100–102.
28. Болгов М.В. О проблемах и направлениях стратегического развития водного хозяйства России // Водные ресурсы в условиях глобальных вызовов: экологические проблемы, управление, мониторинг. Сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. В 2-х т. – Новочеркасск, 2023. – С. 238–244.
29. Danilov-Danilyan V.I., Klyuev N.N., Kotlyakov V.M. Russia in the global natural and ecological space // Regional Research of Russia. – 2023. – Vol. 13. – № 1. – P. 34–57. DOI: 10.1134/S2079970522700472.

30. Методика разработки нормативов допустимых сбросов загрязняющих веществ в водные объекты для водопользователей (с изменениями на 18 мая 2022 года). – М.: МПР РФ, 2022. – 46 с.
31. Водный кодекс Российской Федерации (с изменениями на 4 августа 2023 года) (редакция, действующая с 1 сентября 2023 года). Кодекс РФ от 03.06.2006 N 74-ФЗ. – М.: Кремль, 2023. – 52 с.
32. Lerman A. Geochemical processes water and sediment environments. – New York: Wiley – Inter-science Public, 1979. – 481 p.
33. Jacob A. Modelling solute transport using the double porous medium approach // *Modelling in Aquatic Chemistry* / Eds. I. Grenthe, I. Puigdomenech. – Paris, France: OECD, Nuclear Energy Agency, 1997. – P. 525–576.
34. Крайнов С.Р., Рыженко Б.Н., Швеи В.М. Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты / отв. ред Н.П. Лавёров. – М.: Наука, 2004. – 677 с.
35. Loucks D.P., Van Beek E. Water resources systems planning and management. An introduction to methods, models and applications. – Turin: UNESCO Publ., printed by Ages Arti Grafiche, 2005. – 679 p.
36. Геологическая эволюция и самоорганизация системы вода–порода: в 5 т. Т. 2. Система вода–порода в условиях зоны гипергенеза / С.Л. Шварцев, Б.Н. Рыженко, В.А. Алексеев, Е.М. Дутова, И.А. Кондратьева, Ю.Г. Копылова, О.Е. Лепокурова / отв. ред. Б.Н. Рыженко. – Новосибирск: СО РАН, 2007. – 389 с.
37. Прогноз изменения макрокомпонентного состава болотных вод при добыче железных руд в Томского района / О.Г. Савичев, А.К. Мазуров, Н.В. Гусева, В.А. Домаренко, А.А. Хвощевская // *География и природные ресурсы*. – 2016. – № 1. – С. 94–102.
38. Mechanisms of accumulation of chemical elements in a peat deposit in the eastern part of Vasyugan Swamp (West Siberia) / O.G. Savichev, A.K. Mazurov, M.A. Rudmin, N.E. Shakhova, V.I. Sergienko, I.P. Semiletov // *Doklady Earth Sciences*. – 2019. – Vol. 486. – Pt. 1. – P. 568–570. DOI: 10.1134/S1028334X19050258.
39. Geochemical barriers in oligotrophic peat bog (Western Siberia) / O. Savichev, E. Soldatova, M. Rudmin, A. Mazurov // *Applied Geochemistry*. – 2020. – Vol. 113. – 104519. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2019.104519.
40. Савичев О.Г., Ян Х., Чжоу Д. Гидрогеодинамические и гидрогеохимические условия самоочищения вод Обского болота (Западная Сибирь) // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2022. – Т. 333. – № 4. – С. 115–125. DOI: 10.18799/24131830/2022/4/3656.
41. Comparative Analysis of the Chemical Composition of Surface and Groundwater in the Poyang Lake Catchment Area (China) / D. Zhou, H. Yang, O.G. Savichev, K. Jin, Y. Wu, A.A. Khvashchevskaya // *Geography and Natural Resources*. – 2024. – Vol. 45. – № 1. – P. 101–108. DOI: 10.1134/S187537282470015X.
42. Иванов К.Е. Водобмен в болотных ландшафтах. – Л.: Гидрометеиздат, 1975. – 280 с.
43. Требования к производству и результатам многоцелевого геохимического картирования масштаба 1:200000 / отв. ред. Э.К. Буренков. – М.: ИМГРЭ, 2002. – 92 с.
44. Чжоу Дань. Условия самоочищения и допустимое воздействие на грунтовые и поверхностные воды (на примере водосбора озера Поян КНР и Томского Приобья РФ): автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2023. – 26 с.
45. Ян Хэн. Особенности взаимодействия подземных и болотных вод в гумидных условиях умеренного и субтропического климатов (на примере объектов Западной Сибири России и Восточного Китая): автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2023. – 26 с.
46. Veretennikova E.E. Lead in the natural peat cores of ridge-hollow complex in the taiga zone of West Siberia // *Ecological Engineering*. – 2015. – Vol. 80. – P. 100–107.
47. Modes of occurrence of rare earth elements in peat from Western Siberia / S.I. Arbuzov, S.G. Maslov, R.B. Finkelman, A.M. Mezhibor, S.S. Ilenok, M.G. Blokhin, E.V. Peregudina // *Journal of Geochemical Exploration*. – 2017. – Vol. 10. – P. 1–22. URL: <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.10.012> (дата обращения 12.10.2017).
48. Geochemical features of peat deposits at oligotrophic bogs in the southern taiga subzone of West Siberia / E.E. Veretennikova, I.V. Kuryina, E.A. Dyukarev, E.A. Golovatskaya, S.V. Smirnov // *Geochemistry International*. – 2021. – Vol. 59. – № 6. – P. 618–631. DOI: 10.1134/S0016702921050098.
49. Biogeochemistry of Holocene peatlands in the Baraba forest-steppe (southern West Siberia) / G.A. Leonova, A.E. Maltsev, Yu.I. Preis, L.V. Miroshnichenko // *Applied Geochemistry*. – 2020. – Vol. 124. – 104811. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2020.104811.
50. Геохимия торфяных болот таежной зоны Западной Сибири / В.С. Архипов, С.Г. Маслов, С.И. Арбузов, А.Ю. Иванов / под ред. С.И. Арбузова. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2022. – 210 с.
51. Маслов С.Г., Инишева Л.И., Порохина Е.В. Состав органического вещества и микроэлементов сфагновых торфов северной части месторождения Васюганское и направление их использования // *Химия растительного сырья*. – 2023. – № 2. – С. 311–318. DOI: 10.14258/jcrpm.20230211764.
52. Савичев О.Г. Геохимические показатели болотных вод в таежной зоне Западной Сибири // *Известия РАН. Серия географическая*. – 2015. – № 4. – С. 47–57.
53. ГОСТ 17644-83. Торф. Методы отбора проб из залежи и обработки их для лабораторных испытаний. – М.: Изд-во стандартов, 1983. – 12 с.
54. Weight W.D. Hydrogeology field manual. 2nd ed. – USA: The McGraw-Hill Companies, Inc., 2008. – 751 p.
55. Manual on stream gauging. Vol. I. Fieldwork. WMO. No. 1044. – Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, 2010. – 252 p.
56. Альбом аэрофотоснимков растительного покрова торфяных месторождений центральной части Западной Сибири. – М.: Геолторфразведка, 1973. – 83 с.
57. Емельянова Т.Я., Крамаренко В.В. Характеристики фильтрационных свойств торфов Томского района // *Обской вестник*. – 2001. – № 1. – С. 36–39.
58. Научно-исследовательский полигон «Васюганье». Программа научной экскурсии / Л.И. Инишева, Т.В. Дементьева, Е.А. Головацкая, Е.В. Порохина. – Томск: ЦНТИ, 2003. – 88 с.

59. Vegetation characteristics and eco-hydrological processes in a pristine mire in the Ob River valley (Western Siberia) / A.M. Schipper, R. Zeefat, F. Tanneberger, J.P. van Zuidam, W. Hahne, S.A. Schep, S. Loos, W. Bleuten, H. Joosten, E.D. Lapshina, M.J. Wassen // *Plant Ecology*. – 2007. – Vol. 193. – P. 131–145. DOI: 10.1007/s11258-006-9253-x.
60. ГОСТ 27065-86. Качество вод. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 2003. – 9 с.
61. Алёкин О.А. Основы гидрохимии. – Л.: Гидрометеорологическое изд-во, 1970. – 444 с.
62. Shvartsev S.L. Geochemistry of fresh groundwater in the main landscape zones of the Earth // *Geochemistry International*. – 2008. – Vol. 46. – № 13. – P. 1285–1398.
63. Upenieks E.M., Rudusāne A. Afforestation as a type of peatland recultivation and assessment of its affecting factors in the reduction of GHG emissions // *Rural development*. – 2022. – Vol. 2021. – № 1. – P. 295–300. DOI: <https://doi.org/10.15544/RD.2021.052>
64. Meshram V.M., Kumar B., Dahale P.P. Natural way of treatment of domestic waste water by using anaerobic unit and engineered wetlands with phytoremediation // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2023. – Vol. 1193. – № 1. – P. 012005. DOI 10.1088/1755-1315/1193/1/012005.

Информация об авторах

Олег Геннадьевич Савичев, доктор географических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. osavichev@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9561-953X>
Елена Юрьевна Пасечник, кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. paseyu@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2207-9891>

Поступила в редакцию: 12.08.2024

Поступила после рецензирования: 27.09.2024

Принята к публикации: 01.10.2024

REFERENCES

1. SS 19179-73. *Land hydrology. Terms and definitions*. Moscow, Gosstandart of the USSR Publ., 1988. 47 p. (In Russ.)
2. SS 21123-85. *Peat. Terms and definitions*. Moscow, Izdatelstvo standartov Publ., 1985. 85 p. (In Russ.)
3. Liss O.L., Abramova L.I., Avetov N.A. *Bog of Western Siberia and their conservation value*. Tula, Grif i K° Publ., 2001. 584 p. (In Russ.)
4. Inisheva L.I. Inisheva L.I. Biospheric aspects of bog soil formation. *Life of the Earth*, 2023, vol. 45, no. 3, pp. 355–362.
5. *Basic hydrological characteristics. Vol. 15. Altai, Western Siberia and Northern Kazakhstan. Iss. 1. Upper and Middle Ob*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1979. 488 p. (In Russ.)
6. *Peat resources of the Tomsk region. A handbook on the state of knowledge at 01.01.1998*. Novosibirsk, SNIIGGIMS Publ., 1998. 405 p. (In Russ.)
7. *Map of peat deposits in Western Siberia. Scale 1:1000000: explanatory note*. Ed. by R.G. Matukhin. Novosibirsk, SB RAS Publ. house, Branch «Geo», 2000. 33 p. (In Russ.)
8. Minayeva T., Bleuten W., Sirin A., Lapshina E.D. Eurasian mires of the Southern Taiga Belt: modern features and response to Holocene palaeoclimate. *Wetlands and Natural Resource Management. Ecological Studies*. Eds. J.T.A. Verhoeven, B. Beltman, R. Bobbink, D.F. Whigham. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2006. Vol. 190, pp. 315–341.
9. Kirpotin S.N., Tanneberger F., Joosten H., Volkov I.V. Great Vasyugan mire: how the world's largest peatland helps addressing the world's largest problems. *Ambio*, 2021, vol. 50, no. 11, pp. 2038–2049. DOI: 10.1007/s13280-021-01520-2.
10. Shishov V.A., Shemetov V.Yu., Ryabchenko V.I., Parfenov V.P. *Environmental protection in the territorial West Siberian complex*. Moscow, VNIIOENG Publ., 1988. 50 p. (In Russ.)
11. Shotyk W. Review of the inorganic geochemistry of peats and peatland waters. *Earth-Science Reviews*, 1988, no. 25, pp. 95–176. DOI: 10.1016/0012-8252(88)90067-0.
12. Solntseva N.P. *Oil mining and geochemical transformation of landscapes*. Moscow, Moscow State University Press, 1998. 376 p. (In Russ.)
13. Bleuten W., Lapshina E., Ivens W., Shinkarenko V., Wiersma E. Ecosystem recovery and natural degradation of spilled crude oil in peat bog ecosystems of West Siberia. *International Peat Journal*, 1999, no. 9, pp. 73–82.
14. Bazanov V.A., Savichev O.G., Volostnov D.V., Egorov B.A., Krutovsky A.O., Yazikov E.G. The influence of sludge pits on the geochemical state of marsh ecosystems in the Vasyugan River basin. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2004, vol. 307, no. 2, pp. 72–75. (In Russ.)
15. L'gotin V.A., Savichev O.G., *The state of surface water bodies, water management systems and structures in the territory of Tomsk region in 2000–2005*. Tomsk, "Tomskgeomonitoring", "AGRAF-PRESS" Publ., 2006. 88 p. (In Russ.)
16. Grootjans A.P., Adema E.B., Bleuten, W., Joosten H., Madaras M., Janáková M. Hydrological landscape settings of base-rich fen mires and fen meadows: an overview. *Applied Vegetation Science*, 2006, vol. 9, pp. 175–184.
17. Hu S., Niu Zh., Chen Y., Li L., Zhang H. Global wetlands: potential distribution, wetland loss, and status. *Science of the Total Environment*, 2017, vol. 586, pp. 319–327. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.02.001.
18. *Condition of the geological environment (subsoil) in the territory of Siberian Federal District in 2021. Informational bulletin*. Vol. 18. Tomsk, Filial «Sibirskiy regionalny tsentr GMSN», FGBU «Gidrospetsgeologiya» Publ., 2022. 204 p. (In Russ.)

19. *On the state and protection of the environment of the Russian Federation in 2022. State report*. Moscow, Ministry of Natural Resources of Russia; Lomonosov Moscow State University, 2023. 686 p. (In Russ.)
20. *Water cadastre. Surface and groundwater resources, their use and quality*. 2022. St. Petersburg, Roshydromet Publ., 2023. 153 p. (In Russ.)
21. Li X. Application of artificial wetlands in water pollution. *Highlights in Science, Engineering and Technology*, 2023, vol. 73, pp. 471–477. DOI: 10.54097/hset.v73i.14057.
22. Moskovchenko D.V., Pozhitkov R.Yu., Tigeev A.A. Assessment of the concentration of metals and metalloids in the snow cover at oil production sites in the middle Ob region. *Water Resources*, 2023, vol. 50, no. 1, pp. 57–67. DOI: 10.1134/s009780782370032x.
23. Bradshaw R.H.M., Sykes M.T. *Ecosystem Dynamics. From the past to the future*. Chichester, West Sussex, UK, John Wiley & Sons, Ltd., 2014. 321 p.
24. Ivanova I.S., Savichev O.G., Soldatova E.A., Nalivaiko N.G., Korneev D.S., Guseva N.V., Smirnova N.A. Conditions of transformation of municipal wastewater in bog ecosystems (on the example of Obskoe bog, Western Siberia). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 3, pp. 39–51. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2020/3/2530.
25. Savichev O.G., Rudmin M.A., Mazurov A.K., Nalivaiko N.G., Sergienko V.I., Semiletov I.P. Mineralogical and geochemical features of peat deposit of eutrophic the Obskoye fen in anthropogenous conditions (the Western Siberia). *Doklady Earth Sciences*, 2020, vol. 492, P. 1, pp. 320–322. DOI: 10.1134/S1028334X20050219.
26. Leonova G.A., Maltsev A.E., Preis Yu.I., Bobrov V.A. Geoecological assessment of the current state of raised bogs (ryams) of the Baraba forest-steppe under anthropogenic impact. *Geospheric studies*, 2022, no. 4, pp. 76–95. (In Russ.) DOI: 10.17223/25421379/25/5.
27. Lepikhin A.P. On the issue of upgrading the anthropogenic loads regulation technique. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*, 2022, no. 4, pp. 100–102.
28. Bolgov M.V. On the problems and directions of strategic development of water management in Russia. *Water resources in the context of global challenges: environmental problems, management, monitoring. Collection of works of the All-Russian scientific and practical conference with international participation*. In 2 vol. Novocherkassk, 2023, pp. 238–244. (In Russ.)
29. Danilov-Danilyan V.I., Klyuev N.N., Kotlyakov V.M. Russia in the global natural and ecological space. *Regional Research of Russia*, 2023, vol. 13, no. 1, pp. 34–57. DOI: 10.1134/S2079970522700472.
30. *Methodology for developing standards for permissible discharges of pollutants into water bodies for water users (as amended on May 18, 2022)*. Moscow, MPR RF Publ., 2022. 46 p. (In Russ.)
31. *Water Code of the Russian Federation (as amended on August 4, 2023) (version effective from September 1, 2023). Code of the Russian Federation of 03.06.2006 N 74-FZ*. Moscow, Kremlin Publ., 2023. 52 p.
32. Lerman A. *Geochemical Processes Water and Sediment Environments*. New York, Wiley – Inter-science Public, 1979. 481 p.
33. Jacob A. Modelling solute transport using the double porous medium approach. *Modelling in Aquatic Chemistry*. Eds. I. Grenthe, I. Puigdomenech. Paris, France, OECD, Nuclear Energy Agency, 1997. pp. 525–576.
34. Kraynov S.R., Ryzhenko B.N., Shvets V.M. *Geochemistry of ground waters: theoretical, applied and environmental aspects*. Moscow, Nauka Publ., 2004. 677 p. (In Russ.)
35. Loucks D.P., Van Beek E. *Water resources systems planning and management. An introduction to methods, models and applications*. Turin, UNESCO Publ., printed by Ages Arti Grafiche, 2005. 679 p.
36. Shvartsev S.L., Ryzhenko B.N., Alekseev V.A., Dutova E.M., Kondratieva I.A., Kopylova Yu.G., Lepokurova O.E. *Geological evolution and self-organizing of water–rock system. V. 1. Water–rock system in conditions of a zone of active water exchange*. Ed. by B.N. Ryzhenko. Novosibirsk, Siberian Branch of the Russian Academy of Science Publ. house, 2007. 389 p. (In Russ.)
37. Savichev O.G., Mazurov A.K., Guseva N.V., Domarenko V.A., Khvashchevskaya A.A. The forecast of change of macrocomponental composition of wetland waters at extraction of minerals in the Tomsk region. *Geography and natural resources*, 2016, no. 1, pp. 94–102. (In Russ.)
38. Savichev O.G., Mazurov A.K., Rudmin M.A., Shakhova N.E., Sergienko V.I., Semiletov I.P. Mechanisms of Accumulation of Chemical Elements in a Peat Deposit in the Eastern Part of Vasyugan Swamp (West Siberia). *Doklady Earth Sciences*, 2019, vol. 486, P. 1, pp. 568–570. DOI: 10.1134/S1028334X19050258.
39. Savichev O., Soldatova E., Rudmin M., Mazurov A. Geochemical barriers in oligotrophic peat bog (Western Siberia). *Applied Geochemistry*, 2020, vol. 113, 104519. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2019.104519.
40. Savichev O.G., Yang H., Zhou D. Hydrogeodynamic and hydrogeochemical conditions of self-clearance of the Obskoe fen water (Western Siberia). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 4, pp. 115–125. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2022/4/3656.
41. Zhou D., Yang H., Savichev O.G., Jin K., Wu Y., Khvashchevskaya A.A. Comparative Analysis of the Chemical Composition of Surface and Groundwater in the Poyang Lake Catchment Area (China). *Geography and Natural Resources*, 2024, vol. 45, no. 1, pp. 101–108. DOI: 10.1134/S187537282470015X.
42. Ivanov K.E. *Water exchange in mire landscapes*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1975. 280 p. (In Russ.)
43. *Requirements to production and results of multi-purpose geochemical mapping of scale 1:200000*. Ed. by E.K. Bkurenkov. Moscow, IMGRE Publ., 2002. 92 p. (In Russ.)
44. Zhou Dan. *Self-purification conditions and permissible impact on ground and surface waters (using the Poyang Lake catchment area of China and the Tomsk Ob region of Russia as an example)*. Cand. Diss. Abstract. Tomsk, 2023. 26 p. (In Russ.)
45. Yan Heng. *Features of the interaction of ground and marsh waters in humid conditions of temperate and subtropical climates (using Western Siberia, Russia, and Eastern China as an example)*. Cand. Diss. Abstract. Tomsk, 2023. 26 p. (In Russ.)
46. Veretennikova E.E. Lead in the natural peat cores of ridge-hollow complex in the taiga zone of West Siberia. *Ecological Engineering*, 2015, vol. 80, pp. 100–107.

47. Arbuzov S.I., Maslov S.G., Finkelman R.B., Mezhibor A.M., Ilenok S.S., Blokhin M.G., Peregudina E.V. Modes of occurrence of rare earth elements in peat from Western Siberia. *Journal of Geochemical Exploration*, 2017, no. 10, pp. 1–22. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.10.012> (accessed 12 October 2017).
48. Veretennikova E.E., Kuryina I.V., Dyukarev E.A., Golovatskaya E.A., Smirnov S.V. Geochemical features of peat deposits at oligotrophic bogs in the southern taiga subzone of West Siberia. *Geochemistry International*, 2021, vol. 59, no. 6, pp. 618–631. DOI: 10.1134/S0016702921050098.
49. Leonova G.A., Maltsev A.E., Preis Yu.I., Miroshnichenko L.V. Biogeochemistry of holocene peatlands in the baraba forest-steppe (southern West Siberia). *Applied Geochemistry*, 2021, vol. 124, 104811. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2020.104811.
50. Arkhipov V.S., Maslov S.G., Arbuzov S.I., Ivanov A.Yu. Geochemistry of peat bogs in the taiga zone of Western Siberia. Ed. by S.I. Arbuzov. Novosibirsk, SB RAS Publ. House, 2022. 210 p. (In Russ.)
51. Maslov S.G., Inisheva L.I., Porokhina E.V. Composition of organic matter and microelements of sphagnum peat of the northern part of the Vasyuganskoe deposit and the direction of their use. *Khimiya Rastitelnogo Syrya*, 2023, no. 2, pp. 311–318. (In Russ.) DOI: 10.14258/jcprm.20230211764
52. Savichev O.G. Geochemical indicators of bog waters in the taiga zone of Western Siberia. *Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya*, 2015, no. 4, pp. 47–57. (In Russ.)
53. SS 17644-83. *Peat. Methods of sampling from deposit and preparation of samples for laboratory tests*. Moscow, Izdatelstvo standartov Publ., 1983. 12 p. (In Russ.)
54. Weight W.D. *Hydrogeology field manual*. 2nd ed. USA, The McGraw-Hill Companies, Inc., 2008. 751 p.
55. *Manual on stream gauging*. Vol. I. *Fieldwork*. WMO. No. 1044. Geneva, Switzerland, World Meteorological Organization, 2010. 252 p.
56. *Album of photographs of the vegetation cover of peat deposits in the central part of Western Siberia*. Moscow, Geolotfrazvedka Publ., 1973. 83 p. (In Russ.)
57. Emelyanova T.Ya., Kramarenko V.V. Characteristics of the filtration properties of peats of the Tomsk region. *Obskoy vestnik*, 2001, no. 1, pp. 36–39. (In Russ.)
58. Inisheva L.I., Dementyeva T.V., Golovatskaya E.A., Porokhina E.V. *Scientific-research ground "Vasyugane". Program of scientific excursion*. Tomsk, TSNTI Publ., 2003. 88 p. (In Russ.)
59. Schipper A.M., Zeefat R., Tanneberger F., Van Zuidam J.P., Hahne W., Schep S.A., Loos S., Bleuten W., Joosten H., Lapshina E.D., Wassen M.J. Vegetation characteristics and eco-hydrological processes in a pristine mire in the Ob River valley (Western Siberia). *Plant Ecology*, 2007, vol. 193, pp. 131–145. DOI: 10.1007/s11258-006-9253-x.
60. SS 27065-86. *Quality of water. Terms and definitions*. Moscow, Izdatelstvo standartov Publ., 2003. 9 p. (In Russ.)
61. Alekin O.A. *Bases of hydrochemistry*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1970. 444 p. (In Russ.)
62. Shvartsev S.L. Geochemistry of fresh Groundwater in the Main Landscape Zones of the Earth. *Geochemistry International*, 2008, vol. 46, no. 13, pp. 1285–1398.
63. Upenieks E.M., Rudusāne A. Afforestation as a type of peatland recultivation and assessment of its affecting factors in the reduction of GHG emissions. *Rural development*, 2022, vol. 2021, no. 1, pp. 295–300. DOI: <https://doi.org/10.15544/RD.2021.052>.
64. Meshram V.M., Kumar B., Dahale P.P. Natural way of treatment of domestic waste water by using anaerobic unit and engineered wetlands with phytoremediation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2023, vol. 1193, no. 1, p. 012005. DOI 10.1088/1755-1315/1193/1/012005.

Information about the authors

Oleg G. Savichev, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. OSavichev@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9561-953X>

Elena Yu. Pasechnik, Cand. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. paseyu@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2207-9891>

Received: 12.08.2024

Revised: 27.09.2024

Accepted: 01.10.2024

УДК 551.464.3 (1-924.71)
DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4766
Шифр специальности ВАК: 1.6.6

Уран в подземных водах Северного Казахстана

Н.А. Медешова¹, Д.А. Новиков^{2,3✉}, Е.С. Ауелхан¹, А.А. Антоненко¹,
А.А. Максимова^{2,3}, А.С. Деркачев², Ф.Ф. Дульцев², А.М. Орынбек⁴,
Ш.Д. Минискул¹, А.В. Черных², А.А. Хвощевская⁵

¹ Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева,
Казахстан, г. Алматы

² Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Россия, г. Новосибирск

³ Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, Россия, г. Новосибирск

⁴ АО «Волковгеология», Казахстан, г. Алматы

⁵ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

✉ NovikovDA@ipgg.sbras.ru

Аннотация. **Актуальность** работы заключается в выявлении особенностей распределения радиоактивных элементов в подземных водах Северного Казахстана. **Цель:** обобщение имеющихся данных по геохимии подземных вод и распределению в них урана и радона на примере северных районов Республики Казахстан. **Методы.** Обобщение многолетних гидрогеохимических исследований и составление электронного банка данных по территории Северного Казахстана. Лабораторное изучение химического состава подземных вод проводилось в Проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии Инженерной школы природных ресурсов Томского политехнического университета. Измерение содержаний ²²²Rn в водах проводилось на комплексе «Альфарад плюс» в лаборатории гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН. **Результаты.** Изучены подземные воды разновозрастных водоносных горизонтов, распространенных на территории Северного Казахстана (Северо-Казахстанская урановорудная провинция). Установлены две геохимические совокупности подземных вод. Первая характеризуется доминированием в составе вод HCO₃⁻ и Mg²⁺, а вторая – Cl⁻ и Na⁺. Изменение состава и рост величины общей минерализации с 0,1 до 49 г/дм³ в направлении с севера на юг указывают на развитие процессов континентального засоления. В природных водах первой группы содержания урана изменяются от 0,065 до 16000 мкг/дм³ и активность радона от 4 до 3885 Бк/дм³. Для хлоридных натриевых вод второй совокупности концентрации могут достигать 32500 мкг/дм³, а активность радона составляет 6–59 Бк/дм³, поскольку эманурующий коллектор (гранитоиды) расположен севернее – на расстоянии 80–100 км. Закономерно источниками урана выступают гранитоидные массивы изучаемого региона. Их дренирование речной сетью приводит к его выносу и концентрированию на геохимических барьерах в подземных водах неоген-четвертичного водоносного горизонта. Такое распространение радиоактивных элементов связано с высокой миграционной способностью урана в растворе в форме уранил-иона в окислительных геохимических обстановках.

Ключевые слова: радоновые воды, уран-238, радон-222, Северный Казахстан, Обь-Зайсанская складчатая область

Благодарности: Обобщение гидрогеохимических материалов по Северному Казахстану выполнено при финансовой поддержке гранта Министерства образования и науки Республики Казахстан № AP22685193, аналитические работы по изучению химического состава подземных вод Обь-Зайсанской складчатой области – при поддержке проекта № 22-17-20029 Российского научного фонда и Правительства Новосибирской области.

Для цитирования: Уран в подземных водах Северного Казахстана / Н.А. Медешова, Д.А. Новиков, Е.С. Ауелхан, А.А. Антоненко, А.А. Максимова, А.С. Деркачев, Ф.Ф. Дульцев, А.М. Орынбек, Ш.Д. Минискул, А.В. Черных, А.А. Хвощевская // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 10. – С. 203–215. DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4766

UDC 551.464.3 (1-924.71)

DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4766

Uranium in groundwaters of North Kazakhstan

N.A. Medeshova¹, D.A. Novikov^{2,3}✉, E.S. Auelkhan¹, A.A. Antonenko¹,
A.A. Maksimova^{2,3}, A.S. Derkachev², F.F. Dultsev², A.M. Orynbeke⁴,
Sh.D. Miniskul¹, A.V. Chernykh², A.A. Khvacshetskaya⁵

¹ Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

² Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

³ Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

⁴ Volkovgeology JSC, Almaty, Kazakhstan

⁵ National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

✉ NovikovDA@ipgg.sbras.ru

Abstract. Relevance. The need to identify the characteristics of the distribution of radioactive elements in the groundwater of Northern Kazakhstan. **Aim.** Generalization of available data on the geochemistry of groundwater and uranium and radon distribution in them using the example of the northern regions of the Republic of Kazakhstan. **Methods.** Generalization of long-term hydrogeochemical research and compilation of an electronic data bank on the territory of Northern Kazakhstan. A laboratory study of the chemical composition of groundwater was carried out at the Research Laboratory of Hydrogeochemistry of the School of Natural Resources Engineering of Tomsk Polytechnic University. Measurements of ²²²Rn contents in waters were carried out using the Alfarad Plus complex in the Laboratory of Hydrogeology of Sedimentary Basins of Siberia, Institute of Geology and Geography, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences. **Results.** The groundwater of aquifers of different ages, distributed in the territory of Northern Kazakhstan (North Kazakhstan uranium province), was studied. Two geochemical sets of groundwater were identified. The first is characterized by the dominance of HCO₃⁻ and Mg²⁺ in the water composition, and the second by Cl⁻ and Na⁺. A change in composition and an increase in the value of total mineralization from 0.1 to 49 g/dm³, in the direction from north to south, indicate the development of continental salinization. In natural waters of the first group, uranium content varies from 0.065 to 16000 µg/dm³ and radon activity from 4 to 3885 Bq/dm³. For sodium chloride waters of the second set, concentrations can reach 32500 µg/dm³, and radon activity is 6–59 Bq/dm³, since the emanating reservoir (granitoids) is located to the north – at a distance of 80–100 km. Naturally, granitoid massifs of the studied region are sources of uranium. Their drainage by the river network leads to its removal and concentration on geochemical barriers in the groundwater of the Neogene-Quaternary aquifer. This distribution of radioactive elements is associated with the high migration ability of uranium in solution in the form of uranyl ion in oxidizing geochemical conditions.

Keywords: radon waters, uranium-238, radon-222, Northern Kazakhstan, Ob-Zaisan folded region

Acknowledgements: A generalization of hydrogeochemical materials for Northern Kazakhstan was carried out with the financial support of a grant from the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan no. AP22685193, analytical work to study the chemical composition of groundwater in the Ob-Zaisan folded region – with the support of project no. 22-17-20029 of the Russian Science Foundation and the Government of the Novosibirsk Region.

For citation: Medeshova N.A., Novikov D.A., Auelkhan E.S., Antonenko A.A., Maksimova A.A., Derkachev A.S., Dultsev F.F., Orynbeke A.M., Miniskul Sh.D., Chernykh A.V., Khvacshetskaya A.A. Uranium in groundwaters of North Kazakhstan. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 10, pp. 203–215. DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4766

Введение

Во многих регионах мира степень гидрогеохимической изученности источников нецентрализованного водоснабжения населения (родников, колодцев и водозаборных скважин) остается крайне низкой. Изучение состава подземных вод различного изотопно-геохимического облика, включая комплекс радиохимических данных, представляет огромную важность при оценке их качества для целей питьевого водоснабжения населения. Рекон-

струкция процессов миграции, переноса, рассеивания и концентрирования химических элементов, особенно радионуклидов, в разных геохимических средах вызывает огромный интерес в мировом научном сообществе. Распределение химических элементов в разных типах подземных вод и их поведение при водной миграции до настоящего времени вызывает большую дискуссию, как и рудообразующая роль системы вода–порода. Основными источниками растворенных в водах веществ высту-

пают в первую очередь горные породы и органическое вещество. Для того чтобы определить, каково было влияние водовмещающих пород на изотопно-геохимические особенности вод, детально изучаются их изотопный и микрокомпонентный состав. Анализируются фазы-концентраторы микрокомпонентов, изучается их устойчивость в водной среде.

Актуальные работы по изучению распределения радиоактивных элементов (в первую очередь урана) в подземных водах различных гидрогеологических структур связаны с исследованиями во многих регионах мира: Китае [1–4], Корее [5], России [6], Индии [7–9], Бразилии [10], Эфиопии [11], Намибии [12], Афганистане [13], США [14], Канаде [15], Германии [16] и т. д. К сожалению, по подземным водам Республики Казахстан таких обобщений в последние годы не было. В этой связи целью настоящей работы является обобщение имеющихся данных по геохимии подземных вод и распределению в них урана и радона на примере северных районов Республики Казахстан (Северо-Казахстанская урановорудная провинция). В качестве объекта сравнения рассмотрены подземные воды Обь-Зайсанской складчатой области (часть Кулундино-Енисейской урановорудной зоны) в граничных районах Российской Федерации, где было открыто Пригородное месторождение урана (рис. 1).

Материалы и методы

Проведено обобщение фондовых данных по подземным водам Северного Казахстана (электронная база данных с результатами гидрогеохимического опробования составляет 310 записей). Было проведено сравнение этих данных с данными по подземным водам Обь-Зайсанской складчатой области, которые изучены методами титриметрии, ионной хроматографии, масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой в ПНИЛ гидрогеохимии Инженерной школы природных ресурсов ТПУ. Название химического типа воды дано в соответствии с формулой М.Г. Курлова (более 10 %-экв) по оттеночному принципу от меньшего к большему. Измерение содержаний ^{222}Rn в водах проводилось на комплексе «Альфарад плюс» в лаборатории гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

Особенности геологического строения и гидрогеологии

Казахстан обладает крупными запасами урана. Урановые месторождения распространены как в палеозойском складчатом основании, так и в мезозой-кайнозойском платформенном чехле. Палеозойские гидротермальные месторождения урана

связаны с девонским краевым вулканно-плутоническим поясом. Они известны как в самом вулканно-плутоническом поясе, так и в тыловой магматической дуге этого пояса. В обоих случаях месторождения урана приурочены к тем участкам, где под магматогенными породами пояса имеется докембрийский фундамент: в вулканно-плутонической дуге ураноносна его юго-западная ветвь, а в тыловом магматическом поясе – часть, приуроченная к Кокчетавской глыбе и ее обрамлению, многочисленны урановые месторождения мезозой-кайнозойского платформенного чехла. Наибольший промышленный интерес представляют эпигенетические пластово-инфильтрационные месторождения региональных зон пластового окисления в мел-палеогеновых отложениях. Многочисленные экзодиагенетические грунтово-инфильтрационные урановые проявления встречаются по всему разрезу мезозой-кайнозойского платформенного чехла от триаса до четвертичных отложений. Они приурочены к континентальным палеодолинно-пойменным-аллювиальным отложениям и по запасам редко достигают масштабов мелкого месторождения [17, 18].

Исследуемая территория в геологическом плане относится к территории Западно-Сибирской низменности, Тургайской ложбины, Казахстанской складчатой системы и юго-восточной части Уральских гор. Геологическое строение обуславливает разделение площади на следующие гидрогеологические бассейны: Большеуральский на западе, Приарало-Тургайско-Шу-Сарысуский на юго-западе, Шынгыс-Кокшетауский и Тениз-Коргалжынский на юге, а также Западно-Сибирский бассейн, охватывающий северо-запад, север и восток. В географическом плане, район исследования расположен в пределах полупустынной зоны. Многообразие факторов, определяющих гидрогеологические условия, обуславливает различие в количестве и качестве природных вод, распространенных на территории Северного Казахстана. К этим факторам относятся: климат, рельеф, характер зоны аэрации, геологическое строение и физико-механические свойства водовмещающих пород.

В геологическом строении изучаемой территории принимают участие два типа структур: приподнятые горноскладчатые области и разграничивающие их прогибы фундамента. Прогибы заполнены значительной толщей рыхлых мезозой-кайнозойских осадочных отложений. Водонесные горизонты в прогибах разделены водоупорными толщами и образуют крупные артезианские бассейны, а воды относятся к пластово-поровому типу. В горноскладчатых областях, в свою очередь, воды безнапорные трещинные и пластово-трещинные [19].

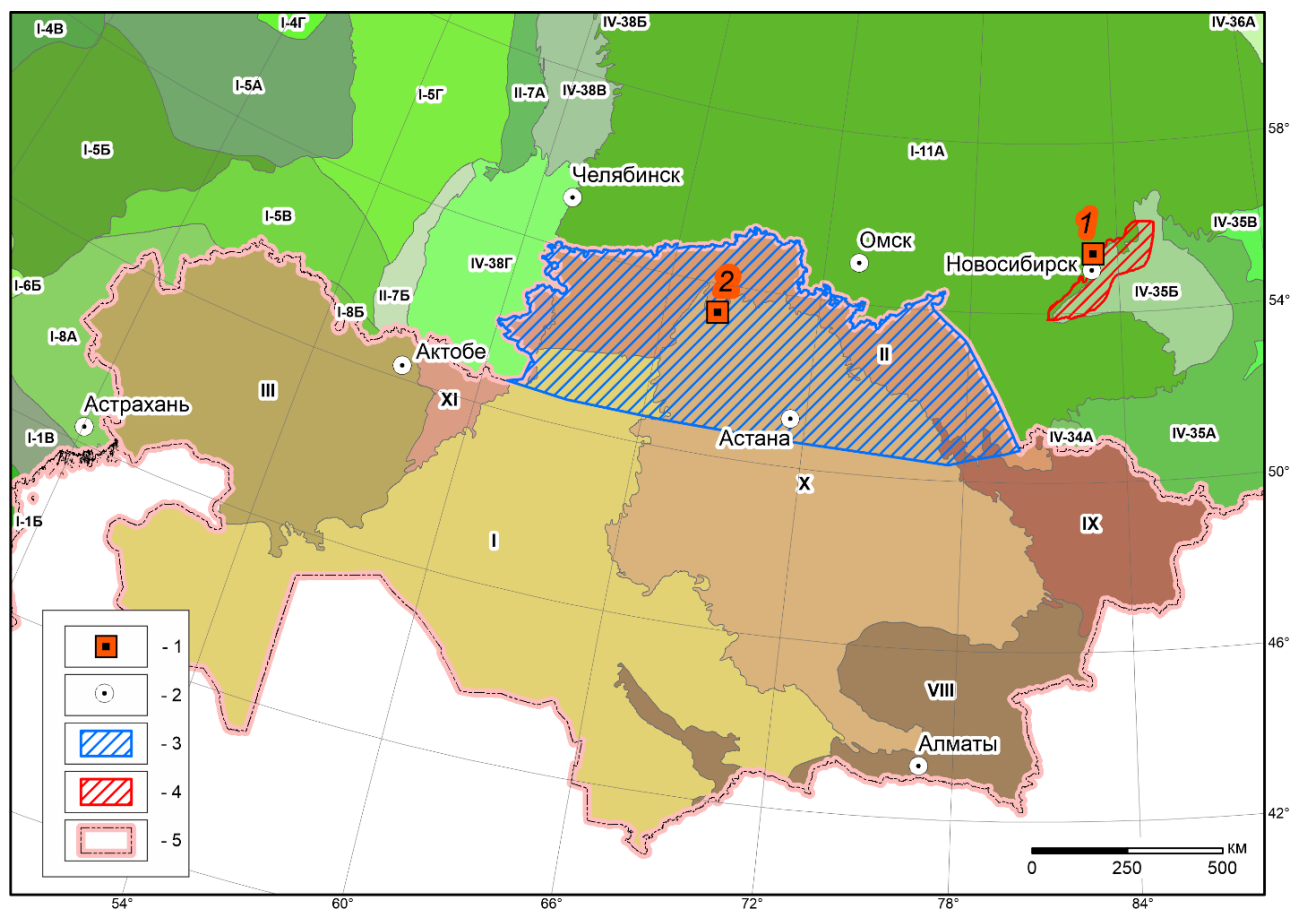


Рис. 1. Местоположение района исследований. Условные обозначения: 1 – месторождение урана: 1 – Пригородное, 2 – Грачевское; 2 – крупный город; 3 – территория исследования в пределах республики Казахстан; 4 – территория исследований в пределах России (фрагмент Обь-Зайсанской складчатой области); 5 – государственная граница. Гидрогеологические структуры в пределах России: I-1Б – Восточно-Предкавказский АБ; I-1В – Ергенинский АБ; I-4А – Северо-Двинский АБ; I-4В – Московский АБ; I-4Г – Ветлужский АБ; I-5А – Волго-Сурский АБ; I-5Б – Приволжско-Хоперский АБ; I-5В – Сыртовский АБ; I-5Г – Камско-Вятский АБ; I-6Б – Донецко-Донской АБ; I-8А – Северо-Каспийский АБ; I-8Б – Эмбенский АБ; II-7А – Юрюзано-Сылвинский ПАБ; II-7Б – Бельский ПАБ; I-10Б – Печорский АБ; I-10В – Печеро-Предуральский ПАБ; I-11А – Иртыш-Обской АБ; I-11Б – Тазовско-Пурский АБ; I-14А – Камо-Вельминский АБ; I-14Е – Восточно-Енисейский АБ; IV-10А – Канино-Тиманская ГСО; IV-34А – Жарминско-Алтайская ГСО; IV-35А – Алтае-Саянская ГСО; IV-35Б – Кузнецкая ГСО; IV-36А – Северо-Енисейская ГСО; IV-38Б – Северо-Уральская ГСО; IV-38Г – Южно-Уральская ГСО. Гидрогеологические структуры в пределах Казахстана: I – Скифско-Туранический регион; II – Западно-Сибирский регион; III – Восточно-Европейский регион; VIII – Жетысу-Алатау-Тянь-Шаньский регион; IX – Енисей-Саяно-Алтайский регион; X – Центрально-Казахстанский регион; XI – Таймыро-Уральский регион

Fig. 1. Location of the study area. Legend: 1 – uranium deposit: 1 – Prigorodnoe, 2 – Grachevskoe; 2 – large city; 3 – study area within the Republic of Kazakhstan; 4 – research area within Russia (fragment of the Ob-Zaisan folded region); 5 – state border. Hydrogeological structures within Russia: I-1B – East Pre-Caucasian AB; I-1B – Ergeninsky AB; I-4A – North Dvina AB; I-4B – Moscow AB; I-4G – Vetluzhsky AB; I-5A – Volgo-Sursky AB; I-5B – Privolzhsko-Khopersky AB; I-5B – Syrtovsky AB; I-5G – Kama-Vyatsky AB; I-6B – Donetsk-Don AB; I-8A – North Caspian AB; I-8B – Embensky AB; II-7A – Yuryuzano-Sylvinsky PAB; II-7B – Belsky PAB; I-10B – Pechora AB; I-10B – Pechero-Preduralsky PUB; I-11A – Irtysh-Ob AB; I-11B – Tazovsko-Pursky AB; I-14A – Kamo-Velminsky AB; I-14E – East Yenisei AB; IV-10A – Kaniino-Timan GSO; IV-34A – Zharminsko-Altai GSO; IV-35A – Altai-Sayan GSO; IV-35B – Kuznetsk GSO; IV-36A – North Yenisei GSO; IV-38B – North Ural GSO; IV-38B – Sredneural'skaya GSO; IV-38G – South Ural GSO. Hydrogeological structures within Kazakhstan: I – Scythian-Turanian region; II – West Siberian region; III – Eastern European region; VIII – Zhetysu-Alatau-Tien Shan region; IX – Yenisei-Sayan-Altai region; X – Central Kazakhstan region; XI – Taimyr-Ural region

Степень выветривания и трещинноватости пород, рельеф территории контролируют глубину циркуляции, водообильность и качество подземных вод в пределах горноскладчатых областей. К зонам тектонических нарушений приурочены значительные глубины циркуляции (150 м и более), там же располагаются наиболее водообильные участки. Меньшей водообильностью обладают трещинноватые эффузивные породы, где трещины залечиваются кальцитом и глиной. Минерализация вод значительно различается в зависимости от типа структур. Пресные воды находятся в трещинноватых породах, выходящих на дневную поверхность. Слабоминерализованные воды обнаруживаются в районах горноскладчатых областей. Соленоватые и соленые воды локализованы в пределах участков, где скальные породы перекрыты водоупорными отложениями коры выветривания, в качестве которых выступают глины палеогенового, неогенового и четвертичного возрастов [19].

Территории Тургайской ложбины и Западно-Сибирской низменности характеризуются развитием крупных артезианских бассейнов, разделенных структурными поднятиями. Главными гидрогеологическими подразделениями являются выдержанные на значительных площадях водоносные горизонты мелового, эоценового и олигоценового возраста. Преобладающие в разрезе глинистые толщи затрудняют инфильтрацию атмосферных осадков и

способствуют формированию вод повышенной минерализации. Благоприятные условия для инфильтрационных процессов и питания близких к дневной поверхности водоносных горизонтов создаются лишь на участках выходов хорошо водопроницаемых пород [19].

Особенности гидрогеохимии

Подземные воды Шынгыс-Кокшетауского бассейна характеризуются преимущественно $\text{Cl-SO}_4\text{-HCO}_3\text{ Na-Ca-Mg}$ составом (рис. 2, а) с величиной общей минерализации, изменяющейся от 0,1 до 11,4 г/дм³. Воды нейтральные, слабощелочные и щелочные (рН 6,6–8,9). Гидрогеологический разрез бассейна представлен осадочными отложениями кембрийского, ордовикского, силурийского, девонского, каменноугольного, пермского, триасового, палеогенового и четвертичного возрастов. Величина общей минерализации подземных вод меняется незакономерно, наблюдается инверсионный тип вертикальной гидрогеохимической зональности. Так, в водах, приуроченных к кембрийско-силурийским отложениям, она составляет 1,1–1,4 г/дм³, девонским и каменноугольным – 2,1–2,3 г/дм³, пермским – 1,1 г/дм³, триасовым – 2,2 г/дм³, палеогеновым – 1,3 г/дм³ и четвертичным – 2,2 г/дм³. Значения геохимических коэффициентов в среднем равны для Ca/Na 0,81, Ca/Mg 1,81, rNa/rCl 3,01, SO_4/Cl 2,26 (рис. 3, а, б).

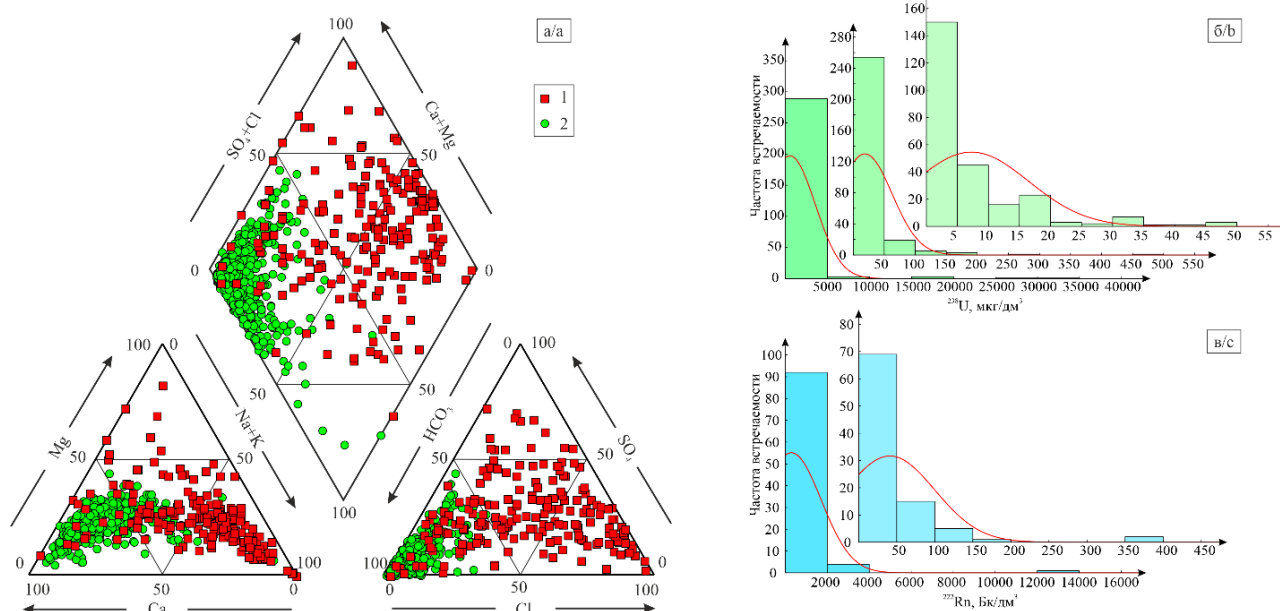


Рис. 2. Диаграмма Пайпера химического состава подземных вод (а) Северного Казахстана (1) и Обь-Зайсанской складчатой области (2); распределение урана-238 (б) и радона-222 (в) в подземных водах Северного Казахстана

Fig. 2. Piper diagram of the chemical composition of groundwater (а) in Northern Kazakhstan (1) and the Ob-Zaisan folded region (2) and the distribution of uranium-238 (б) and radon-222 (с) in groundwater in Northern Kazakhstan

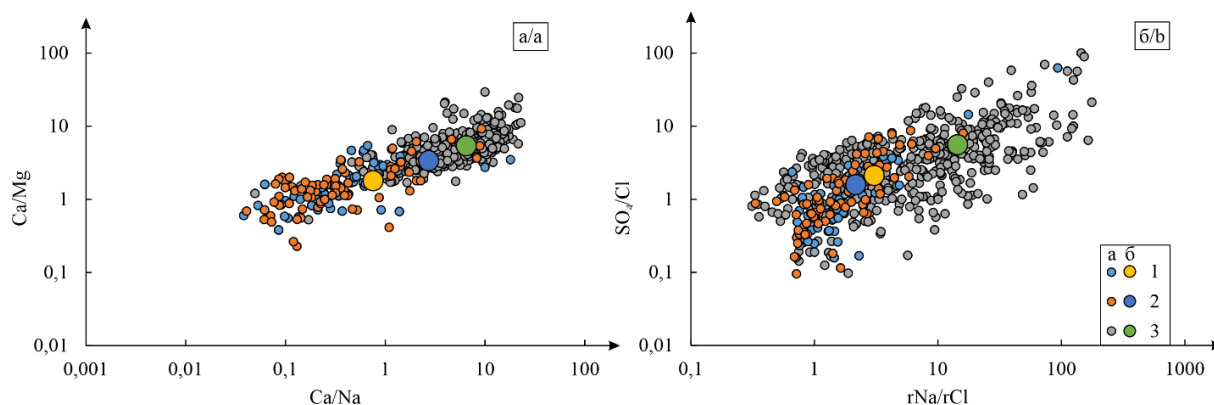


Рис. 3. Геохимическая типизация природных вод по коэффициентам Ca/Mg – Ca/Na (а), SO_4/Cl – rNa/rCl (б); 1 – подземные воды Шынгыс-Кокшетауского бассейна (а) и среднее по ним (б); 2 – подземные воды Тениз-Коргалжынского бассейна (а) и среднее по ним (б); 3 – подземные воды Обь-Зайсанской складчатой области (а) и среднее по ним (б)

Fig. 3. Geochemical typification of natural waters according to the coefficients Ca/Mg – Ca/Na (a), SO_4/Cl – rNa/rCl (b); 1 – groundwater of the Shyngys-Kokshetau basin (a) and the average for them (b); 2 – groundwater of the Teniz-Korgalzhyn basin (a) and the average for them (b); 3 – groundwater of the Ob-Zaisan folded region (a) and the average for them (b)

Подземные воды Тениз-Коргалжынского бассейна в основном $\text{SO}_4\text{--Cl}$ Ca – Mg – Na состава с величиной общей минерализации, изменяющейся в широком диапазоне от 0,2 до 49 г/дм³. Воды также нейтральные, слабощелочные и щелочные (рН 6,5–9,1). Установлено, что величина общей минерализации значительно изменяется в водах, приуроченных к отложениям пермского, палеогенового, неогенового и четвертичного возрастов, и в среднем составляет 3,4, 7,6, 3,4 и 4,2 г/дм³ соответственно. В водах отложений кембрийско-каменноугольного возраста минерализация в среднем изменяется от 1,0 до 2,2 г/дм³. Тип гидрогеохимической зональности также инверсионный. Значения геохимических коэффициентов Ca/Na и Ca/Mg сопоставимы с таковыми в водах Шынгыс-Кокшетауского бассейна и составляют 0,87 и 1,93, однако выявлено небольшое понижение в величинах отношений rNa/rCl (2,29) и SO_4/Cl (1,88) (рис. 3, а, б).

В Приарало-Тургайско-Шу-Сарысуком бассейне развиты подземные воды $\text{SO}_4\text{--HCO}_3$ Na – Mg – Ca состава с величиной общей минерализации 0,3–2,1 г/дм³. Воды нейтральные (рН 7–7,5) и слабощелочные (рН 7,6). Значения Ca/Na и Ca/Mg возрастают относительно описанных выше бассейнов и составляют 1,77 и 3,40 соответственно, а величины rNa/rCl (1,17) и SO_4/Cl (1,07) снижаются (рис. 3, а, б).

В граничных районах Западно-Сибирского артезианского бассейна распространены подземные воды смешанного состава при доминировании соленоватых и соленых вод с преобладанием хлорид-иона 1,15–17,6 г/дм³ и иона натрия 1,09–7,56 г/дм³. Величина общей минерализации изменяется от 0,3 до 35,5 г/дм³, воды нейтральные, слабощелочные и щелочные (рН 6,7–9,6). Они отличаются наиболее высокими из изученных средними значениями ко-

эффициента Ca/Na , который составляет 7,84. Средние величины Ca/Mg (1,80) находятся на уровне вод Шынгыс-Кокшетауского и Тениз-Коргалжынского бассейнов, а средние значения rNa/rCl и SO_4/Cl не превышают 2,30 и 1,14 соответственно (рис. 3, а, б).

В качестве объекта сравнения в граничных районах Российской Федерации рассматривается часть Кулундино-Енисейской урановорудной зоны в пределах Обь-Зайсанской складчатой области (ОЗСО) [20, 21]. Здесь распространены нейтральные и слабощелочные (рН 6,5–8,4) преимущественно HCO_3 Mg – Ca и HCO_3 Mg – Ca – Na воды (рис. 2, а) с величиной общей минерализации 0,2–1,6 г/дм³. Значения геохимических коэффициентов в среднем составляют для Ca/Na 6,48, Ca/Mg 5,37, rNa/rCl 14,41, SO_4/Cl 5,59, что значительно больше, чем в водах на территории Северного Казахстана. Главной особенностью этого региона является отсутствие процессов континентального засоления и наличие в гидрогеологическом разрезе прямой (нормальной) вертикальной гидрогеохимической зональности (рис. 3, а, б).

В пределах Северо-Казахстанской урановорудной провинции отмечается отчетливая дифференциация химических элементов и соединений в составе изученных вод. Наиболее ярко это видно в изменении состава вод в направлении от Шынгыс-Кокшетауского к Тениз-Коргалжынского бассейнов. Так, в первом доминируют гидрокарбонат-ион и ион магния, а во втором – хлорид-ион и ион натрия. Также заметно возрастает величина общей минерализации, которая в первом случае в среднем составляет 1,6 г/дм³, а во втором – 3,3 г/дм³. Такое распределение компонентов указывает на смену обстановок формирования вод от нормальных, в

условиях гумидного климата, до яркого проявления процессов континентального засоления – в аридном. Что также подтверждается сравнением с подземными водами ОЗСО, состав которых формируется в умеренном климатическом поясе. По геохимическим коэффициентам подтверждается взаимодействие вод Шынгыс-Кокшетауского и Тениз-Коргалжынского бассейнов с алюмосиликатными породами. Однако относительно высокие значения Са/Mg в Приарало-Тургайско-Шу-Сарысуком и Западно-Сибирском бассейнах указывают на повышенную долю карбонатной составляющей во вмещающих горных породах (рис. 3, а, б).

Анализ имеющихся данных показал, что в пределах изучаемого региона наиболее высокие содержания урана характеризуют подземные воды Шынгыс-Кокшетауского и Тениз-Коргалжынского бассейнов. В этой связи дальнейшее рассмотрение радиохимических материалов будет сосредоточено на этих гидрогеологических структурах.

Уран в природных водах

В пределах исследуемых структур содержания ^{238}U в подземных водах изменяются на шесть математических порядков и варьируют от 0,005 до 32500 мкг/дм³, составляя в среднем 519,3 мкг/дм³ (рис. 2, б, таблица). Максимальные значения кон-

центраций более 16000 мкг/дм³ установлены в западной части Тениз-Коргалжынского артезианского бассейна (юго-запад территории исследования), южной, западной и северо-западной частях Шынгыс-Кокшетауского артезианского бассейна (центр и северо-запад территории исследования) (рис. 4). Активность ^{222}Rn варьирует в широких пределах от первых единиц до 4000 Бк/дм³, составляя в среднем 185 Бк/дм³. В пределах Тениз-Коргалжынского артезианского бассейна его активность не превышает 60 Бк/дм³, в Шынгыс-Кокшетауском артезианском бассейне изменяется от 3,7 до 3885 Бк/дм³, в среднем составляя 280 Бк/дм³ (рис. 2, в).

В границах Тениз-Коргалжынского артезианского бассейна содержания урана в подземных водах изменяются от 0,005 до 32500 мкг/дм³, составляя в среднем 1267 мкг/дм³. Максимальными концентрациями характеризуются подземные воды западной части бассейна (р-н города Атбасар), в центральных районах они могут достигать 3000–6500 мкг/дм³, на востоке установлены воды с диапазонами значений до 1000–1500 мкг/дм³ (рис. 4). Наиболее обогащенные ураном подземные воды выявлены преимущественно в водоносных комплексах каменноугольного и четвертичного возрастов на глубинах до 30 м, где его концентрации превышают 3000 мкг/дм³.

Таблица. Распределение урана и радона в подземных водах Северного Казахстана

Table. Uranium and radon distribution in groundwater in Northern Kazakhstan

Возраст Age	Химический тип Chemical type	М	pH	²³⁸ U	²²² Rn	Кол-во проб Number of samples
		г/дм³/g/dm³		мкг/дм³/kg/dm³	Бк/дм³/Bk/dm³	шт./un.
Гидрогеологические подразделения Северного Казахстана/Hydrogeological units of Northern Kazakhstan						
Q	SO ₄ -Cl-HCO ₃ Mg-Na-Ca	<u>0.2-49</u> 2,8	<u>6.6-8.3</u> 7,5	<u>0.1-32500</u> 832	<u>4-107</u> 31	75
N	SO ₄ -Cl-HCO ₃ Mg-Ca	<u>0.3-35</u> 6,2	<u>7.1-8.2</u> 7,6	<u>0.7-26000</u> 1548	11	19
P	SO ₄ -HCO ₃ Na-Mg-Ca	<u>0.2-21</u> 3,0	<u>6.7-9.6</u> 7,3	<u>0.1-4870</u> 179	<u>2-15</u> 9	30
K	SO ₄ -Cl Mg-Ca-Na	8,2	7,4	0,5	-	1
T	SO ₄ -HCO ₃ -Cl Ca-Mg-Na	2,2	7,9	23	-	1
P	HCO ₃ -SO ₄ -Cl Mg-Na	<u>0.5-13</u> 2,3	<u>6.5-8.4</u> 7,4	<u>0.01-98</u> 11	<u>9-90</u> 27	27
C	Cl-SO ₄ -HCO ₃ Mg-Ca-Na	<u>0.2-28</u> 3,3	<u>6.6-9.1</u> 7,6	<u>0.2-16200</u> 790	<u>7-55</u> 25	52
D	SO ₄ -Cl-HCO ₃ Ca-Mg-Na	<u>0.2-6.2</u> 2,1	<u>7.0-8.3</u> 7,5	<u>0.13-16200</u> 906	<u>40-370</u> 150	22
S	SO ₄ -Cl Ca-Mg-Na	<u>1.4-9.4</u> 5,4	7,7	<u>1.3-16.3</u> 7,5	22	3
O	SO ₄ -Cl Ca-Mg-Na	<u>0.1-5.9</u> 1,4	<u>7.0-8.9</u> 7,7	<u>0.1-162</u> 21	<u>6-2960</u> 263	28
Є	Cl-SO ₄ -HCO ₃ Na-Mg-Ca	<u>0.4-3.1</u> 1,4	<u>6.9-7.7</u> 7,3	<u>2-487</u> 76	<u>6-3885</u> 1466	11
Гидрогеологические подразделения Обь-Зайсанской складчатой области Hydrogeological units of the Ob-Zaisan folded region						
C	HCO ₃ Mg-Na-Ca	<u>0.3-1.3</u> 0,7	<u>7.4-8.0</u> 7,7	<u>0.04-13</u> 3	<u>2-68</u> 32	23
D	HCO ₃ Mg-Ca	<u>0.2-1.5</u> 0,6	<u>6.1-8.3</u> 7,5	<u>0.0007-200</u> 3,8	<u>1-1161</u> 46	374
Є	HCO ₃ Mg-Ca	<u>0.3-0.8</u> 0,5	<u>7.1-8.0</u> 7,4	<u>0.8-4.6</u> 2,4	<u>2-32</u> 10	17

Примечание/Note: М – минерализация/mineralization.

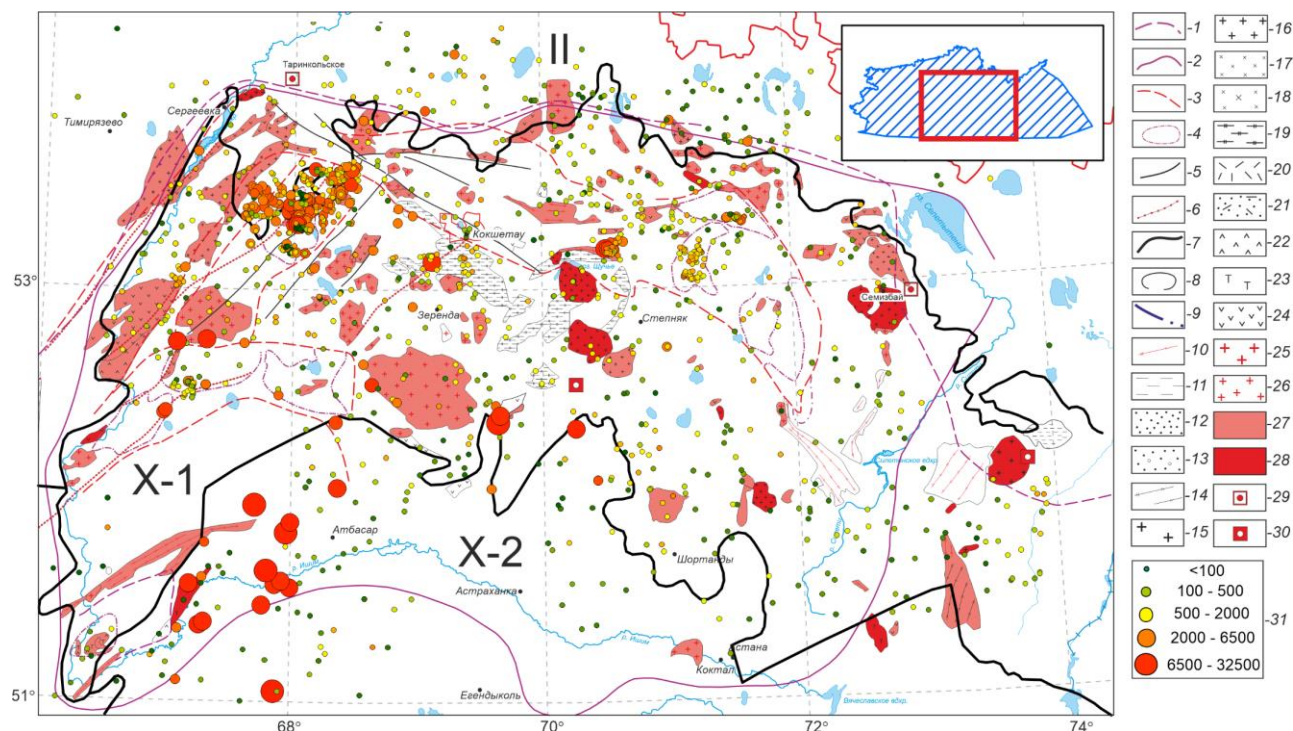


Рис. 4. Радиоэкологическая карта Северного Казахстана. Контуры палеозойских металлогенических подразделений: 1 – металлогенический пояс с потенциальной ураноносностью; 2 – урановорудные провинции; 3 – урановорудные и редкометалльно-уран-ториевые структурно-металлогенические зоны; 4 – урановорудные районы; Разрывные нарушения: 5 – установленные 1 порядка; 6 – разрывные нарушения – каналы поступления радионуклидов; 7 – границы гидрогеологических подразделений: II – Западно-Сибирский регион; X-1 – Шынгыс-Кокшетауский бассейн; X-2 – Тениз-Коргалжинский бассейн; 8 – контуры геологических формаций; Границы выклинивания ЗПО: 9 – области распространения торийсодержащих редкоземельно-титановых россыпей; 10 – кремнисто-углеродистые сланцы; Литологические типы пород с повышенным радиационным фоном: Осадочные – 11 – угленосные; 12 – песчаные; 13 – песчано-гравелистые; 14 – кремнисто-углеродистые сланцы, углеродистые песчаники; Интрузивные – 15 – аляскитовые граниты; 16 – нормальные граниты; 17 – гранодиориты; 18 – диориты; 19 – гранитизированные метаморфиты; Вулканогенные: 20 – риолиты; 21 – туфы риолитов; 22 – дациты; 23 – трахиты; 24 – андезиты; Специализированные на уран и торий горные породы $U > 10$ г/т, $Th > 35$ г/т: 25 – аляскиты; 26 – граниты; Поля распространения геологических формаций с высокими содержаниями урана и тория: 27 – $U - 5-10$ г/т; $Th - 10-35$ г/т; 28 – $U > 10$ г/т; $Th > 35$ г/т; В мезозойско-кайнозойских отложениях – 29 – экзодиагенетические урановые проявления в сероцветных отложениях палеодолин; 30 – то же в существенно глинистых аллювиально-озерных отложениях; 31 – содержание урана в пробе воды, $\mu\text{г}/\text{дм}^3$

Fig. 4. Radioecological map of Northern Kazakhstan. Contours of Paleozoic metallogenetic units: 1 – metallogenetic belt with potential uranium content; 2 – uranium ore provinces; 3 – uranium ore and rare metal-uranium-thorium structural-metallogenetic zones; 4 – uranium ore areas; Rupture violations: 5 – established 1st order; 6 – discontinuities – channels for the entry of radionuclides; 7 – boundaries of hydrogeological divisions: II – West Siberian region; X-1 – Shyngys-Kokshetau basin; X-2 – Teniz-Korgalzhinsky basin; 8 – contours of geological formations; Boundaries of WPO pinchout: 9 – areas of distribution of thorium-containing rare-earth-titanium placers; 10 – siliceous-carbonaceous shales; Lithological types of rocks with increased background radiation: Sedimentary – 11 – coal-bearing; 12 – sandy; 13 – sand-gravelite; 14 – siliceous-carbonaceous shales, carbonaceous sandstones; Intrusive – 15 – alaskite granites; 16 – normal granites; 17 – granodiorites; 18 – diorites; 19 – granitized metamorphites; Volcanogenic: 20 – rhyolites; 21 – rhyolite tuffs; 22 – dacites; 23 – trachytes; 24 – andesites; Rocks specialized for uranium and thorium $U > 10$ g/t, $Th > 35$ g/t: 25 – alaskites; 26 – granites; Fields of distribution of geological formations with high contents of uranium and thorium: 27 – $U - 5-10$ g/t; $Th - 10-35$ g/t; 28 – $U > 10$ g/t; $Th > 35$ g/t; In Mesozoic-Cenozoic deposits – 29 – exodiagenetic uranium occurrences in gray sediments of paleovalleys; 30 – the same in essentially clayey alluvial-lacustrine deposits; 31 – uranium content in the water sample, $\mu\text{g}/\text{dm}^3$

Установленные при гидрогеохимическом опробовании водоносных комплексов кембрийского, ордовикского, девонского и пермского возрастов содержания ^{238}U варьируют от 0,01 до 50 $\mu\text{г}/\text{дм}^3$, в некоторых случаях достигая 162–487 $\mu\text{г}/\text{дм}^3$

(рис. 5, а, таблица). Максимальная активность радона-222 (40–60 $\text{Бк}/\text{дм}^3$) установлена в песчаниках ордовикского, девонского, каменноугольного и пермского комплексов (рис. 5, б, таблица).

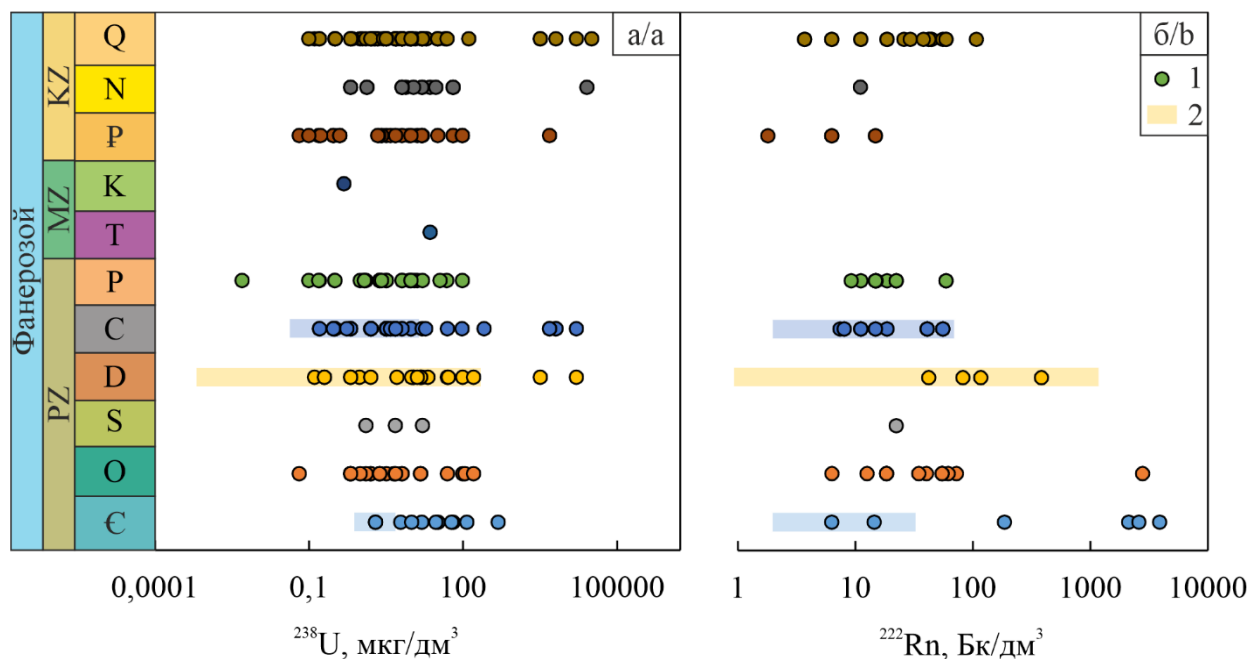


Рис. 5. Распределение урана-238 (а) и радона-222 (б) в разновозрастных водоносных горизонтах, развитых на территории Северного Казахстана. Условные обозначения: 1 – Северный Казахстан; 2 – Обь-Зайсанская складчатая область

Fig. 5. Distribution of uranium-238 (a) and radon-222 (b) in aquifers of different ages developed in Northern Kazakhstan. Legend: 1 – Northern Kazakhstan; 2 – Ob-Zaisan folded region

Концентрации урана в подземных водах Шынгыс-Кокшетауского артезианского бассейна заметно ниже, чем в Тениз-Коргалжынском, и изменяются в диапазоне 0,07–16200 мкг/дм³ при среднем 180 мкг/дм³. Максимальные значения выше 16000 мкг/дм³ установлены в подземных водах переходной зоны бассейнов, в скважине близ села Суворовка. Высокие концентрации ²³⁸U (6500–8000 мкг/дм³) характеризуют подземные воды западной (р-н села Чистополье), северо-западной (р-н села Саулманколь) и северной (окрестности г. Щучинск) частей бассейна (рис. 4). Остальная территория характеризуется содержаниями урана до 2000–4000 мкг/дм³, за исключением восточных районов, где отмечены его минимальные значения (до 100 мкг/дм³). Наиболее обогащенные ураном подземные воды относятся к водоносным комплексам девонского и каменноугольного возрастов (рис. 5, а, таблица). Аномально высокие активности радона-222 более 2000 Бк/дм³ обнаружены в подземных водах кембрийского и ордовикского водоносных горизонтов. В остальных пробах она не превышает 370 Бк/дм³, составляя в среднем 53 Бк/дм³. Наименьшая активность ²²²Rn зафиксирована в водоносных комплексах палеогенового и четвертичного возрастов (рис. 5, б, таблица).

Схожими условиями строения с изучаемой территорией исследования обладает ОЗСО, расположенная в граничных районах Российской Федера-

ции (рис. 1). Здесь распространены гранитоидные массивы пермо-триасового возраста, оказывающие большое влияние на радиоэкологическое состояние региона. Для сравнения их особенностей были выбраны подземные воды водоносных комплексов кембрийского, девонского, каменноугольного возрастов и вод, развитых в пределах гранитных комплексов. Установлено, что содержания ²³⁸U в подземных водах ОЗСО изменяются от 0,0007 до 200 мкг/дм³ в девонских комплексах, в каменноугольном от 0,05 до 13 мкг/дм³, в кембрийском до 5 мкг/дм³ и в гранитных образованиях от 0,005 до 348 мкг/дм³ (рис. 5, а). Активность ²²²Rn в подземных водах в ОЗСО может достигать 43763 Бк/дм³ [22]. В водах девонских отложений активность радона варьирует от 1 до 1161 Бк/дм³, в каменноугольных – от 2 до 68 Бк/дм³, кембрийских – 2–32 Бк/дм³ и гранитных массивах от 1 до 597 Бк/дм³ (рис. 5, б). Таким образом, установлено, что концентрации урана-238 в подземных водах ОЗСО ниже или совпадают с концентрациями в пределах изучаемой территории, при этом активность радона-222 в водоносных комплексах девонского возраста ОЗСО может превышать на порядки таковую в регионе исследования, что связано с наличием в пределах ОЗСО разломной тектоники, а также туфов, туфоконгломератов и глинистых сланцев в составе буготакской и тогучинской нерасчлененных свит девонского возраста.

Заключение

На исследуемой территории выявлена дифференциация химических элементов и соединений в составе изученных вод, которая указывает на смену условий их формирования от нормальных к условиям континентального засоления. По геохимическим коэффициентам подтверждается взаимодействие вод с алюмосиликатными породами. Однако относительно высокие значения Ca/Mg указывают на повышенную долю карбонатной составляющей во вмещающих горных породах.

Установлено, что высокие содержания урана (до 32500 мкг/дм³) приурочены к водам неоген-четвертичного водоносного комплекса Тениз-

Коргальжынского бассейна, распространенным в поймах рек Ишим, Терсаккан. Более низкие концентрации урана проявлены в поле распространения гранитоидных массивов на территории Шынгыс-Кокшетауского артезианского бассейна. Закономерно источниками урана выступают гранитоидные массивы изучаемого региона. Их дренирование речной сетью приводит к его выносу и концентрированию на геохимических барьерах в подземных водах неоген-четвертичного водоносного горизонта. Такое распространение радиоактивных элементов связано с высокой миграционной способностью урана в растворе в форме уранил-иона в окислительных геохимических обстановках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. The behavior of pyrite during in-situ leaching of uranium by CO_2+O_2 : a case study of the Qianjiadian uranium deposit in the Songliao Basin, northeastern China / Y. Fan, H. Song, Z. Wang, N. Gan, C. Zhang, B. Zhao, Z. Xu, Y. Tan // *Ore Geology Reviews*. – 2024. – Vol. 169. – Article 106085. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2024.106085
2. Jurassic sedimentary evolution model and its implication for the sandstone-type uranium mineralization in the Kamusite area in eastern Junggar Basin, NW China / H. Ji, J. Zhong, Z. He, H. Chen, Z. Li, M. Qin, B. Zhu, Y. Wu, Q. Dong // *Ore Geology Reviews*. – 2024. – Vol. 168. – Article 106042. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2024.106042
3. Effects of uranium mining on soil bacterial communities and functions in the Qinghai-Tibet plateau / Q. Li, Z. Xiong, P. Xiang, L. Zhou, T. Zhang, Q. Wu, C. Zhao // *Chemosphere*. – 2024. – Vol. 347. – Article 140715. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2023.140715
4. Hydrogeochemical characteristics and enrichment regularities of groundwater uranium in the Erlan Basin, China / B. Zhang, T. Yan, X. Wang, Y. Qiao, H. Liu, B. Zhang // *Applied Geochemistry*. – 2024. – Article 106094. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2024.106094
5. Health risk assessment of uranium intake from private residential drinking groundwater facilities based on geological characteristics across the Republic of Korea / S. Hashemi, I. Shin, S.-O. Kim, W.-C. Lee, S.-W. Lee, D. H. Jeong, M.S. Kim, H. Kim, Ji. Yang // *Science of The Total Environment*. – 2024. – Vol. 913. – Article 169252. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.169252
6. Уран и торий в системе вода–порода (на примере нефтегазоносных отложений северных районов Западной Сибири) / Д.А. Новиков, Л.Г. Вакуленко, П.А. Ян, А.А. Хвощевская // *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири*. – 2023. – № 3 (55). – С. 78–88. DOI: 10.20403/2078-0575-2023-3-78-88
7. Verma M., Loganathan V.A. Hydrogeochemical constraints on uranium contamination of groundwater for drinking water supplies and associated health risks // *Groundwater for Sustainable Development*. – 2023. – Vol. 23. – Article 100973. DOI: 10.1016/j.gsd.2023.100973
8. Mapping of uranium in groundwater of Mysuru district, Karnataka, India and radiation dose to the population / B.S.K. Lavanya, S.N. Namitha, M. Hidayath, B.S. Prathibha, M.S. Chandrashekar // *Nuclear and Particle Physics Proceedings*. – 2023. – Vol. 341. – P. 22–27. DOI: 10.1016/j.nuclphysbps.2023.09.011
9. Rajput U., Swami D., Joshi N. Geospatial analysis of toxic metal contamination in groundwater and associated health risks in the lower Himalayan industrial region // *Science of The Total Environment*. – 2024. – Vol. 938. – Article 173328. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.173328
10. Uranium anomaly in groundwater of the hard rock aquifer system in southeast Brazil / T. de P. Marteleto, A.E.S. de Abreu, M.B.Barbosa, S. Yoshinaga-Pereira, R.A. Bertolo, J. Enzweiler // *Journal of South American Earth Sciences*. – 2024. – Vol. 133. – Article 104733. DOI: 10.1016/j.jsames.2023.104733
11. Tracing contaminants of emerging concern in the Awash River basin, Ethiopia / K. Hailu, S. Kebede, B. Birhanu, D. Lapworth // *Journal of Hydrology: Regional Studies*. – 2024. – Vol. 54. – Article 101869. DOI: 10.1016/j.ejrh.2024.101869
12. New insights into the flow dynamics of a deep freshwater aquifer in the semi-arid and saline Cuvelai-Etosha Basin, Northern Namibia: results of a multi-environmental tracer study / R. Bäuml, R. Purtschert, P. Mueller, T. Krekeler, J.C. Zappala, T. Matsumoto, J. Gröger-Trampe, P. Koeniger, C. Vockenhuber, N. Romeo, J. Mabry // *Journal of Hydrology: Regional Studies*. – 2024. – Vol. 52. – Article 101721. DOI: 10.1016/j.ejrh.2024.101721
13. Geochemical evolution of spring waters in carbonate dominated aquifer in Upper Shirin Tagab sub-basin, northern Afghanistan / A. Zaryab, A. Farahmand, Z. Jafari, S. Ali, F. Alijani, H.R. Nassery // *Groundwater for Sustainable Development*. – 2024. – Vol. 25. – Article 101102. DOI: 10.1016/j.gsd.2024.101102
14. Groundwater uranium contamination from produced water disposal to unlined ponds in the San Joaquin Valley / R.A. Tisherman, R.J. Rossi, S.B.C. Shonkoff, D.C. DiGiulio // *Science of The Total Environment*. – 2023. – Vol. 904. – Article 166937. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.166937
15. Richard D., Rafini S., Walter J. Natural metal contents and influence of salinization in deep Canadian Shield groundwater: Base level versus mineral deposit enrichment halos // *Applied Geochemistry*. – 2024. – Vol. 170. – Article 106078. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2024.106078

16. Nitrate-induced mobilization of trace elements in reduced groundwater environments / J. Filter, C. Schröder, F. El-Athman, U. Dippon-Deissler, G.J. Houben, D. Mahringer // *Science of The Total Environment*. – 2024. – Vol. 927. – Article. 171961. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.171961
17. Жолтаев Г.Ж., Жуков Н.М., Антоненко А.А. Атлас закономерностей размещения месторождений твердых полезных ископаемых Республики Казахстан. – Алматы: ТОО «Институт геологических наук им. К.И. Сатпаева», 2023. – 265 с.
18. Урановые месторождения Казахстана: (экзогенные) / Н.Н. Петров, В.Г. Язиков, Х.Б. Аубакиров, В.Н. Плеханов, А.Ф. Вершков, В.Ф. Лухтин. – Алматы: Гылым, 1995. – 264 с.
19. Гидрогеология СССР. Т. 33. Северный Казахстан / под ред. П.М. Фролов. – М.: Недра, 1966. – 363 с.
20. Radon-rich waters of the Tulinka aquifers, Novosibirsk, Russia / D.A. Novikov, Yu.G. Kopylova, A.N. Pyryaev, A.A. Maksimova, A.S. Derkachev, A.F. Sukhorukova, F.F. Dultsev, A.V. Chernykh, A.A. Khvashchevskaya, P.N. Kalinkin, A.V. Petrozhitsky // *Groundwater for Sustainable Development*. – 2023. – Vol. 20. – Article 100886. DOI: 10.1016/j.gsd.2022.100886.
21. Hydrogeological conditions and hydrogeochemistry of the Kamenskoye hydro-radon occurrence, Novosibirsk, Russia / D.A. Novikov, F.F. Dultsev, A.A. Maximova, A.S. Derkachyov, A.V. Chernykh // *Geochemistry*. – 2023. – Vol. 83. – Iss. 4. – Article 126016. DOI: 10.1016/j.chemer.2023.126016.
22. Monitoring of radionuclides in the natural waters of Novosibirsk, Russia / D.A. Novikov, F.F. Dultsev, A.F. Sukhorukova, A.A. Maksimova, A.V. Chernykh, A.S. Derkachyov // *Groundwater for Sustainable Development*. – 2021. – Vol. 15. – Article 100674. DOI: 10.1016/j.gsd.2021.100674.

Информация об авторах

Назгуль Адильхановна Медешова, младший научный сотрудник Института геологических наук имени К.И. Сатбаева, научный сотрудник кафедры гидрогеологии, инженерной и нефтегазовой геологии Казахского национального исследовательского технического университета имени К.И. Сатпаева, Казахстан, 050013, г. Алматы, ул. Сатпаева, 22. n.medesheva@satbayev.university; <https://orcid.org/0000-0001-9843-8622>

Дмитрий Анатольевич Новиков, кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3/6; доцент кафедры геологии месторождений нефти и газа и кафедры общей и региональной геологии Новосибирского национального исследовательского государственного университета, Россия, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1. NovikovDA@ipgg.sbras.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9016-3281>

Ергали Сатышович Ауелхан, кандидат технических наук, заведующий кафедрой гидрогеологии, инженерной и нефтегазовой геологии Казахского национального исследовательского технического университета имени К.И. Сатпаева, Казахстан, 050013, г. Алматы, г. Алматы, ул. Сатпаева, 22. Y.auyelkhan@satbayev.university; <https://orcid.org/0000-0002-7598-0088>

Анатолий Анатольевич Антоненко, кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией черных и цветных металлов Института геологических наук имени К.И. Сатбаева Казахского национального исследовательского технического университета имени К.И. Сатпаева, Казахстан, 050013, г. Алматы, ул. Сатпаева, 22. a.antonenko@satbayev.university; <https://orcid.org/0000-0003-3025-9227>

Анастасия Алексеевна Максимова, младший научный сотрудник лаборатории гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3/6; ассистент кафедры минералогии и геохимии Новосибирского национального исследовательского университета, Россия, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1. rock.nastaya64@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-5068-555X>

Антон Сергеевич Деркачев, младший научный сотрудник лаборатории гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3/6. a.derkachev@ngs.ru. <https://orcid.org/0000-0001-6101-6573>

Федор Федорович Дульцев, научный сотрудник лаборатории гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3/6. DultsevFF@ipgg.sbras.ru <https://orcid.org/0000-0002-6848-5775>

Адил Муканович Орынбек, главный гидрогеолог Управления геологии АО «Волковгеология», Казахстан, 050012, г. Алматы, ул. Богенбай батыра, 168. adil_83kz@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0004-9754-7412>

Шаттык Догдырхановна Минискул, научный сотрудник Института геологических наук имени К.И. Сатбаева Казахского национального исследовательского технического университета имени К.И. Сатпаева, Казахстан, 050013, г. Алматы, ул. Сатпаева, 22. sh.miniskul@satbayev.university; <https://orcid.org/0000-0001-8878-2008>

Анатолий Витальевич Черных, научный сотрудник лаборатории гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3/6. ChernykhAV@ipgg.sbras.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8680-420X>

Альбина Анатольевна Хвощевская, кандидат геолого-минералогических наук, доцент, заведующая проблемной научно-исследовательской лабораторией гидрогеохимии, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; unp_voda@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4494-2609>

Поступила в редакцию: 05.07.2024

Поступила после рецензирования: 29.09.2024

Принята к публикации: 07.10.2024

REFERENCES

1. Fan Y., Song H., Wang Z., Gan N., Zhang C., Zhao B., Xu Z., Tan Y. The behavior of pyrite during in-situ leaching of uranium by $\text{CO}_2 + \text{O}_2$: a case study of the Qianjiadian uranium deposit in the Songliao Basin, northeastern China. *Ore Geology Reviews*, 2024, vol. 169, article 106085. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2024.106085
2. Ji H., Zhong J., He Z., Chen H., Li Z., Qin M., Zhu B., Wu Y., Dong Q. Jurassic sedimentary evolution model and its implication for the sandstone-type uranium mineralization in the Kamusite area in eastern Junggar Basin, NW China. *Ore Geology Reviews*, 2024, vol. 168, article 106042. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2024.106042
3. Li Q., Xiong Z., Xiang P., Zhou L., Zhang T., Wu Q., Zhao C. Effects of uranium mining on soil bacterial communities and functions in the Qinghai-Tibet plateau. *Chemosphere*, 2024, vol. 347, article 140715. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2023.140715
4. Zhang B., Yan T., Wang X., Qiao Y., Liu H., Zhang B. Hydrogeochemical characteristics and enrichment regularities of groundwater uranium in the Erlan Basin, China. *Applied Geochemistry*, 2024, article 106094. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2024.106094
5. Hashemi S., Shin I., Kim S.-O., Lee W.-C., Lee S.-W., Jeong D. H., Kim M.S., Kim H., Yang Ji. Health risk assessment of uranium intake from private residential drinking groundwater facilities based on geological characteristics across the Republic of Korea. *Science of The Total Environment*, 2024, vol. 913, article 169252. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.169252
6. Novikov D.A., Vakulenko L.G., Yan P.A., Khvashchenskaya A.A. Uranium and thorium in the water-rock system (using the example of oil and gas deposits in the northern regions of Western Siberia). *Geology and mineral resources of Siberia*, 2023, no. 3 (55), pp. 78–88. (In Russ.) DOI: 10.20403/2078-0575-2023-3-78-88
7. Verma M., Loganathan V.A. Hydrogeochemical constraints on uranium contamination of groundwater for drinking water supplies and associated health risks. *Groundwater for Sustainable Development*, 2023, vol. 23, article 100973. DOI: 10.1016/j.gsd.2023.100973
8. Lavanya B.S.K., Namitha S.N., Hidayath M., Prathibha B.S., Chandrashekara M.S. Mapping of uranium in groundwater of Mysuru district, Karnataka, India and radiation dose to the population. *Nuclear and Particle Physics Proceedings*, 2023, vol. 341, pp. 22–27. DOI: 10.1016/j.nuclphysbps.2023.09.011
9. Rajput U., Swami D., Joshi N. Geospatial analysis of toxic metal contamination in groundwater and associated health risks in the lower Himalayan industrial region. *Science of The Total Environment*, 2024, vol. 938, article 173328. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.173328
10. Marteleto T. de P., Abreu A.E.S., Barbosa M.B., Yoshinaga-Pereira S., Bertolo R.A., Enzweiler J. Uranium anomaly in groundwater of the hard rock aquifer system in southeast Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 2024, vol. 133, article 104733. DOI: 10.1016/j.jsames.2023.104733
11. Hailu K., Kebede S., Birhanu B., Lapworth D. Tracing contaminants of emerging concern in the Awash River basin, Ethiopia. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2024, vol. 54, article 101869. DOI: 10.1016/j.ejrh.2024.101869
12. Bäuml R., Putschert R., Mueller P., Krekler T., Zappala J.C., Matsumoto T., Gröger-Trampe J., Koeniger P., Vockenhuber C., Romeo N., Mabry J. New insights into the flow dynamics of a deep freshwater aquifer in the semi-arid and saline Cuvelai-Etoshia Basin, Northern Namibia: Results of a multi-environmental tracer study. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2024, vol. 52, article 101721. DOI: 10.1016/j.ejrh.2024.101721
13. Zaryab A., Farahmand A., Jafari Z., Ali S., Alijani F., Nassery H.R. Geochemical evolution of spring waters in carbonate dominated aquifer in Upper Shirin Tagab sub-basin, northern Afghanistan. *Groundwater for Sustainable Development*, 2024, vol. 25, article 101102. DOI: 10.1016/j.gsd.2024.101102
14. Tisherman R.A., Rossi R.J., Shonkoff S.B.C., DiGiulio D.C. Groundwater uranium contamination from produced water disposal to unlined ponds in the San Joaquin Valley. *Science of The Total Environment*, 2023, vol. 904, article 166937. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.166937
15. Richard D., Rafini S., Walter J. Natural metal contents and influence of salinization in deep Canadian Shield groundwater: Base level versus mineral deposit enrichment halos. *Applied Geochemistry*, 2024, vol. 170, article 106078. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2024.106078
16. Filter J., Schröder C., El-Athman F., Dippon-Deissler U., Houben G.J., Mahringer D. Nitrate-induced mobilization of trace elements in reduced groundwater environments. *Science of The Total Environment*, 2024, vol. 927, article. 171961. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.171961
17. Zholtaev G.Zh., Zhukov N.M., Antonenko A.A. *Atlas of patterns of placement of solid mineral deposits in the Republic of Kazakhstan*. Almaty, LLP "Institute of Geological Sciences named after K.I. Satpayev" Publ., 2023. 265 p. (In Russ.)

18. Petrov N.N., Yazikov V.G., Aubakirov Kh.B., Plekhanov V.N., Vershkov A.F., Lukhtin V.F. *Uranium deposits of Kazakhstan: (exogenous)*. Almaty, Gylym Publ., 1995. 264 p. (In Russ.)
19. Frolov P.M. *Hydrogeology of the USSR*. Vol. 33. Northern Kazakhstan. Moscow, Nedra Publ., 1966. 363 p. (In Russ.)
20. Novikov D.A., Kopylova Yu.G., Pyryaev A.N., Maksimova A.A., Derkachev A.S., Sukhorukova A.F., Dultsev F.F., Chernykh A.V., Khvashchevskaya A.A., Kalinkin P.N., Petrozhitsky A.V. Radon-rich waters of the Tulinka aquifers, Novosibirsk, Russia. *Groundwater for Sustainable Development*, 2023, 20, article 100886. DOI: 10.1016/j.gsd.2022.100886.
21. Novikov D.A., Dultsev F.F., Maximova A.A., Derkachev A.S., Chernykh A.V. Hydrogeological conditions and hydrogeochemistry of the Kamenskoye hydro-radon occurrence, Novosibirsk, Russia. *Geochemistry*, 2023, vol. 83, Iss. 4, article 126016. DOI: 10.1016/j.chemer.2023.126016.
22. Novikov D.A., Dultsev F.F., Sukhorukova A.F., Maksimova A.A., Chernykh A.V., Derkachev A.S. Monitoring of radionuclides in the natural waters of Novosibirsk, Russia. *Groundwater for Sustainable Development*, 2021, vol. 15, article 100674. DOI: 10.1016/j.gsd.2021.100674.

Information about the authors

Nazgul A. Medeshova, Junior Researcher, Researcher, Satbayev University, 22, Satpayev street, Almaty, 050013, Kazakhstan. n.medesheva@satbayev.university; <https://orcid.org/0000-0001-9843-8622>

Dmitry A. Novikov, Cand. Sc., Head of the Laboratory, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3/6, Koptug avenue, Novosibirsk, 630090, Russian Federation; Associate Professor, Novosibirsk State University, 1, Pirogov street, Novosibirsk, 630090, Russian Federation. NovikovDA@ipgg.sbras.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9016-3281>

Ergali S. Auelkhan, Cand. Sc., Head of the Hydrogeology, Engineering and Oil and Gas Geology Department, Satbayev University, 22, Satpayev street, Almaty, 050013, Kazakhstan. Y.auyelkhan@satbayev.university; <https://orcid.org/0000-0002-7598-0088>

Anatoly A. Antonenko, Cand. Sc., Head of the Laboratory of Ferrous and Non-ferrous Metals, Satbayev University, 22, Satpayev street, Almaty, 050013, Kazakhstan. a.antonenko@satbayev.university; <https://orcid.org/0000-0003-3025-9227>

Anastasia A. Maksimova, Junior Researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3/6, Koptug avenue, Novosibirsk, 630090, Russian Federation; Novosibirsk State University, 1, Pirogov street, Novosibirsk, 630090, Russian Federation. rock.nastaya64@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-5068-555X>

Anton S. Derkachev, Junior Researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3/6, Koptug avenue, Novosibirsk, 630090, Russian Federation. a.derkachev@gsu.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6101-6573>

Fedor F. Dultsev, Researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3/6, Koptug avenue, Novosibirsk, 630090, Russian Federation. DultsevFF@ipgg.sbras.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6848-5775>

Adil M. Orynbeke, Chief Hydrogeologist, Volkovgeology JSC, 168, Bogenbay batyr street, Almaty, 050012, Kazakhstan. adil_83kz@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0004-9754-7412>

Shattyk D. Miniskul, Researcher, Satbayev University, 22, Satpayev street, Almaty, 050013, Kazakhstan. sh.miniskul@satbayev.university; <https://orcid.org/0000-0001-8878-2008>

Anatoliy V. Chernykh, Researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3/6, Koptug avenue, Novosibirsk, 630090, Russian Federation. ChernykhAV@ipgg.sbras.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8680-420X>

Albina A. Khvashchevskaya, Cand. Sc., Head of the Scientific Laboratory, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. unpc_voda@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4494-2609>

Received: 05.07.2024

Revised: 29.09.2024

Accepted: 07.10.2024

УДК 556.114.7

DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4497

Шифр специальности ВАК: 02.00.13, 25.00.07

Полиароматические углеводороды малых водоемов Томского района

Д.И. Чуйкина, И.С. Король[✉], Н.А. Мухортина, Ю.В. Колубаева

*Томский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука
Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, г. Томск*

[✉]irinakorol@yandex.ru

Аннотация. Актуальность. Оценка состояния природных вод включает в себя определение целого ряда физико-химических показателей, на основе которых разрабатываются различные индексы и классификации. Однако они не учитывают ряд загрязняющих веществ, оказывающих значительное влияние на состояние водоема, например, полиароматические углеводороды. В статье рассмотрены некоторые аспекты определения приоритетных загрязняющих веществ, к которым относятся полиароматические углеводороды, по критериям экологической опасности: токсичности, канцерогенности, распространенности, частоте встречаемости, источнику происхождения (антропогенному или природному). Учтены гидрохимические показатели, такие как pH, содержание растворенного кислорода, биологического потребления кислорода (БПК₅), содержание ионов для определения качества вод. Проведена попытка оценить влияние полиароматических углеводородов на экологическое состояние водных объектов и учесть их вклад в изменение значений индекса загрязнения вод. Все эти данные показывают актуальность исследования.

Цель: установить состав полиароматических углеводородов в поверхностных водах малых водоемов Томского района для оценки антропогенной нагрузки и показать взаимосвязь с индексами качества природных вод. **Методы:** экстракция, жидкостно-адсорбционная хроматография, высокоэффективная жидкостная хроматография, капиллярный электрофорез, амперометрия, титриметрия. **Результаты.** Исследованы малые озера Томского района на содержание 13 полиароматических углеводородов. Идентификация проводилась методом высокоэффективной жидкостной хроматографии с флуориметрическим детектированием. Суммарное содержание полиароматических соединений в изученных пробах поверхностных вод изменяется от 0,37 до 0,54 мкг/л. В смеси полиароматических углеводородов в водных образцах отмечается повышенное содержание легких 2–3-ядерных полиаренов, обладающих лучшей растворимостью (нафталин, флуорен и фенантрен), а также бенз[а]антрацена. Содержание неорганических компонентов, представленных катионами и анионами, не превышает предельно-допустимых концентраций. Рассчитан индекс загрязненности воды; все озера относятся к умеренно загрязненным, ближе к загрязненным. Показана зависимость коэффициента индекса загрязнения вод от содержания высокомолекулярных полиароматических углеводородов и соотношения высокомолекулярных к низкомолекулярным полиароматическим углеводородам. Показано, что чем выше значение коэффициента индекса загрязнения вод, тем выше доля трудноокисляемых компонентов в поверхностных водах.

Ключевые слова: поверхностные воды, ионный состав, полиароматические углеводороды, антропогенная нагрузка, индекс загрязненности воды, гидрохимические показатели, малые озера

Благодарности: Исследование выполнено в рамках проекта фундаментальных научных исследований Российской академии наук № 0266-2022-0016 «Цифровые гидрогеологические и гидрогеохимические модели нефтегазоносных бассейнов центральных и южных территорий Западной Сибири».

Для цитирования: Полиароматические углеводороды малых водоемов Томского района / Д.И. Чуйкина, И.С. Король, Н.А. Мухортина, Ю.В. Колубаева // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 10. – С. 216–225. DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4497

UDC 556.114.7

DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4497

Polyaromatic hydrocarbons of small reservoirs of the Tomsk region

D.I. Chuikina, I.S. Korol[✉], N.A. Mukhortina, Yu.V. Kolubaeva

*Trofimuk Institute of Petroleum-Gas Geology and Geophysics of Siberian Branch Russian Academy Sciences,
Tomsk Department, Tomsk, Russian Federation*

[✉]irinakorol@yandex.ru

Abstract. Relevance. The assessment of the state of natural waters includes the determination of a number of physico-chemical indicators, on the basis of which various indices and classifications are developed. However, they do not take into account a number of pollutants that have a significant impact on the state of the reservoir, for example, polyaromatic hydrocarbons. The article considers some aspects of determining priority pollutants, which include polyaromatic hydrocarbons, according to environmental hazard criteria: toxicity, carcinogenicity, prevalence, frequency of occurrence, source of origin (anthropogenic or natural). Hydrochemical parameters such as pH, dissolved oxygen content, biological oxygen consumption (BPK₅), and ion content are taken into account to determine water quality. An attempt was made to assess the impact of polyaromatic hydrocarbons on the ecological state of water bodies and to take into account their contribution to changes in the values of the water pollution index. All these data prove the relevance of the study. **Aim.** To establish the composition of polyaromatic hydrocarbons in the surface waters of small reservoirs of the Tomsk region to assess anthropogenic load and to show the relationship with the indices of natural water quality. **Methods.** Extraction, liquid adsorption chromatography, high-performance liquid chromatography, capillary electrophoresis, amperometry, titrimetry. **Results.** Small lakes of the Tomsk region were studied for the content of 13 polyaromatic hydrocarbons. The authors have carried out the identification by high-performance liquid chromatography with fluorimetric detection. The total content of polyaromatic compounds in the studied surface water samples varies from 0.37 to 0.54 mcg/l. In the polyaromatic hydrocarbons mixture in aqueous samples, there is an increased content of light 2–3 nuclear polyarenes with better solubility (naphthalene, fluorene and phenanthrene), as well as benz[a]anthracene. The content of inorganic components represented by cations and anions does not exceed the maximum permissible concentrations. The water pollution index was calculated; all lakes are moderately polluted, closer to polluted. The paper demonstrates the dependence of the water pollution index coefficient on the content of high-molecular polyaromatic hydrocarbons and the ratio of high-molecular to low-molecular polyaromatic hydrocarbons. It is shown that the higher the value of the water pollution index coefficient, the higher the proportion of difficult-to-oxidize components in surface waters.

Keywords: surface waters, ionic composition, polyaromatic hydrocarbons, anthropogenic load, water pollution index, hydrochemical indicators, small lakes

Acknowledgements: The study was carried out within the framework of the project of fundamental scientific research of the Russian Academy of Sciences no. 0266-2022-0016 "Digital hydrogeological and hydrogeochemical models of oil and gas bearing basins in the central and southern territories of Western Siberia".

For citation: Chuikina D.I., Korol I.S., Mukhortina N.A., Kolubaeva Yu.V. Polyaromatic hydrocarbons of small reservoirs of the Tomsk region. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic university. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 10, pp. 216–225. DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4497

Введение

Современные социально-экономические условия в России требуют более детального решения вопросов, связанных с изучением и контролем качества вод, подготовкой питьевых источников, обработкой и утилизацией осадков, образующихся при очистке вод, обнаружением аварийных загрязнений, идентификацией их источников и ликвидацией последствий. Поверхностные воды являются сложными многокомпонентными природными объектами, требующими многостороннего внимания. Нерациональное ведение сельского хозяйства и

увеличение объема бытовых и промышленных стоков приводит к значительному росту количества биогенных и органических веществ, поступающих в водоемы, что ведет к увеличению трофического статуса водоемов, сокращению их биологического разнообразия и ухудшению качества воды. Дополнительной причиной эвтрофирования является поступление биогенов на территорию водосборов с атмосферным переносом [1]. Особую опасность таит в себе поступление в водные экосистемы токсических веществ. В последние годы наблюдается усиленное загрязнение водоемов тяжелыми метал-

лами, фенолами, нефтепродуктами и другими токсикантами. Гидрогеологические показатели не могут дать полного представления о токсичности среды, они не учитывают синергетические, кумулятивные или антагонистические эффекты от одновременного присутствия многих загрязнителей и поэтому не могут служить надежной основой для прогнозирования экологических последствий загрязнения.

Содержание химических веществ в поверхностных водах зависит от гидрологических, геохимических, антропогенных факторов, а также сезонной изменчивости, поэтому они являются сложным объектом для исследований и любого вида оценок, особенно количественных. Классификация состояния природных вод основывается на определении целого ряда физико-химических показателей, включающих в себя температуру, pH, Eh, содержание ионов, тяжелых металлов, нефтяных компонентов и др. В России и странах ЕЭС для оценки качества природных вод используют различные индексы и классификации. Например, индекс загрязненности воды (ИЗВ), баварский индекс (CJ), канадский индекс (CCME WQI) и классификации «Единые критерии качества вод» (ЕККВ), «Удельный комбинаторный индекс загрязненности воды» (УКИЗВ) [2].

Однако они не учитывают содержание полиароматических углеводородов (ПАУ), которые являются канцерогенными соединениями и проявляют мутагенные и токсичные свойства. ПАУ сорбируются и консервируются в донных отложениях водоемов, что позволяет использовать их в качестве индикаторов для оценки антропогенного воздействия на природные водные объекты. В работах [3, 4] показано, что соотношения ПАУ могут использоваться не только как индикаторы источников поступления в водоем, но и как критерий качества водного объекта. Используя соотношение содержания тяжелых металлов и ПАУ в осадках можно оценить экологические риски [5]. Применение таких показателей, как pH, содержание растворенного кислорода, БПК₅, содержание ионов, позволяет оценивать не только качество вод, но и трофический статус водоема [6]. Все эти данные показывают актуальность исследования.

Цель данной работы – установить состав ПАУ в поверхностных водах малых водоемов Томского района для оценки антропогенной нагрузки и показать взаимосвязь с индексами качества природных вод.

Объекты исследования

Для исследования были отобраны пробы поверхностных вод пяти малых водоемов Томского района [7], расположенных в 30-ти километровой

зоне от г. Томска и используемых горожанами для мест активного отдыха и рыбной ловли (рис. 1).



Рис. 1. Схема точек отбора проб малых озер
Fig. 1. Diagram of sampling points of small lakes

Пруд «Савинское озеро» был сформирован плотинной-запрудой в 70-е гг. XX в. Имеет форму неправильного прямоугольника, вытянутого от плотины с северо-востока на юго-восток, ширина озера составляет около 230 м, длина до 1000 м. Общая площадь водного зеркала водоема – 175000 м². Наибольшие глубины южнее плотины зафиксированы на отметках 5–7 м, питание внешними водами с полей, 1,5–2 км восточнее посёлка Зональная Станция и в 2 км западнее деревни Трубочёво. Плотина через природную ложину является одной из дорог между пригородными садоводческими товариществами «Весна» (на севере) и «Красивый пруд» (на юге, восточный берег Савинского озера).

Федосеевское озеро – искусственный водоём (пруд), сформированный плотинной-запрудой, собирающей воды с окружающих лесных и сельскохозяйственных пространств в месте в юго-восточной части территории села Богашёво Томского района. Общая площадь водного зеркала водоема составляет при минимальном заполнении засушливым летом 1320 м², а при максимальном майском наполнении 2650 м². Наибольшие глубины – около 2–2,5 м. Восточный обрывистый берег водоема проходит по части границы природного заказника «Богашёвский кедровник».

Озеро Песчаное – природный уникальный водоём в сосновом лесу Тимирязевского бора (к юго-западу от с. Тимирязевское), Томский район. Озеро имеет почти идеально круглую форму, диаметром около 300 м, глубиной до 3,5 м, берега песчаные. Северо-восточный берег озера застроен домами, южный и юго-западный заболочен. Вода малопрозрачная желтого цвета. В последние годы озеро

подвержено значительному высыханию и зарастанию ряской, и местные дачники ежегодно очищают его и поддерживают уровень водой из рядом находящейся скважины.

Озера Мальцево и Круглое находятся в поселке Самусь Томского района и входят в единую озерную систему, соединенную между собой протокой, приурочены к поверхности второй надпойменной террасы реки Томи, в рельефе располагаются каскадом. Оба озера имеют песчаное дно, вода в них насыщенного коричневого оттенка, питание озер – ручьи, берущие свое начало в торфяных болотах. Озеро Мальцево имеет круглую форму, диаметром около 800 м, максимальная глубина – 5 м, площадь водного зеркала около 280000 м². Озеро Круглое небольшое, диаметр около 600 м, наибольшие глубины составляют 3,5–4 м, площадь водного зеркала около 230000 м².

Материалы и методы исследования

Отбор проб воды проводили в августе 2022 г. с глубины 0,4–0,6 м от поверхности в стеклянную емкость с последующей консервацией н-гексаном. По требованиям аналитических испытаний было отобрано по три пробы с каждой точки отбора.

Определение содержания ПАУ в водном образце проводили в соответствии с действующей методикой государственного экологического контроля ПНД Ф 14.1:2:4.70-96. ПАУ выделяли трехкратной экстракцией н-гексаном из 1 литра пробы с последующей очисткой экстракта методом колоночной хроматографии на оксиде алюминия II ст. активности. Полученный экстракт упаривали до следовых количеств гексана, доводили объем пробы до 1 мл ацетонитрилом. Содержание ПАУ в воде определяли с использованием метода высокоэффективной жидкостной хроматографии на хроматографе Shimadzu LC-20 (Shimadzu, Япония) с одновременным диодноматричным и флуоресцентным детектированием, на обращенно-фазовой колонке 150*4,6 мм SupelcoSil LC-PAH, фаза C18, размер частиц 5 мкм. В качестве элюента использовали смесь ацетонитрила (1 сорт) и бидистиллированной воды. Хроматографирование проводили в градиентном режиме: ацетонитрил/вода=(50:50)–(100:0) первые 20 минут, 100 % ацетонитрила с 20-ой по 40-ю минуту анализа. Скорость потока растворителя составляла 1 мл/мин, объем пробы 20 мкл, рабочая температура колонки 40 °С. Время анализа в выбранных условиях 32 минуты. Спектры фиксировали в интервале 190–500 нм, с регистрацией сигнала на длине волны 254 нм для количественного определения изучаемых компонентов. В пробах поверхностных вод изученных озер были количественно определены в порядке выхода на хроматограммах следующие индивидуальные ПАУ: нафта-

лин (Naphthalene), 2-метилнафталин (2-methylnaphthalene), флуорен (Fluorene), фенантрен (Phenanthrene), антрацен (Anthracene), флуорантен (Fluoranthene), пирен (Piren), бенз[а]антрацен (Benz[a]anthracene), хризен (Chrysene), бенз[б]-флуорантен (Benz[b]fluoranthene), бенз[к]флуорантен (Бенз[к]флуорантен), бенз[а]пирен (Benz[a]pyrene), дибенз[а,һ]антрацен (Dibenz[ah]anthracene).

В соответствии с методиками ПНД Ф 16.1:2:2.2:2.3.74-2012, ПНД Ф 14.1:2:4.167-000, ПНД Ф 14.1:2:3:4.282-18, ПНД Ф 16.1:2:2.3:2.2.69-10 определены массовые концентрации ионного состава воды. Для капиллярного электрофореза образцы воды были подготовлены согласно требованиям работы на приборе «Капель-205» и отфильтрованы на мембранном ацетатно-целлюлозном фильтре пористостью 0,40 мкм (Владипор, Россия). Испытания проводили с использованием системы капельного электрофореза «Капель-205» (Люмэкс, Россия). Нижний порог обнаружения составил 0,004 мг/л.

Биологическое потребление кислорода определяли согласно НДП 10.1:2:3.131-2016 «Методика определения биохимического потребления кислорода после 5 дней инкубации (БПК₅) в пробах питьевых, природных и сточных вод амперометрическим методом».

Все пробы были проанализированы не менее трех раз. В статье указаны средние значения.

Результаты и обсуждение

Изучаемые водоемы находятся в непосредственной близости от жилых массивов (г. Томск, п. Самусь, п. Богашево, с. Тимирязевское), в связи с чем испытывают влияние хозяйственной деятельности человека. Проведенные исследования водных образцов озер Мальцево, Круглое, Савинское, Федосеевское и Песчаное позволили оценить их текущее состояние по ряду гидрологических показателей. В момент отбора проб значения температурного показателя зафиксированы в интервале 18–21 °С, что является нормой для данного времени года. Величины pH озер Мальцево, Круглое, Савинское, Федосеевское и Песчаное находятся в диапазоне 6,8–7,2. Водные объекты характеризуются как пресноводные потоки. Показатель электропроводности Eh равен соответственно 0,26; 0,28; 0,34; 0,30; 0,14 мСм/см.

Изучение катионно-анионного состава поверхностных вод необходимо для оценки экологического состояния этих объектов, в том числе для возможности определения антропогенного загрязнения [8]. В работе [9] показано, что на химический состав воды оказывает влияние не только антропогенная нагрузка, но и изменения климатических условий.

Таблица 1. Ионный состав малых озер Томского района

Table 1. Ionic composition of small lakes in the Tomsk region

Озера/Lakes	Содержание, мг/л/Content, mg/l								
	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	PO ₄ ³⁻	NO ₃ ⁻	F ⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
Мальцево/Maltsevo	2,62	1,36	<0,2	<0,2	<0,1	1,83	2,25	2,83	0,96
Круглое/Krugloe	2,81	2,66	<0,2	<0,2	<0,1	2,41	1,94	3,47	0,98
Савинское/Savinskoe	3,91	14,98	<0,2	<0,2	0,21	10,23	2,52	36,76	7,00
Федосеевское/Fedosееvskoe	2,91	2,51	<0,2	<0,2	0,20	6,13	1,22	52,19	9,48
Песчаное/Peschanoe	0,56	0,43	<0,2	<0,2	0,38	6,78	0,13	16,35	5,11
ПДК/МРС	100	300	3,5	45	1,5	200	200	180	50

Методом капиллярного электрофореза был определен ионный состав, включающий: основные катионы: Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, и анионы: Cl⁻, SO₄²⁻, NO₃⁻, PO₄³⁻, F⁻. Результаты представлены в табл. 1.

Многолетними исследованиями ученых состава основных ионов (макрокомпонентов) в водных объектах показало, что их содержание в природных водах может изменяться в очень широком диапазоне от ультрапресных до рассолов. Таким образом показано, что на территориях Рдейского, Дарвинского заповедников в малых озерах среднее содержание Ca²⁺ находится в интервале 1,5–3,6 мг/л, Mg²⁺ 1,3–1,4 мг/л, Na⁺ 0,8–1,2 мг/л [10]. В работе [11] установлено, что химический состав вод малых озер, расположенных на территории нефтедобывающих районов, отличается повышенным содержанием ионов NO₃⁻ и PO₄³⁻ (1,432 и 0,417 г/л соответственно). Именно повышенные концентрации в водных объектах соединений азота и фосфора, превышающие значения ПДК, указывают на загрязнение промышленными и бытовыми стоками.

Анализируя полученные данные, следует отметить, что концентрация биогенных ионов NO₃⁻ и PO₄³⁻ в изученных озерах Томского района не превышает нормы предельно-допустимых концентраций 4,5 и 3,5 мг/л соответственно. Низкое содержание NO₃⁻ может быть связано с деятельностью природных микроорганизмов, в частности денитрифицирующих бактерий [11], содержание которых в воде и донных отложениях нами не анализировалось.

Результаты исследования указывают на удовлетворительное качество природных вод по показателям катионно-анионного состава. Содержание всех определённых катионов и анионов не превышает ПДК (табл. 1) [12].

Для оценки экологического состояния водных объектов важно учитывать содержание полиароматических углеводородов, которые характеризуются сочетанием токсичных и канцерогенных свойств при их широком распространении и различном происхождении (как природном, так и антропогенном). Авторами [13] показано, что значительной канцерогенной и мутагенной активностью обладают соединения с пятичленными кольцами, например бенз[а]пирен, бенз[б]флуорантен, бенз[к]флуорантен, ди-

бенз[аh]антрацен. В литературе содержится информация о том, что 5–6 циклические ароматические соединения имеют техногенное происхождение, в то время как более легкие 3–4 циклические ПАУ образовались в результате биохимической трансформации органического сырья (гумуса или наземной высшей растительности) [14, 15]. К сожалению, в Российской Федерации отсутствует достаточная аналитическая база для разработки нормированных документов по предельно допустимым концентрациям полиароматических углеводородов.

В пробах поверхностных вод изученных озер были количественно определены приоритетные индивидуальные ПАУ, рассчитано их относительное содержание; результаты представлены в табл. 2.

Смесь приоритетных ПАУ водных образцов исследуемых водоемов наиболее обогащена такими соединениями, как флуорен, фенантрен и флуорантен. В целом в воде преобладают более легкие двух и трехядерные полиарены, обладающие лучшей растворимостью [13]. Для озер Федосеевское и Савинское установлено повышенное содержание флуорена до 0,12 мкг/л, флуорантена до 0,09 мкг/л и дибенз[аh]антрацена до 0,08 мкг/л.

Для всех изученных озер подтверждается закономерность о количественном преобладании флуорантена над пиреном за счет его лучшей растворимости в воде [13, 16].

Озеро Песчаное отличается минимальным суммарным содержанием ПАУ, однако для этого водоема характерно максимальное содержание фенантрена, происхождение которого может быть связано с пирогенными процессами хозяйственно-бытовой деятельности. Рекомендованное значение фоновой концентрации фенантрена 0,4 мг/л [13]. Кроме того, в этой же работе показано, что почвы способны генерировать фенантрен и хризен из погребенной в них биомассы.

Экологическое состояние водных объектов вызывает интерес во всем мире. В работах [17, 18] приведены данные о суммарном содержании ПАУ в городских водоемах Китая (оз. Донг – 0,013 мкг/л и оз. Тансюнь – 0,989 мкг/л), а в питьевых водах других городов Китая их концентрация находится в диапазоне от 0,004 до 0,231 мкг/л [19].

Таблица 2. Среднее содержание ПАУ в поверхностных водах малых озер Томского района, (в числителе – абсолютное содержание, мкг/л; в знаменателе – относительное, %)

Table 2. Average content of polyaromatic hydrocarbons PAHs in the surface waters of small lakes in the Tomsk region (in the numerator – absolute content, µg/l; in the denominator – relative, %)

ПАУ/PAHs	Мальцево Maltsevo	Круглое Krugloe	Савинское Savinskoe	Федосеевское Fedoseevskoe	Песчаное Peschanoe
Нафталин* Naphthalene	0,04 10,26	0,04 9,20	0,02 4,51	0,02 4,18	0,03 8,42
2-метилнафталин 2-methylnaphthalene	0,05 12,82	0,03 5,75	0,04 7,67	0,02 4,07	0,03 7,54
Флуорен Fluorene	0,04 10,26	0,08 17,24	0,12 21,51	0,12 28,32	0,03 7,46
Фенантрен Phenanthrene	0,09 21,79	0,08 17,24	0,06 11,84	0,03 7,72	0,10 26,84
Антрацен Anthracene	0,00 0,00	0,00 0,00	следы (traces) 0,17	0,01 1,78	следы (traces) 0,27
Флуорантен Fluoranthene	0,05 11,54	0,06 12,64	0,06 10,77	0,09 21,64	0,07 17,98
Пирен Piren	0,02 3,85	0,02 4,60	0,01 1,95	0,02 5,02	0,03 7,31
Бенз[а]антрацен Benz[a]anthracene	0,03 6,41	0,05 11,49	0,03 6,10	0,02 5,71	0,04 10,46
Хризен Chrysene	0,02 5,13	0,03 6,90	0,02 3,26	0,02 4,69	0,03 6,97
Бенз[б]флуорантен Benz[b]fluoranthene	0,03 6,41	0,01 2,30	0,04 7,91	0,01 1,78	следы (traces) 0,33
Бенз[к]флуорантен Benz[k]fluoranthene	0,02 3,85	0,01 1,15	0,04 6,71	0,01 1,85	следы (traces) 0,16
Бенз[а]пирен** Benz[a]pyrene	0,01 2,56	0,01 2,30	0,02 3,57	0,01 2,70	0,01 1,84
Дибенз[аh]антрацен Dibenz[ah]anthracene	0,02 5,13	0,04 9,20	0,08 14,02	0,04 10,54	0,02 4,41
ΣНМ/ΣLMW	0,22	0,22	0,25	0,19	0,19
ΣВМ/ΣНМW	0,18	0,22	0,29	0,23	0,18
ΣПАУ/ΣРАHs	0,40	0,44	0,54	0,42	0,37

Согласно рекомендациям СанПин 1.2.3685-21: *содержание нафталина в воде не должно превышать 10 мкг/л, ** бенз[а]пирена – 0,01 мкг/л.

Антропогенное влияние распространяется не только на густонаселенные территории, но и на удаленные уникальные регионы, такие как архипелаг Шпицберген. В озере Стамме, расположенном на территории этого архипелага, установлено, что среднее суммарное содержание ПАУ находится в пределах 0,002–0,29 мкг/л, а в летне-осенний период увеличивается до 0,713 мкг/л [20]. В поверхностных водах озера Байкал концентрации ПАУ колеблются от 0,03 до 0,13 мкг/л [21].

Суммарное содержание ПАУ подвержено сезонным колебаниям [20], для изучаемых малых озер Томского района в поверхностных водах оно изменяется от 0,37 до 0,54 мкг/л. Нами показано,

что в водных образцах, отобранных в августе 2022 г., количество ПАУ находится в интервале концентраций типичных для летнего сезона, вне зависимости от антропогенной нагрузки.

На основании гидрохимических показателей (рН, БПК₅, содержание растворенного кислорода, макрокомпонентных ионов, фенола, нефтепродуктов и др.) предложены различные интегральные количественные индексы для определения качества воды, например: удельный комбинаторный индекс загрязненности воды (УКИЗВ); индекс качества воды (ИКВ), индекс загрязненности воды; индексы загрязненности рек металлами и токсичными веществами; индекс потенциального загрязнения воды; общесанитарные индексы качества воды; индекс токсичности и др. [22]. Оценка качества природных вод с использованием различных коэффициентов и индексов проводится во всем мире. Для оценки качества воды в Австралии используется индекс WSC [23], в Южной Индии благодаря индексу загрязнения подземных вод (PIG) и индексу качества воды (WQI) проводится пространственная оценка качества подземных вод [24].

В нашей работе мы использовали один из наиболее распространенных показателей в России: индекс загрязнения воды [25], для расчета которого использовали содержание растворенного кислорода, БПК₅, ионно-катионный состав воды из табл. 3.

Таблица 3. Гидрохимические показатели малых озер Томского района, используемые для расчета индекса загрязненности воды (ИЗВ)

Table 3. Hydrochemical indicators of small lakes in the Tomsk region used to calculate water pollution index (WPI)

Показатель Index	малые озера Томского района small lakes of the Tomsk region				
	Мальцево Maltsevo	Круглое Krugloe	Савинское Savinskoe	Федосеевское Fedoseevskoe	Песчаное Peschanoe
БПК ₅ (мгО ₂ /л)/BOD ₅ (mgO ₂ /l)	3,1	3,8	3,5	3,4	3,1
Раств. кислород (мг/л) DO (mg/l)	7,3	7,3	8,1	7,8	7,5
Ca ²⁺ (мг/л/mg/l)	2,83	3,47	36,76	52,19	16,35
Mg ²⁺ (мг/л/mg/l)	0,96	0,98	7,00	9,48	5,11
Cl ⁻ (мг/л/mg/l)	1,36	2,66	14,98	2,51	0,43
SO ₄ ²⁻ (мг/л/mg/l)	2,62	2,81	3,91	2,91	0,56
ИЗВ/WPI	1,74	1,86	2,00	1,95	1,80

Важно учитывать, что при расчете ИЗВ из всех используемых параметров наибольший вклад вносят в индекс экспериментально определенные значения растворенного кислорода и биологического потребления кислорода, определенное на 5 сутки. По значениям коэффициента ИЗВ для водных объектов

рекомендовано классифицировать природные воды на шесть классов, представленных в табл. 4 [25].

Таблица 4. Характеристики интегральной оценки качества воды

Table 4. Characteristics of water quality integral assessment

Воды Water	Значения ИЗВ WPI values	Классы качества вод Water quality classes
Очень чистые/Very clean	$\leq 0,2$	I
Чистые/Clean	$>0,2-1,0$	II
Умеренно загрязненные Moderately polluted	$1,0-2,0$	III
Загрязненные/Polluted	$2,0-4,0$	IV
Грязные/Dirty	$4,0-6,0$	V
Очень грязные/Very dirty	$6,0-10,0$	VI
Чрезвычайно грязные Extremely dirty	>10	VII

Показатель ИЗВ для малых озер Томского района изменяется от 1,74 до 2,0. В соответствии с табл. 4 изученные водоемы можно отнести к III классу умеренно загрязненных, ближе к загрязненным.

Следует отметить, что есть ряд потенциально опасных загрязняющих веществ, которые оказывают серьёзное токсикологическое воздействие на организм человека и природу, но не нормируются и не учитываются в различных коэффициентах и индексах, используемых для оценки качества воды. К таким веществам относят индивидуальные ПАУ. Показатель БПК₅ используется для оценки содержания в воде растворенного органического вещества природного и антропогенного происхождения, которое наиболее легко окисляется. Полиароматические углеводороды, имеющие в своем составе более трех ароматических колец (флуорантен, пирен и другие), относятся к высокомолекулярным, являются основными представителями трудно-окисляемой, растворенной органической компоненты и практически не учитываются при определении БПК₅ [13, 25].

Поскольку высокомолекулярные ПАУ обладают более высоким токсикологическим воздействием на организм человека, чем низкомолекулярные [10, 15, 25], в нашей работе проведена попытка проследить их влияние на изменение значений ИЗВ. На рис. 2 представлена зависимость коэффициента ИЗВ от соотношения высокомолекулярных ПАУ к низкомолекулярным (ВМ/НМ).

Соотношение ВМ/НМ для поверхностных вод изучаемых озер Томского района находится в интервале 0,81–1,21. Значения ВМ/НМ >1 указывают на преобладание высокомолекулярных ПАУ с числом колец более 3 над низкомолекулярными. Известно, что высокомолекулярные ПАУ обладают большей стабильностью и медленной трансформа-

цией, более способны к накоплению в природных объектах и дают возможность при систематическом наблюдении за этими соединениями выявить направленность процессов, происходящих при загрязнении водных объектов. Отношение ВМ/НМ ПАУ в водном образце может дать информацию, коррелирующую с коэффициентами оценки качества природных вод, как показано на рис. 2.

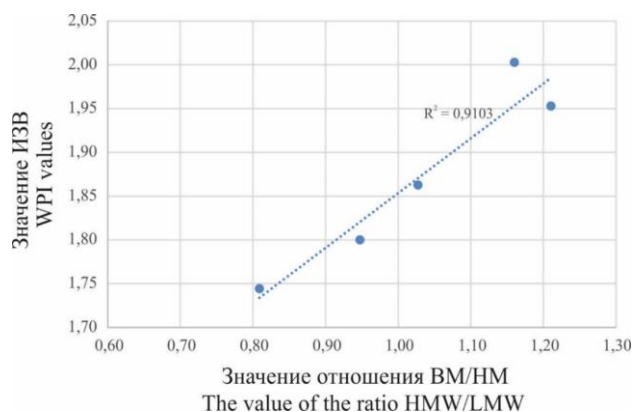


Рис. 2. Соотношение ВМ/НМ к ИЗВ для малых озер Томского района

Fig. 2. VM/LM ratio to WPI for small lakes of the Tomsk region

Проведенные исследования позволяют оценить текущее экологическое состояние малых озер Томского района с учетом вклада полиароматических углеводородов. Значения предельно допустимых концентраций ПАУ на территории РФ [25], в странах Европы и США [2] различаются из-за разных методологий проведения экологического мониторинга, а также имеющейся информации об уровне их канцерогенности и генотоксичности. Для всех исследованных малых озер Томского района содержание приоритетных ПАУ по нормируемым в РФ показателям находится ниже или на уровне установленного ПДК (для нафталина 10 мкг/л и для бенз[а]пирена 0,01 мкг/л). Исключение составляет озеро Савинское, в котором содержание бенз[а]пирена определено как 0,02 мкг/л и превышает ПДК в 2 раза. Содержание других полиароматических углеводородов в РФ, к сожалению, пока не регламентируется.

Для изучаемых малых водоемов рассчитано значение ИЗВ и показана его зависимость от соотношения ВМ/НМ ПАУ. По значениям коэффициента ИЗВ состояние изученных озер позволяет отнести их к категориям умеренно загрязненных или загрязненных. Предложенные показатели дают возможность рассматривать их как эффективные маркёры для дальнейшей оценки и сравнения состояния с другими водными экосистемами Томского района.

Использование ПАУ в поверхностных водах в сравнении с общепринятыми показателями качества воды представляет собой новый подход для экологического мониторинга, основанный на выявлении источников

загрязнения и наблюдении связей между ними. Предложенный комплексный подход может оказаться эффективным для оценки экологического состояния озер и стать основой для дальнейших исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Миграционные потоки биогенных элементов в геосистеме «водосбор – водный объект» в современных условиях / Е.А. Минакова, А.П. Шлычков, С.А. Кондратьев, В.З. Латыпова // *Геоэкология*. – 2022. – № 2. – С. 13–21. DOI: 10.24412/1816-1863-2022-2-13-21
2. Кимстач В.А. Классификации качества поверхностных вод в странах Европейского экономического сотрудничества. – СПб.: Гидрометеоздат, 1993. – 48 с.
3. PAHs in the Fraser River basin: a critical appraisal of PAH ratios as indicators of PAH source and composition / M.B. Yunkera, R.W. Macdonald, R. Vingarzac, R.H. Mitchell, D. Goyette, S. Sylvestre // *Organic Geochemistry*. – 2002. – Vol. 33 – P. 489–515. DOI: 10.1016/S0146-6380(02)00002-5
4. Семенов М.Ю., Мариняйтэ И.И., Жученко Н.А. Выявление источников и путей поступления полициклических ароматических углеводородов в поверхностные воды на основе данных химического мониторинга // *Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геоэкология*. – 2017. – № 1. – С. 40–49.
5. Tarnawski M., Baran A. Use of chemical indicators and bioassays in bottom sediment ecological risk assessment // *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*. – 2018. – Vol. 74. – P. 395–407. DOI: 10.1007/s00244-018-0513-2
6. Freshwater lakes in the Western Himalayan Region: an analysis of the present situation / Neha Kumari, Kushal Thakur, Rakesh Kumar, Sunil Kumar, Danish Mahajan, Bhavna Brar, Dixit Sharma, Amit Kumar Sharma // *Water-Energy Nexus*. – 2023. – Vol. 6. – P. 18–31. DOI: 10.1016/j.wen.2023.06.002
7. Иоганзен Б.Г., Попов М.А., Якубова А.И. Водоемы окрестностей города Томска. Из цикла работ по изучению биологической продуктивности водоемов Сибири // *Труды Том. ун-та*. – 1951. – Т. 115. – С. 121–190.
8. Сагдеев М.А., Чигринина Н.А., Сальникова В.И. Определение содержания катионов и анионов в питьевой воде методом капиллярного электрофореза // *Совр. науч. иссл. и инновации*. – 2017. – № 3 (71). – С. 36–39.
9. Schreider S., Sommaruga R., Psenner R. Changes in air temperature, but not in precipitation, determine long-term trends in water chemistry of high mountain lakes of the Alps with and without rock glacier influence // *Science of The Total Environment*. – 2023. – Vol. 905. – 167750. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.167750
10. Томилина И.И., Гремячих В.А., Гребенюк Л.П. Эколого-токсикологический мониторинг озер северо-запада и центра европейской части России, расположенных на особо охраняемых территориях // *Водные ресурсы*. – 2014. – Т. 41. – № 3. – С. 304–311. DOI: 10.7868/S032105961403016X
11. Агбалян Е.В., Шинкарук Е.В. Химический состав вод малых озер нефтегазодобывающих районов севера Западной Сибири // *Успехи современного естествознания*. – 2019. – № 7. – С. 45–51. DOI: 10.17513/use.37158
12. Санитарные нормы и требования СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания». – М.: Госсанэпидемнадзор России, 2021. – 469 с.
13. Ровинский Ф.Я., Теплицкая Т.А., Алексеева Т.А. Фоновый мониторинг полициклоароматических углеводородов. – Л.: Гидрометеоздат, 1988. – 233 с.
14. Опекунов Е.В., Митрофанова Е.С., Санни С. Полициклические ароматические углеводороды в донных отложениях рек и каналов С-Петербурга // *Вестник С-Пб. универ.* – 2015. – Сер. 7. – Вып. 4. – С. 98–109.
15. Халиков И.С., Лукьянова Н.Н. Содержание полициклических ароматических углеводородов в донных отложениях озера Байкал по результатам мониторинга в 2017–2018 гг. // *Международный научно-исследовательский журнал*. – 2020. – № 6-2 (96). – С. 69–73. DOI: 10.23670/IRJ.2020.96.6.050
16. Sources, inputs and concentrations of petroleum hydrocarbons, polycyclic aromatic hydrocarbons, and other contaminants related to oil and gas activities in the arctic/ L.O. Reiersen, S. Wilson, Yu. Sychev, J. Pawlak, I. Utne // *Arctic Monitoring and Assessment Programme*. – Oslo: AMAP, 2007. – Ch. 4. – 87 p.
17. Polycyclic aromatic hydrocarbons in the water bodies of Dong Lake and Tangxun Lake, China: spatial distribution, potential sources and risk assessment / Kuo Yao, Zhanling Xie, Lihao Zhi, Zefan Wang, Chengkai Qu // *Water*. – 2023. – Vol. 15 (13). – № 2416. DOI: 10.3390/w15132416.
18. The collaborative monitored natural attenuation (CMNA) of soil and groundwater pollution in large petrochemical enterprises: A case study / Q. Song, Z. Xue, H. Wu, Y. Zhai, T. Lu, X. Du, J. Zheng, H. Chen, R. Zuo // *Environmental Research*. – 2023. – Vol. 216. – Pt. 4. – 114816. DOI: 10.1016/j.envres.2022.114816
19. Zhang Y., Zhang L., Huang Z. Pollution of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in drinking water of China: Composition, distribution and influencing factors // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. – 2019. – Vol. 177. – P. 108–116. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2019.03.119
20. Пресноводные ресурсы западного Шпицбергена в современных условиях (многолетние исследования ААНИИ): монография / М.В. Третьяков, В.А. Брызгалов, Е.В. Румянцева, К.В. Ромашова. – СПб.: ААНИИ, 2021. – 201 с.
21. Современный уровень нефтепродуктов в воде оз. Байкал и его притоков / А.Г. Горшков, И.И. Мариняйтэ, Т.И. Земская, Т.В. Ходжер // *Химия в интересах устойчивого развития*. – 2010. – № 18. – С. 711–718.
22. Зубарев В.А. Гидрохимические индексы оценки качества поверхностных вод // *Региональные проблемы*. – 2014. – Т. 17. – № 2. – С. 71–77.
23. Water Sensitive Cities Index: a diagnostic tool to assess water sensitivity and guide management actions / B.C. Rogers, G. Dunn, K. Hammer, W. Novalia, F.J. de Haan, L. Brown, R.R. Brown, S. Lloyd, C. Urlich, T.H.F. Wonga, C. Chesterfielda // *Water – Research* 186. – 2020. – 116411. DOI: 10.1016/j.watres.2020.116411

24. Sunitha V., Muralidhara Reddy B. Geochemical characterization, deciphering groundwater quality using pollution index of groundwater (PIG), water quality index (WQI) and geographical information system (GIS) in hard rock aquifer, South India // *Applied Water Science*. – 2022. – Vol. 12. – № 41. DOI: 10.1007/s13201-021-01527-w
25. Оценка и нормирование качества природных вод: критерии, методы, существующие проблемы / сост. О.В. Гагарина. – Ижевск: Изд-во Удмуртского университета, 2012. – 199 с.

Информация об авторах

Дарья Ивановна Чуйкина, кандидат химических наук, старший научный сотрудник лаборатории физико-химических исследований кернов и пластовых флюидов Томского филиала Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 4. dichuikina@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5906-2148>

Ирина Степановна Король, кандидат химических наук, старший научный сотрудник лаборатории физико-химических исследований кернов и пластовых флюидов Томского филиала Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 4. irinakorol@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8022-9678>

Наталья Андреевна Мухортина, младший научный сотрудник лаборатории физико-химических исследований кернов и пластовых флюидов Томского филиала Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 4. volkovana@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2625-8985>

Юлия Викторовна Колубаева, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник лаборатории гидрогеохимии и геоэкологии Томского филиала Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 4. kolubaeva@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7934-5172>

Поступила в редакцию: 12.12.2023

Поступила после рецензирования: 20.04.2024

Принята к публикации: 27.09.2024

REFERENCES

1. Minakova E.A., Shlychkov A.P., Kondratyev S.A., Latypova V.Z. Migration flows of nutrient elements in the geosystem “catchment area–water body” in modern conditions. *Geoecology*, 2022, no. 2, pp. 13–21. (In Russ.) DOI: 10.24412/1816-1863-2022-2-13-21
2. Kimstach V.A. *Classifications of surface water quality in the countries of the European Economic Community*. St Petersburg, Gidrometeoizdat Publ., 1993. 48 p. (In Russ.)
3. Yunkera M.B., Macdonald R.W., Vingarzan R., Mitchell R.H., Goyette D., Sylvestre S. PAHs in the Fraser River basin: a critical appraisal of PAH ratios as indicators of PAH source and composition. *Organic Geochemistry*, 2002, vol. 33, pp. 489–515. DOI: 10.1016/S0146-6380(02)00002-5
4. Semenov M.Yu., Marinayte I.I., Zhuchenko N.A. Identification of sources and routes of entry of polycyclic aromatic hydrocarbons into surface waters based on chemical monitoring data. *Geoecology. Engineering geology. Hydrogeology. Geocryology*, 2017, no. 1, pp. 40–49. (In Russ.)
5. Tarnawski M., Baran A. Use of chemical indicators and bioassays in bottom sediment ecological risk assessment. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2018, vol. 74, pp. 395–407. DOI: 10.1007/s00244-018-0513-2
6. Neha Kumari, Kushal Thakur, Rakesh Kumar, Sunil Kumar, Danish Mahajan, Bhavna Brar, Dixit Sharma, Amit Kumar Sharma. Freshwater lakes in the Western Himalayan Region: an analysis of the present situation. *Water-Energy Nexus*, 2023, vol. 6, pp. 18–31. DOI: 10.1016/j.wen.2023.06.002
7. Ioganzen B.G., Popov M.A., Yakubova A.I. Reservoirs in the vicinity of the city of Tomsk. From a series of works on the study of the biological productivity of water bodies in Siberia. *Proceedings of Tomsk University*, 1951, vol. 115, pp. 121–190. (In Russ.)
8. Sagdeev M.A., Chigrineva N.A., Salnikova V.I. Study of the cation-anionic composition of water by the method of capillary electrophoresis. *Modern scientific research and innovation*, 2017, vol. 71, no. 3, pp. 36–39. (In Russ.)
9. Schreider S., Sommaruga R., Psenner R. Changes in air temperature, but not in precipitation, determine long-term trends in water chemistry of high mountain lakes of the Alps with and without rock glacier influence. *Science of The Total Environment*, 2023, vol. 905, 167750. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.167750
10. Tomilina I.I., Gremyachikh V.A., Grebenyuk L.P. Ecotoxicological monitoring in lakes of northwestern and central European Russia situated in specially protected natural areas. *Water Resources*, 2014, vol. 41, no. 3, pp. 304–311. (In Russ.) DOI: 10.7868/S032105961403016X
11. Agbalyan E.V., Shinkaruk E.V. Chemical composition of water of small lakes of oil and gas diving regions of the north of Western Siberia. *Advances of modern natural science*, 2019, no. 7, pp. 45–51. (In Russ.) DOI: 10.17513/use.37158
12. *Sanitary standards and requirements SanPiN 1.2.3685-21 "Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors to humans*. Moscow, State Sanitary and Epidemiological Surveillance of Russia Publ., 2021. 469 p. (In Russ.)
13. Rovinskiy F.Ya., Teplitskaya T.A., Alekseyeva T.A. *Background monitoring of polycycloaromatic hydrocarbons*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1988. 233 p. (In Russ.)

14. Opekunov A.Yu., Mitrofanova E.S., Sanni S. Polycyclic aromatic hydrocarbons in bottom sediments of rivers and canals of St. Petersburg. *Vestnik St. Petersburg University*, 2015, Iss. 7, no. 4, pp. 98–109. (In Russ.)
15. Khalikov I.S., Lukyanova N.N. Polycyclic aromatic hydrocarbons content in bottom sediments of Baikal lake according to results of monitoring in 2017–2018. *International Scientific Research Journal*, 2020, no. 6-2 (96), pp. 69–73. (In Russ.)
16. Reiersen L.O., Wilson S., Sychev Yu., Pawlak J., Utne I. *Sources, inputs and concentrations of petroleum hydrocarbons, polycyclic aromatic hydrocarbons, and other contaminants related to oil and gas activities in the arctic*. Arctic Monitoring and Assessment Programme. Oslo, AMAP, 2007. Ch. 4, 87 p.
17. Kuo Yao, Zhanling Xie, Lihao Zhi, Zefan Wang, Chengkai Qu. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Water Bodies of Dong Lake and Tangxun Lake, China: spatial distribution, potential sources and risk assessment. *Water*, 2023, vol. 15 (13), no. 2416. DOI: 10.3390/w15132416.
18. Song Q., Xue Z., Wu H., Zhai Y., Lu T., Du X., Zheng J., Chen H., Zuo R. The collaborative monitored natural attenuation (CMNA) of soil and groundwater pollution in large petrochemical enterprises: a case study. *Environmental Research*, 2023, vol. 216, Iss. 4, 114816. DOI: 10.1016/j.envres.2022.114816
19. Zhang Y., Zhang L., Huang Z. Pollution of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in drinking water of China: composition, distribution and influencing factors. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, vol. 177, pp. 108–116. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2019.03.119
20. Tretyakov M.V., Bryzgalo V.A., Rumyantseva E.V., Romashova K.V. *Freshwater resources of western Spitsbergen in modern conditions (long-term research by AARI)*. Monografiya. St Peterburg, AANII Publ., 2021. 201 p. (In Russ.)
21. Gorshkov A.G., Marinayte I.I., Zemskaya T.I., Khodzher T.V. The current level of petroleum products in the water of the lake Baikal and its tributaries. *Chemistry for sustainable development*, 2010, no. 18, pp. 711–718. (In Russ.)
22. Zubarev V.A. Hydrochemical indices for assessing the quality of surface waters. *Regional problems*, 2014, vol. 17, no. 2, pp. 71–77. (In Russ.)
23. Rogers B.C., Dunn G., Hammer K., Novalia W., De Haan F.J., Brown L., Brown R.R., Lloyd S., Urich C., Wonga T.H.F., Chesterfield C. Water Sensitive Cities Index: a diagnostic tool to assess water sensitivity and guide management actions. *Water*, 2020, vol. 186, 116411. DOI: 10.1016/j.watres.2020.116411
24. Sunitha V., Muralidhara R.B. Geochemical characterization, deciphering groundwater quality using pollution index of groundwater (PIG), water quality index (WQI) and geographical information system (GIS) in hard rock aquifer, South India. *Applied Water Science*, 2022, vol. 12, no. 41. DOI: 10.1007/s13201-021-01527-w
25. *Assessment and regulation of natural water quality: criteria, methods, existing problems*. Compiler O.V. Gagarina. Izhevsk, Udmurt University Publ. House, 2012. 199 p. (In Russ.)

Information about the authprs

Daria I. Chuikina, Cand. Sc., Senior Researcher, Trofimuk Institute of Petroleum-Gas Geology and Geophysics of Siberian Branch Russian Academy Sciences, Tomsk Department, 4, Akademicheskyy avenue, Tomsk, 634055, Russian Federation. dichuikina@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5906-2148>

Irina S. Korol, Cand. Sc., Senior Researcher, Trofimuk Institute of Petroleum-Gas Geology and Geophysics of Siberian Branch Russian Academy Sciences, Tomsk Department, 4, Akademicheskyy avenue, Tomsk, 634055, Russian Federation. irinakorol@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8022-9678>

Natalia A. Mukhortina, Junior Researcher, Trofimuk Institute of Petroleum-Gas Geology and Geophysics of Siberian Branch Russian Academy Sciences, Tomsk Department, 4, Akademicheskyy avenue, Tomsk, 634055, Russian Federation. volkovana@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2625-8985>

Yuliya V. Kolubaeva, Cand. Sc., Researcher, Trofimuk Institute of Petroleum-Gas Geology and Geophysics of Siberian Branch Russian Academy Sciences, Tomsk Department, 4, Akademicheskyy avenue, Tomsk, 634055, Russian Federation. kolubaeva@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7934-5172>

Received: 12.12.2023

Revised: 20.04.2024

Accepted: 27.09.2024

УДК 681.5
DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4642
Шифр специальности ВАК: 2.3.3

Экспериментальное сравнение систем закрытого охлаждения фотоэлектрических модулей

А.С. Сорогин^{1✉}, Р.Н. Хамитов^{1,2}, С.Н. Жеребцов¹

¹ Тюменский индустриальный университет, Россия, г. Тюмень

² Омский государственный технический университет, Россия, г. Омск

✉ sorg96@gmail.com

Аннотация. *Актуальность* исследования заключается в необходимости увеличения эффективности солнечных модулей до 15–20 % за счёт охлаждения их поверхности, которая в весенне-летнее время года способна нагреваться до температуры 70 °С. Сбор тепла с фотоэлектрических модулей является дополнительной возможностью аккумулировать тепло и использовать его для собственных нужд, в особенности для изолированных энергосистем. В статье рассматриваются способы закрытого охлаждения с помощью трубок из меди, металлопластика и нержавеющей стали. Все измерения производились в летнее время года на реальной, действующей солнечной электростанции, расположенной в респ. Крым, с. Карберное. *Цель.* Путем эксперимента определить и выявить наиболее эффективную систему охлаждения фотоэлектрических модулей. *Методы.* Методы эмпирического исследования. В эксперименте для измерений температуры и влажности окружающего воздуха, температуры хладагента на входе и выходе использовались датчики, подключенные к системе Arduino UNO, данные регистрировались в таблице Excel. Для крепления системы охлаждения используется клей-герметик Soudal FIX ALL. *Результаты и выводы.* Получены вольтамперные характеристики, температуры хладагента на входе и на выходе, температуры поверхности фотоэлектрического модуля; наибольшую эффективность охлаждения солнечного модуля показала система охлаждения, выполненная из труб нержавеющей стали, которая позволила снизить в некоторых точках температуру модуля с 66 до 38 °С, что увеличило эффективность фотоэлектрического модуля на 3,5 % относительно номинальной мощности. Нагретая жидкость от фотоэлектрического модуля остыла до первоначальных значений температуры благодаря установленному радиатору охлаждения для возможности повторного использования жидкости в контуре охлаждения солнечного модуля.

Ключевые слова: охлаждение фотоэлектрических модулей, солнечные панели, система охлаждения, Arduino UNO, нагрев фотоэлектрических модулей

Благодарности: Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема: «Предиктивное управление потоками энергии электрогенерирующих комплексов Арктики и Крайнего Севера, при стохастических характерах потребления и генерации электрической энергии: теория, синтез, эксперимент», код темы: FENG-2023-0001).

Для цитирования: Сорогин А.С., Хамитов Р.Н., Жеребцов С.Н. Экспериментальное сравнение систем закрытого охлаждения фотоэлектрических модулей // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 10. – С. 226–237. DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4642

UDC 681.5
DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4642

Experimental comparison of closed cooling systems of photovoltaic modules

A.S. Sorogin^{1✉}, R.N. Khamitov^{1,2}, S.N. Zhrebtsov^{1,2}

¹ Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation

² Omsk State Technical University, Omsk, Russian Federation

✉ sorg96@gmail.com

Abstract. Relevance. The need to increase the efficiency of solar modules to 15–20% by cooling their surface, which in spring and summer is able to heat up to 70°C. Heat collection from photovoltaic modules is an additional opportunity to accumulate heat and use it for their own needs, especially for isolated power systems. The article discusses methods of closed cooling using tubes made of copper, metal plastic and stainless steel. All measurements were carried out in summer at a real, operating solar power plant located in the Crimea village of Karyernoe. **Aim.** To experimentally determine and identify the effect of the most efficient cooling system for photovoltaic modules. **Methods.** Methods of empirical research. In the experiment, sensors connected to the Arduino UNO system were used to measure the temperature and humidity of the ambient air, the temperature of the refrigerant at the inlet and outlet, and the data were recorded in an Excel table. Soudal FIX ALL adhesive sealant is used to fix the cooling system. **Results and conclusions.** The authors have obtained volt-ampere characteristics, refrigerant inlet and outlet temperatures, photovoltaic modules surface temperatures. The cooling system made of stainless steel pipes showed the greatest cooling efficiency of the solar module, which allowed reducing the module temperature from 66 to 38°C at some points. This increased the efficiency of photoelectric module by 3.5% relative to the rated power. The heated liquid from the photoelectric module has cooled down to its original temperature values, thanks to the installed cooling radiator, for the possibility of reuse of the liquid in the solar panel cooling circuit.

Keywords: cooling of photovoltaic modules, solar panels, cooling system, Arduino UNO, heating of photovoltaic modules

Acknowledgements: The study was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (topic: "Predictive control of energy flows of electric generating complexes in the Arctic and the Far North, with stochastic patterns of consumption and generation of electric energy: theory, synthesis, experiment", topic code: FENG-2023-0001).

For citation: Sorogin A.S., Khamitov R.N., Zhrebtsov S.N. Experimental comparison of closed cooling systems of photovoltaic modules. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 10, pp. 226–237. DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4642

Введение

Использование солнечной энергии является экологически чистым видом энергии [1]. Использование солнечных панелей для преобразования энергии солнца в электрическую энергию является неотъемлемой частью работы солнечной электростанции. Однако во время эксплуатации солнечных панелей на поверхности модулей в период высоких температур возникает избыток тепла, который необходимо отводить от фотоэлектрического модуля (ФЭМ), в противном случае высокая температура модуля может привести к неэффективному использованию солнечных панелей и деградации солнечных элементов [1].

Теоретическая цель исследований: определить основные факторы, влияющие на нагрев фотоэлектрической панели.

Практическая цель исследований: экспериментальным путем определить наиболее эффективную закрытую систему охлаждения солнечных панелей в с. Карьерное, респ. Крым.

ФЭМ во время эксплуатации испытывает влияние окружающей среды. Это могут быть ветровые, дождевые и снеговые нагрузки, а также нагрев фотоэлементов [1]. Нагрев солнечной панели приводит к уменьшению выдаваемой электрической мощности, через определенное время эксплуатации нагрев может привести к деградации или разрушению фотоэлектрических ячеек. Деградация ФЭМ способна привести к возникновению точек «hot spot» (рис. 1) и в будущем к риску возникновения пожара (рис. 2) [1].

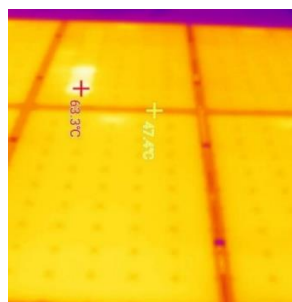


Рис. 1. Точки «hot spot» на лицевой стороне ФЭМ
Fig. 1. "Hot spot" points on the front side of the solar panel



Рис. 2. Последствия пожара на модуле GSB в с. Митяево, п-ов Крым, 06.07.2023
Fig. 2. Consequences of a fire on the GSB module in Mityaev, Crimea, 06.07.2023

При нагреве солнечного модуля его номинальная электрическая мощность уменьшается. На рис. 3 представлена вольтамперная характеристика (ВАХ) ФЭМ модели Jinko Solar JK-190-P54, смоделированная в программном комплексе PVSYS. На представленных графиках видно, что при увеличении

температуры снижается коэффициент заполнения, следовательно, уменьшается выдаваемая электрическая мощность [1].

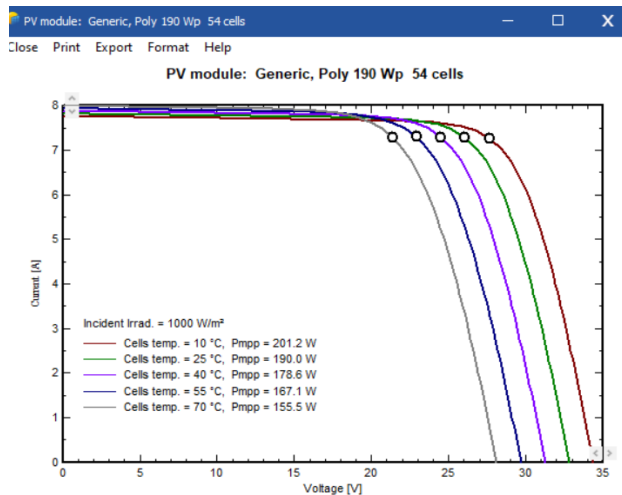


Рис. 3. Вольт-амперная характеристика солнечной панели Jinko Solar JKM-190-P54 смоделированная в PVSYS

Fig. 3. Volt-ampere characteristic (VAC) of the Jinko Solar JKT-190-P54 solar panel modeled in PVSYS

Основная причина уменьшения выдаваемой электрической мощности при нагреве ФЭМ заключается в физических основах природы полупроводника [2]. В полупроводниках с повышением температуры нагрева происходит усиление колебаний атомов относительно положения равновесия [2]. Для многих проводников в области температур много меньших температур Дебая (температура, при которой возбуждаются все моды колебаний в данном твёрдом теле) температурная зависимость ширины запрещенной зоны описывается эмпирическим соотношением вида (1):

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta}, \quad (1)$$

где $E_g(0)$ – ширина запрещенной зоны (концентрация собственных носителей заряда, собственная проводимость полупроводника, наименьшая частота света, при которой начинается собственное поглощение полупроводника (сопровождается образованием пар неравновесных носителей заряда электрон–дырка и возникновением фотопроводимости σ_{ϕ}) при 0 К; α и β – константы, значения которых приведены в [2, табл. 11.2]; T – температура нагрева [2].

При температурах, много больших температуры Дебая, зависимость ширины запрещенной зоны становится линейной (2):

$$E_g(T) = E_g(0) - \alpha T. \quad (2)$$

В качестве уравнения, описывающего фотоэлектрический элемент, приведены формулы, которые показывают температурную зависимость фотоэлемента (3):

$$P = P_0(1 + \beta \cdot \Delta T), \quad (3)$$

где P_0 – электрическая мощность ФЭМ при температуре 25 °С, Вт; β – температурный коэффициент мощности, 1/°С; ΔT – повышение температуры фотоэлемента, °С [3].

Напряжение на фотоэлементе изменяется по логарифмическому закону, зависит от температуры и определяется согласно формуле (4):

$$U_{CЭ} = \frac{kT}{q} \cdot \ln \frac{I_{\phi} - I_{CЭ}}{I_D} + 1, \quad (4)$$

где $U_{CЭ}$ – напряжение на солнечном элементе, В; $k=1,380649 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана; T – температура окружающей среды, К; $q=1,60217662 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд электрона; I_{ϕ} – фототок, А; $I_{CЭ}$ – ток солнечного элемента, А; I_D – диодный ток, А.

Кроме теплообмена с окружающим воздухом и нагретых конструкций солнечная панель нагревается из-за инфракрасного излучения (рис. 4), падающего на ФЭМ, который не преобразуется в электроэнергию и нагревает поверхность солнечного модуля [5]. На рис. 4 изображен спектр солнечного излучения [6], который состоит из видимого света и инфракрасного излучения [5].

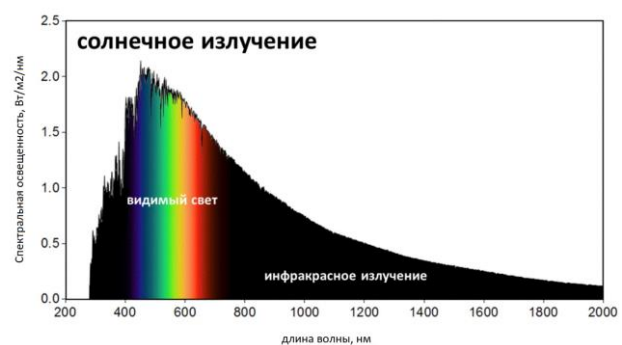


Рис. 4. Спектр солнечного света, генерирующий электроэнергию в солнечных модулях [6]

Fig. 4. Sunlight spectrum generating electricity in solar modules [6]

В технических характеристиках ФЭМ значения о выдаваемой электрической мощности указаны при измерениях типа STC (Standard Test Conditions, стандартные тестовые условия), когда температура окружающей среды составляет 25 °С, а освещен-

ность – 1000 Вт/м². В табл. 1 представлены характеристики ФЭМ при STC. Реальная температура нагрева или охлаждения солнечного модуля может колебаться в пределах от – 40 до +70 °С в зависимости от времени года и местоположения солнечных модулей.

Реальные измерения температуры и выдаваемой электрической мощности солнечных модулей проводились на п-ве Крым в с. Карьерное 26.07.2023–27.07.2023 и 01.08.2023. Температура модулей во время их нагрева достигала 67–71 °С, а электрическая мощность солнечной панели, согласно температурному коэффициенту, снижалась на 17–23 % (табл. 1). Так, электрическая мощность ФЭМ марки JKM-230-P60 при значениях STC составляет 230 Вт, при нагреве модуля до 71 °С и освещенности $E=1000$ Вт/м² выдаваемая электрическая мощность ФЭМ в точке максимальной мощности составляла 177 Вт.

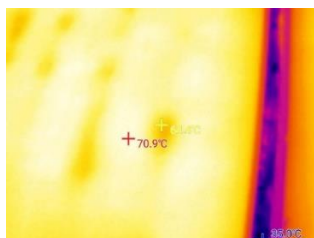


Рис. 5. Инфракрасный снимок нагрева солнечного модуля JKM-230-P60

Fig. 5. Infrared image of the heating of the solar module JKM-230-P60

Таблица 1. Характеристики ФЭМ JKM-230-P60

Table 1. Characteristics of the solar panel JKM-230-P60

Характеристики Specifications	Параметры Parameters
Максимальная мощность при STC, P _{max} Maximum power at STC	230 Вт/В
Максимальное напряжение, V Maximum voltage, V	27,9 В/В
Максимальный ток, I Maximum current, I	8,23 А/А
Напряжение холостого хода, V _{oc} No-load voltage, V _{oc}	35 В/В
Ток короткого замыкания, I _{sc} Short circuit current, I _{sc}	9,01 А/А
Максимальное напряжение в системе DC, V Maximum voltage in the DC system, V	1000 В/В
Габариты Dimensions	1650×992×40 мм/мм
Максимальный ток последовательного устройства защиты от перегрузки по току Maximum current of the serial overcurrent protection device	15 А/А
Температурный коэффициент мощности (ТКМ), 1/°С Temperature power factor (TPF), 1/°С	–0,4
Количество солнечных элементов, соединенных последовательно, шт. Number of solar cells connected in series, pcs	60

В зависимости от вида теплопередачи (теплопередача, теплопроводность, конвекция, излучение [7]) существуют различные способы охлаждения солнечных модулей [8–21]:

- естественное охлаждение (с помощью охлаждения температуры окружающего воздуха, дождя, ветра и т. д.);
- принудительная циркуляция воздуха;
- использование ребер охлаждения;
- открытое жидкостное охлаждение;
- охлаждение с помощью термоэлектрических модулей;
- оптическое охлаждение (с использованием призматических концентраторов солнечной энергии для рассеяния инфракрасного излучения) [6];
- охлаждение с помощью геля;
- закрытое жидкостное охлаждение.

Для наиболее оптимального способа охлаждения выбран закрытый способ жидкостного охлаждения модулей, поскольку кроме охлаждения модулей данный способ позволяет отбирать дополнительное тепло от ФЭМ и использовать его для собственных нужд.

Материалы и методы исследования

Солнечные панели для экспериментальных исследований установлены на металлических поддерживающих конструкциях [9] под углом 25 градусов относительно земли согласно широте местоположения солнечной электростанции (СЭС). СЭС расположена в с. Карьерное респ. Крым. Согласно справочным данным [4] в Юго-Западном районе Крыма продолжительность солнечного излучения составляет 2400 часов в год.

Элементная база экспериментальной установки закрытой системы охлаждения солнечных панелей (ЗСОСП) изображена на рис. 6.

В качестве системы принудительного охлаждения ФЭМ используются трубки для отбора тепла. Для сравнения и нахождения наиболее эффективного материала выбраны трубы из нержавеющей стали, уложенные змеевиком и параллельной системой труб, медная трубка и металлопластик, уложенные в змеевик. Данные материалы выбраны как наиболее теплопроводные (табл. 2).

В табл. 2 указаны характеристики материалов труб для охлаждения ФЭМ. На рис. 7 показан способ крепления систем труб к ФЭМ.

Для обеспечения надежного контакта и достаточного теплообмена использован клей-герметик Soudal. Причина выбора клея-герметика Soudal заключается в наибольшей теплопроводности и адгезии, так как двухкомпонентный эпоксидный клей обеспечивает недостаточно надежный контакт материала змеевика и ФЭМ. Характеристики клея-герметика Soudal представлены в [22].

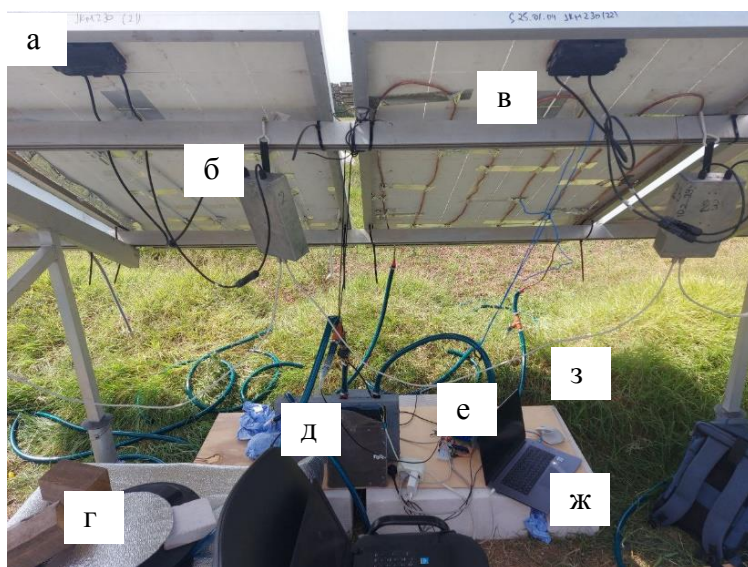


Рис. 6. Экспериментальная установка для измерения характеристик нагретой и охлаждаемой солнечной панели: а) ФЭМ JKM-230-P60; б) устройство для измерения ВАР; в) змеевик для охлаждения; г) бак для хладагента в пленке; д) радиатор для охлаждения жидкости; е) Источник постоянного тока (ИПТ) и система для измерений; ж) персональный компьютер (ПК) для измерений; з) система шлангов и датчиков температуры

Fig. 6. Experimental installation for measuring the characteristics of a heated and cooled solar panel: а) FEM JKM-230-P60; б) device for measuring VAC; в) cooling coil; г) refrigerant tank in film; д) radiator for liquid cooling; е) Direct current source (DCS) and a system for measuring; ж) personal computer (PC) for measurements; з) hose and temperature sensor system

Таблица 2. Характеристики материалов труб для охлаждения ФЭМ

Table 2. Characteristics of pipes for cooling photoelectric module

Материал Material	Наружный диаметр, мм Outer diameter, mm	Толщина стенки, мм Wall thickness, mm	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К) Coefficient of thermal conductivity, W/(m·K)
Труба металлопластиковая d=16 мм V1620.100 ГОСТ 32415-2013 Metal-plastic pipe d=16 mm V1620.100 ГОСТ 32415-2013	16	2	0,43
Труба гофрированная из нержавеющей стали d=15 мм TIM SS304 25A ГОСТ 5949-2018 Corrugated stainless steel pipe d=15 mm TIM SS304 25A ГОСТ 5949-2018	15	3	17
Труба медная d=6 мм марка М1ф ГОСТ 11383-2016 Copper pipe d=6 mm grade M1f ГОСТ 11383-2016	6	0,8	305

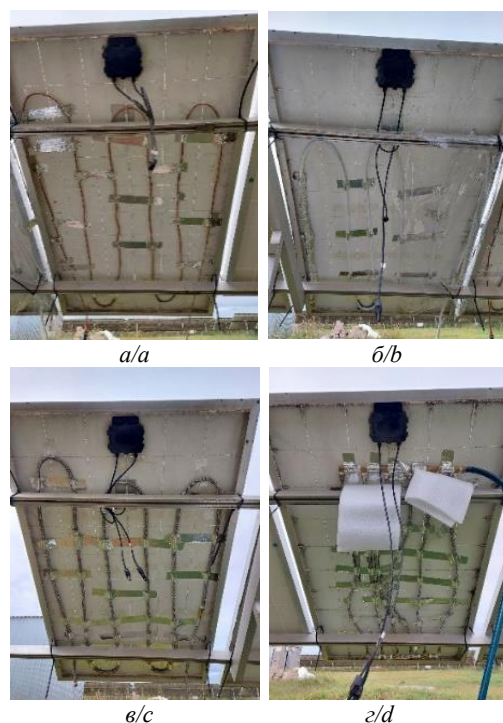


Рис. 7. Способы крепления систем охлаждения к ФЭМ: а) змеевик из медной трубки; б) змеевик из металлопластиковой трубки; в) змеевик из трубки нержавеющей стали; г) параллельная система труб из нержавеющей стали

Fig. 7. Methods of fastening cooling systems to the FEM: а) coil made of copper tube; б) coil made of metal-plastic tube; в) coil made of stainless steel tube; г) parallel system of stainless steel pipes



а/а б/б

Рис. 8. а) радиатор от мотоблока; б) конденсатор от холодильника размером 520×1000

Fig. 8. a) radiator from the tillerblock; b) condenser from the refrigerator with dimensions of 520×1000

Таблица 3. Характеристики радиатора 190N от мотоблока

Table 3. Characteristics of the 190N radiator from the tillerblock

Характеристика Characteristic	Значение Meaning
Материал радиатора/Radiator material	Алюминий Aluminum
Тип охлаждения/Type of cooling	Водяное/Water
Габариты по дну, Д×Ш, мм Dimensions along the bottom, L×W, mm	206×186
Высота общая, мм/Total height, mm	195
Заливная горловина, внутренний и наружный диаметр, мм Filler neck, inner and outer diameter, mm	48/65
Вес нетто/брутто, г/Net/gross weight, g	2950/3205

Для охлаждения циркулирующей жидкости использовался радиатор 190N от мотоблока Парма МК-01-7.0 (рис. 8, а), технические характеристики представлены в табл. 3, и конденсатор от холодильной камеры (рис. 8, б), размеры конденсатора представлены в табл. 4. Конденсатор от холодильной камеры уложен в землю на глубину 25 см, дан-

ная глубина выбрана для исключения глубокого прогрева верхнего слоя почвы от воздействия прямых солнечных лучей СНиП 3.02.01-87.

Таблица 4. Характеристики конденсатора от холодильника

Table 4. Characteristics of the condenser from the refrigerator

Характеристика Characteristic	Значение Meaning
Габариты Ш×Д×В, мм/Dimensions W×D×H, mm	520×1000×8
Материал трубки/Tube material	Медь/Copper
Наружный диаметр трубки, мм Tube outer diameter, mm	6
Толщина стенки трубки, мм Tube wall thickness, mm	2

Приборы для экспериментальных измерений представлены на рис. 9.

Объем бака с циркулирующей жидкостью – 100 л. Пластиковый бак, выкрашенный в черный цвет, закрывался отражающей пленкой для исключения нагрева. В качестве хладагента использована вода (рис. 6, з).

Также необходимо отметить некоторые допущения в эксперименте:

- от насоса до каждого ФЭМ разная длина шланга на вход и на выход в пределах длины стола 20 м;
- до 12:00 нагрев солнечных модулей происходил неравномерно ввиду восхода солнца и нагрева крайней левой стороны стола;
- в качестве источника питания для насоса 12 В использовался ИПТ;
- все датчики измерений (датчик температуры окружающего воздуха и датчик влажности) получали данные в тени под ФЭМ;
- температура радиатора от мотоблока и конденсатора от холодильника измерялась в тени;
- освещенность ФЭМ на протяжении эксперимента постоянно изменялась ввиду реальных условий;



а/а

б/б

в/в

г/г

д/д

е/е

ж/ж

з/з

Рис. 9. Приборы и датчики для измерения показателей охлаждения и нагрева ФЭМ: а) инфракрасная камера VIRTOR VC328A 256×192; б) прибор для измерения солнечной радиации TES 1333 SOLAR POWER METER; в) источник постоянного тока GOPHERT CPS-6011 0–60 В 0–11 А; г) пирометр Mestec IR02C; д) плата Arduino UNO; е) датчик температуры и влажности DHT 11; ж) датчики температуры D18B20

Fig. 9. Devices and sensors for measuring cooling and heating parameters of FEM: а) infrared camera VIRTOR VC328A 256×192; б) device for measuring solar radiation TES 1333 SOLAR POWER METER; в) direct current source GOPHERT CPS-6011 0–60 V 0–11 A; д) pyrometer Mestec IR02C; е) Arduino UNO board; ж) DHT 11 temperature and humidity sensor; г) D18B20 temperature sensors

- все ФЭМ имели окисления контактов в нижней части модуля;
- измерение и регистрация солнечной радиации производились перпендикулярно каждой панели в верхнем правом углу;
- на тепловизоре сделаны снимки ФЭМ с наиболее нагретыми и охлажденными участками фронтальной и тыльной стороны;
- ФЭМ без охлаждения находилась в конце ряда (на западной стороне). Это означает, что панели, расположенные западнее, нагреваются на 30 мин позже панелей, которые расположены восточнее;
- ФЭМ оставались в статичном пространственном положении на протяжении всех дней измерений;
- модули ФЭМ, используемые в эксперименте, имеют деградацию электрической мощности около 10–12 %, поскольку произведены в 2011 г.;

- охлаждение ФЭМ занимает часть площади модуля (около 40–50 % от общей площади ФЭМ);
- для корректности и точности данных измерений ВАХ солнечных панелей необходима минимальная освещенность модуля $E=650 \text{ Вт/м}^2$.

Результаты исследования

Замеры производились 26.07.2023, 27.07.2023, 01.08.2023 с 10:00–13:20 по Московскому времени каждые 10 мин до и после охлаждения. Прогноз погоды получен на сайте Яндекс погода (рис. 10). Способы прогнозирования погоды для солнечных электростанций представлены в источниках [22–25].

Измерения 26.07.23 производились с закрытой тыльной стороной ФЭМ с помощью отражающей пленки и фанеры (рис. 11). Для данного способа трубки с хладагентом закрывались отражающей пленкой толщиной 3 мм (рис. 11, А) и фанерой толщиной 6 мм по всей площади ФЭМ (рис. 11, Б).

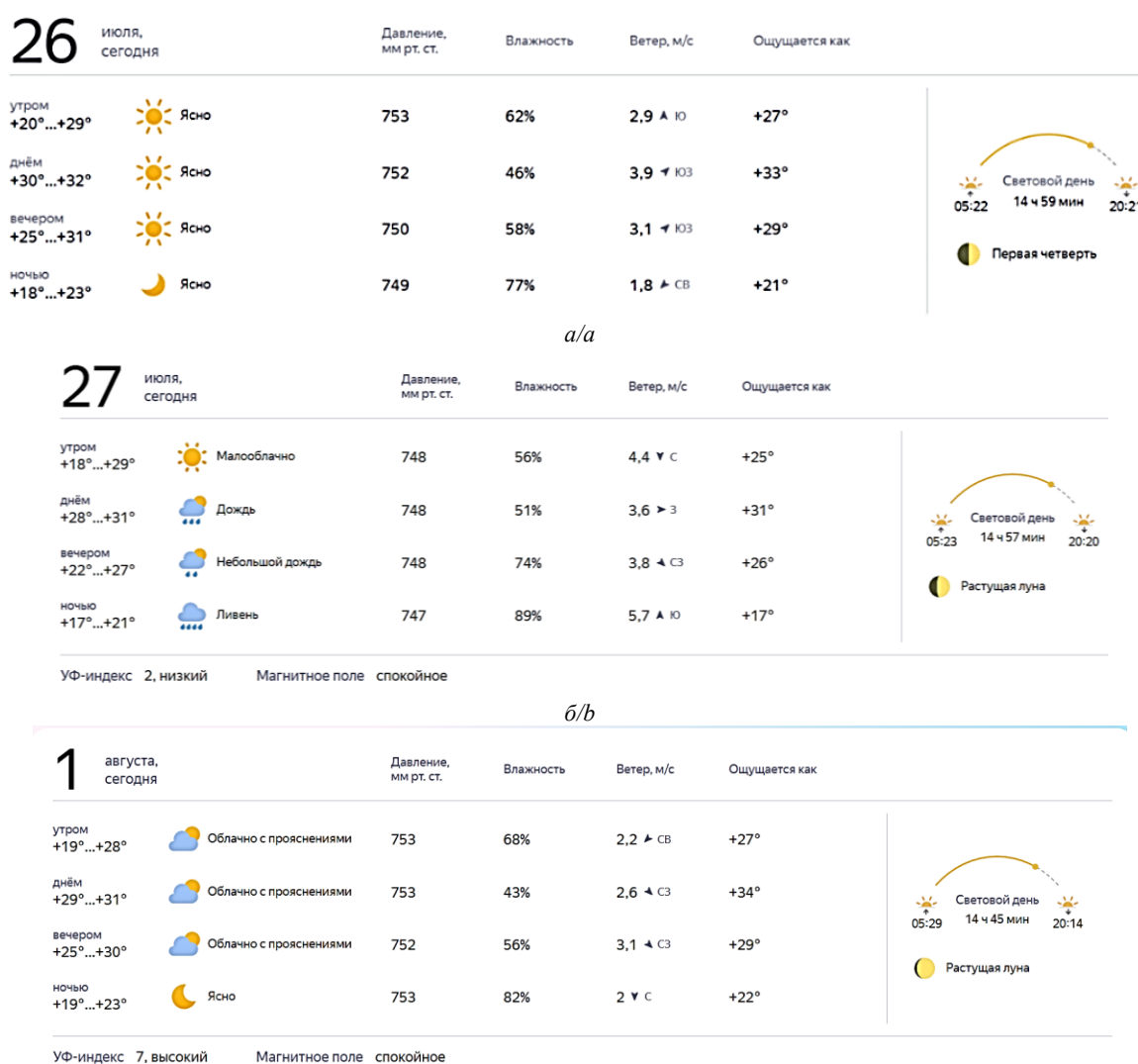


Рис. 10. Прогноз погоды для п-ова Крым, с. Карьерное: а) 26.07.2023; б) 27.07.2023; в) 01.08.2023

Fig. 10. Weather forecast for the Crimea, village of Karyerno: a) 26.07.2023; b) 27.07.2023; c) 01.08.2023



А/А

Б/В

Рис. 11. А) отражающая пленка толщиной 3 мм на тыльной стороне ФЭМ; Б) фанера на тыльной стороне ФЭМ толщиной 6 мм

Fig. 11. А) 3 mm thick reflective film on the back of the FEM; Б) 6 mm thick plywood on the back of the FEM

Во время измерений данные записывались в таблицу Excel. Измерения проводились до охлаждения и через 10 минут после него.

26.07.2023 проведены измерения системы охлаждения, которая закрыта с помощью фанеры и отражающей пленки (рис. 11). Данная система после измерений показала нагрев ФЭМ, который превосходил нагрев ФЭМ без охлаждения (эталонный модуль измерений). Чтобы получить охлаждающий эффект 27.07.2023 принято решение открыть систему и использовать циркуляцию жидкости в трубках без фанеры и отражающей пленки.

Из графика (рис. 12) видно, что наиболее близкой системой по температуре к эталонному ФЭМ без охлаждения является система с медной трубкой и нержавеющей трубкой. Освещенность во время измерений 13:25 составляла 70 Вт/м², тогда как освещенность для системы из нержавеющей стали в 12:30 составила 820 Вт/м².

Таблица 5. Пример данных по нагреву и охлаждению ФЭМ 26.07.2023 с 10:00 до 12:20

Table 5. Example of data on FEM heating and cooling on 26.07.2023 from 10:00 to 12:20

Время измерений Measurement time	10:00	10:10	10:20	10:30	10:50	11:00	11:10	11:20	11:45	12:00	12:10	12:20
ФЭМ без охлаждения/Photovoltaic module without cooling												
Температура окр. воздуха, t1, C° Ambient air temperature t1, C°	29	29	29	30	30	30	32	32	31	31	31	31
Влажность окр. воздуха, R1, % Humidity of the ambient air, R1, %	56	53	53	52	50	50	45	44	48	46	48	47
Солнечная радиация, Вт/м ² Solar radiation, W/m ²	510	560	670	640	680	750	740	770	770	830	850	870
ФЭМ с охлаждением/Photovoltaic module with cooling												
Начальная температура воды, t0, C° (пирометр) Initial water temperature, t0, C° (pyrometer)	30	24	24	30	26	27	27	28	28	28	28	28
Температура жидкости на входе t2, C° Inlet liquid temperature t2, C°	29	25	25	25	26	26	27	28	26	27	29	28
Температура жидкости на выходе t3, C° Outlet liquid temperature t3, C°	27	25	27	26	27	27	29	29	31	31	50	38
Температура жидкости после радиатора t4, C° Liquid temperature after the radiator is t4, C°	25	24	24	24	25	26	27	27	27	27	28	28
Температура радиатора (земли), макс Radiator temperature (ground), max	26	24	26	24	26	27	29	30	38	36	31	35

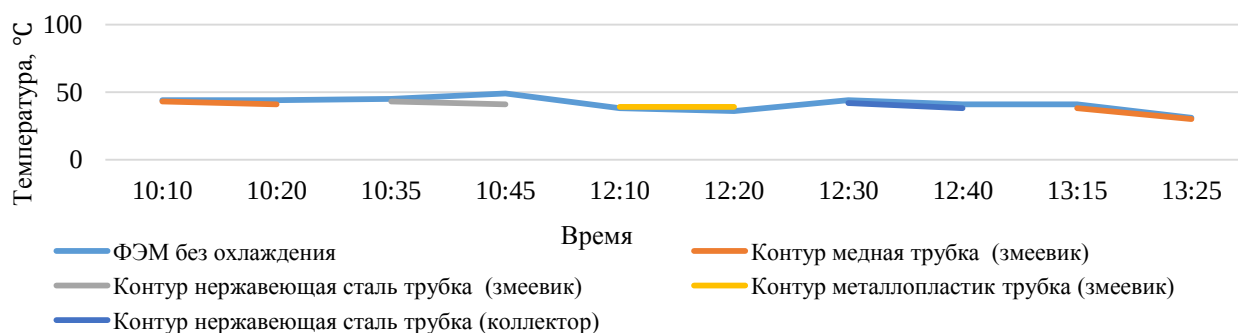


Рис. 12. График точек минимальной температуры нагрева фронтальной поверхности ФЭМ без использования фанеры и отражающей пленки, 27.07.2023

Fig. 12. Graph of points of minimum heating temperature of the front surface of the PV-panel without plywood and reflective film, 27.07.2023

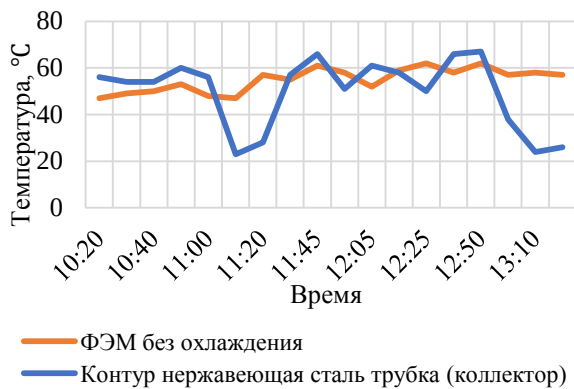


Рис. 13. График точек минимальной температуры нагрева фронтальной поверхности ФЭМ с использованием системы охлаждения из трубок из нержавеющей стали, 01.08.2023

Fig. 13. Graph of the points of the minimum heating temperature of the front surface of the photovoltaic module using a cooling system made of stainless steel tubes, 01.08.2023

Поэтому 01.08.23 ввиду пасмурной погоды проведены дополнительные измерения для системы охлаждения из нержавеющей стали с параллельной системой труб (рис. 13).

После всех измерений получены следующие результаты

1. Наибольшая разность температур (между максимальной и минимальной температурой) на фронтальной поверхности ФЭМ получена за счет прилегания трубки из меди составила 16 °C (41 и 57 °C), рис. 14.

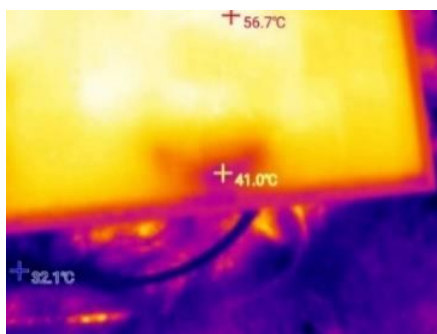


Рис. 14. Инфракрасный снимок фронтальной поверхности солнечной панели с охлаждением из медной трубки

Fig. 14. Infrared image of the front surface of the solar panel with cooling from a copper tube

Однако после дополнительных измерений 01.08.2023 и добавления клея-герметика Soudal разность температур для нержавеющей трубки составила 28 °C (38 и 66 °C), рис. 15.

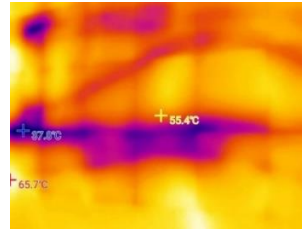


Рис. 15. Инфракрасный снимок фронтальной части солнечной панели открытой системы охлаждения с помощью нержавеющей параллельной системы труб

Fig. 15. Infrared image of the front of the solar panel of an open cooling system using a stainless parallel pipe system

2. После дополнительных измерений 01.08.23 в 12:25 график зависимости электрической мощности от напряжения солнечной панели с параллельной системой охлаждения труб в сравнении с графиком зависимости электрической мощности от напряжения солнечной панели без охлаждения показал увеличение выдаваемой мощности на 3,5 % от общей электрической мощности ФЭМ, или 8 Вт, рис. 16 (без учета электрической мощности нагретой жидкости в контуре охлаждения).

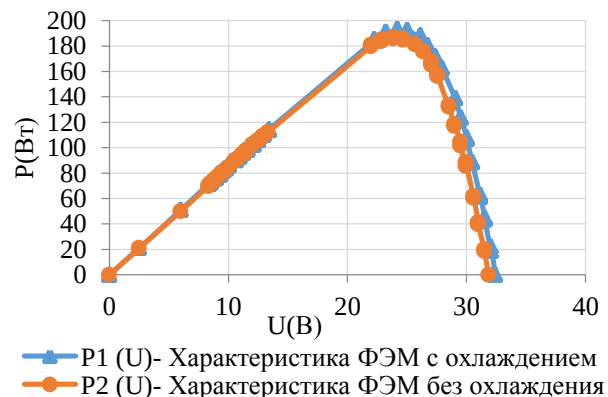


Рис. 16. График электрической мощности ФЭМ, где P1 – электрическая мощность ФЭМ с охлаждением, P2 – электрическая мощность ФЭМ без охлаждения, 01.08.23 в 12:25

Fig. 16. Power characteristics of the FEM, where P1 is the power of the FEM with cooling, P2 is the power of the FEM without cooling, 01.08.23, 12:25

3. Кроме увеличения электрической мощности ФЭМ за счёт снижения температуры на поверхности солнечной панели получены результаты по охлаждению нагретой жидкости в контуре для охлаждения панели. Так, наибольшую эффективность охлаждения жидкости показал конденсатор, закопанный под землю. Наибольший эффект достигнут 26.07.23 в 12:10 на змее-

вике с контуром из нержавеющей стали. Температура жидкости на выходе из параллельной системы труб составила 50 °С, после охлаждения температура вернулась к входным значениям 28 °С. В случае погрешности измерений на металлопластике 26.07.23 в 12:30 получена разница температур в 9 градусов (вход 30 °С, выход 41 °С).

4. К отрицательным результатам для солнечной панели следует отнести нагрев закрытого типа охлаждения (где использовалась фанера и отражающая пленка), к примеру в часы максимальной солнечной активности в 12:10 26.07.23 разность максимальных температур фронтальной поверхности системы без охлаждения и с охлаждением закрытого типа составила 16 градусов (71 и 55 °С).

Наиболее эффективной системой охлаждения является система с параллельной системой труб из нержавеющей стали с открытым типом (без фанеры и отражающей пленки) с применением в качестве клея материала Soudal с охлаждающим контуром в виде конденсатора от холодильной установки, расположенным под землей. Данная система позволила получить 8 Вт дополнительной электроэнергии и приблизиться к значениям эталонного модуля, охладить жидкость с 50 до 28 °С, снизить максимальную температуру фронтальной поверхности ФЭМ с 66 до 38 °С.

Обсуждение и заключение

Результаты экспериментов и выводы по работе носят частный характер, однако они указывают на

направление дальнейших исследований по повышению эффективности работы ФЭП в неблагоприятных условиях эксплуатации для изолированных энергосистем.

Отвод тепловой энергии от фотоэлектрических модулей осуществлялся с помощью закрытой системы жидкостного охлаждения, расположенного на обратной стороне солнечного модуля, методом теплообмена.

В результате экспериментальных исследований из четырёх различных типов охлаждения ФЭМ удалось определить наиболее эффективный способ отбора тепла – с помощью параллельной системы труб из нержавеющей стали.

Данный тип охлаждения позволил не только увеличить выходную энергетическую эффективность солнечного модуля на 3,3–3,6 % от общей выдаваемой электрической мощности, но и с помощью хладагента, циркулирующего в трубке, отобрать и саккумулировать тепловую энергию для собственных нужд в баке либо охладить жидкость до входных значений (с 50 до 28 °С) с помощью конденсатора от холодильной камеры. Эффект от охлаждения ФЭП, полученный экспериментально, имеет небольшое значение, однако превышает значения погрешности измерений прибора ВАХ.

Система охлаждения, выполненная в виде змеевика из труб из нержавеющей стали, в некоторых точках фотоэлектрических модулей снизила температуру модуля с 66 до 28 °С. Клей-герметик Soudal FIX all позволил осуществить надежное крепление контура охлаждения и обеспечить теплообмен с обратной поверхностью солнечной панели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юдаев И.В., Даус Ю.В., Фамбага В.В. Возобновляемые источники энергии. 2е изд., стер. – СПб: Лань, 2021. – 328 с.
2. Шалимова К.В. Физика полупроводников. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 392 с.
3. Гульков В.Н., Колесниченко И.Д., Коротков К.Е. Исследование влияния нагрева солнечных модулей на эффективность преобразования излучения // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2019. – № 1. – С. 10–16.
4. Велькин В.И. Методология расчета комплексных систем ВИЭ для использования на автономных объектах: монография. – Екатеринбург: УрФУ, 2015. – 226 с.
5. Елистратов В.В., Кузнецов М.В. Теоретические основы нетрадиционной и возобновляемой энергетики. – СПб: Изд-во СПбГПУ, 2004. – 59 с.
6. Махсумов И.Б. Разработка энергокомплекса на базе возобновляемых источников энергии для электроснабжения труднодоступных районов республики Таджикистан с использованием термозащиты солнечных модулей: дис. ... канд. техн. наук. – Челябинск, 2020. – 209 с.
7. Тханг Л.В., Шагин А.В. Активные методы водяного охлаждения для солнечного фотоэлектрического модуля // Инженерный вестник Дона. – 2020. – № 2. – С. 12–25.
8. Бессель В.В., Кучеров В.Г., Мингалеева Р.Д. Изучение солнечных фотоэлектрических элементов. – М.: ИЦ РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 2016. – 90 с.
9. Sattar M., Rehman A. Performance analysis and optimization of a cooling system for hybrid solar panels based on climatic conditions of Islamabad // Energies. – 2022. – Vol. 15. – P. 1–22. DOI:10.3390/en15176278.
10. Sharaf M., Yousef S., Huzayyin S. Review of cooling techniques used to enhance the efficiency of photovoltaic power systems // Springer. – 2022. – Vol. 29. – P. 26131–26159. DOI:10.1007/s11356-022-18719-9.
11. Zanlorenzi G., Szejka A., Junior O. Hybrid photovoltaic module for efficiency improvement through an automatic water cooling system: a prototype case study // Journal of Cleaner Production. – 2018. – Vol. 196. – P. 195–204. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.06.065.
12. Alktranee M., Bencs P. Effect of evaporative cooling on photovoltaic module performance // Process Integration and Optimization for Sustainability. – 2022. – Vol. 6. – P. 921–930. DOI:10.1007/s41660-022-00268-w.

13. Ibrahim A., Ramadan M.R., Khallaf A. A comprehensive study for Al₂O₃ nanofluid cooling effect on the electrical and thermal properties of polycrystalline solar panels in outdoor conditions // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2023. – Vol. 1. – P. 1–22. DOI:10.1007/s11356-023-25928-3.
14. Sunarno A., Rakin S., Suherman S. A passive cooling system for increasing efficiency of solar panel output // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2019. – Vol. 1379. – P. 1–6. DOI: 10.1088/1742-6596/1373/1/012017.
15. Siker J., Kusakana K., Numbi B.P. Review of cooling technologies for solar photovoltaic systems // *Energy*. – 2020. – Vol. 79. – P. 192–203.
16. Colt G. Performance evaluation of a PV panel by rear surface water active cooling // *ICATE*. – 2016. – Vol. 10. – P. 1–5. DOI: 10.1109/ICATE.2016.7754634.
17. Kabeel A., Abdelgaied M., Sathyamurthy R. A comprehensive investigation of the optimization cooling technique for improving the performance of PV module with reflectors under Egyptian conditions // *Solar Energy*. – 2019. – Vol. 186. – P. 257–263. DOI: 10.1016/j.solener.2019.05.019.
18. Performance evaluation of a PV (photovoltaic) module by back surface water cooling for hot climatic conditions / H. Bahaidarah, A. Subhan, P. Gandhidasan, S. Rehman // *Energy*. – 2013. – Vol. 59. – P. 445–453. DOI: 10.1016/j.energy.2013.07.050.
19. Experimental and numerical performance analysis of a converging channel heat exchanger for PV cooling / A. Baloch, H. Bahaidarah, P. Gandhidasan, F. Al-Sulaiman // *Energy Conversion and Management*. – 2015. – Vol. 103. – P. 14–27. DOI: 10.1016/j.enconman.2015.06.018.
20. Experimental performance investigation of photovoltaic/thermal (PV-T) system / M. Ozgoren, M.H. Aksoy, C. Bakir, S. Dogan // *EPJ Web Conference*. – 2013. – Vol. 45. – P. 301–312. DOI: 10.1051/epjconf/20134501106.
21. FIX ALL эластичный гибридный клей-герметик. URL: https://soudal.ru/images/stories/soudal/tds-diy/tds_fix-all-classic_ru.pdf?ysclid=llzzvlqofs882636174 (дата обращения: 01.09.2023).
22. О рациональной размерности базиса регрессионной модели для задачи адаптивного краткосрочного прогнозирования состояния дискретной нестационарной динамической системы / А.С. Глазырин, Е.В. Боловин, О.В. Архипова, В.З. Ковалев, Р.Н. Хамитов, С.Н. Кладиев, А.А. Филипас, В.В. Тимошкин, В.А. Копырин, Е.А. Беляускене // *Известия Томского политехнического университета*. – 2023. – Т. 334. – № 11. – С. 257–272.
23. Адаптивное краткосрочное прогнозирование потребления электроэнергии автономными энергосистемами малых северных поселений на основе методов ретроспективного регрессионного анализа / А.С. Глазырин, Е.В. Боловин, О.В. Архипова, В.В. Тимошкин, В.А. Копырин // *Известия Томского политехнического университета*. – 2023. – Т. 334. – № 4. – С. 231–248.
24. Архипова О.В., Ковалев В.З., Хамитов Р.Н. Методика моделирования регионально обособленного электротехнического комплекса // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2019. – Т. 330. – № 1. – С. 173–180.
25. Адаптивное краткосрочное прогнозирование потребления электроэнергии автономными энергосистемами малых северных поселений на основе методов корреляционного анализа / Ю.Н. Исаев, О.В. Архипова, В.З. Ковалев, Р.Н. Хамитов // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2023. – Т. 334. – № 2. – С. 224–239.

Информация об авторах

Александр Сергеевич Сорогин, аспирант кафедры электроэнергетики, Тюменский Индустриальный Университет, Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38; sorg96@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-3579-5264>

Рустам Нуриманович Хамитов, доктор технических наук, профессор кафедры электроэнергетики, Тюменский Индустриальный Университет, Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38; профессор кафедры электрической техники Омского государственного технического университета, Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11; apple_27@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9876-5471>

Сергей Николаевич Жеребцов, кандидат технических наук, доцент кафедры электроэнергетики, Тюменский Индустриальный Университет, Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38; s.n.zherebtsov@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3579-5264>

Поступила в редакцию: 06.02.2024

Поступила после рецензирования: 09.09.2024

Принята к публикации: 07.10.2024

REFERENCES

1. Yudaev I.V., Daus Y.V., Famaga V.V. *Renewable energy sources*. St. Petersburg, Lan Publ., 2021. 328 p. (In Russ.)
2. Shalimova K.V. *Physics of semiconductors*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1985. 392 p. (In Russ.)
3. Gulkov V.N., Kolesnichenko I.D., Korotkov K.E. Investigation of the effect of heating solar modules on the efficiency of radiation conversion. *Izvestiya SPbSETU "LETI"*, 2019, no. 1, pp. 10–16. (In Russ.)
4. Velkin V.I. *Methodology for calculating integrated renewable energy systems for use in autonomous facilities: monograph*. Yekaterinburg, UrFU Publ., 2015. 226 p. (In Russ.)
5. Elistratov V.V., Kuznetsov M.V. *Theoretical foundations of non-traditional and renewable energy*. St. Petersburg, St. Petersburg State University Publ. house, 2004. 59 p. (In Russ.)

6. Makhsumov I.B. *Development of an energy complex based on renewable energy sources for power supply to hard-to-reach areas of the Republic of Tajikistan using thermal protection of solar modules*. Cand. Diss. Chelyabinsk, 2020. 209 p. (In Russ.)
7. Thang L.V., Shchagin A.V. Active methods of water cooling for a solar photovoltaic module. *Engineering Bulletin of the Don*, 2020, no. 2, pp. 12–25. (In Russ.)
8. Bessel V.V., Kucherov V.G., Mingaleeva R.D. *Study of solar photovoltaic cells*. Moscow, Center of Gubkin Russian State University of Oil and Gas (NRU) Publ., 2016. 90 p. (In Russ.)
9. Sattar M., Rehman A. Performance analysis and optimization of a cooling system for hybrid solar panels based on climatic conditions of Islamabad. *Energies*, 2022, vol. 15, pp. 1–22.
10. Sharaf M., Yousef S., Huzayyin S. Review of cooling techniques used to enhance the efficiency of photovoltaic power systems. *Springer*, 2022, vol. 29, pp. 26131.
11. Zanlorenzi G., Szejka A., Junior O. Hybrid photovoltaic module for efficiency improvement through an automatic water cooling system: a prototype case study. *Journal of Cleaner Production*, 2018, vol. 196, pp. 195–204.
12. Alktranee M., Bencs P. Effect of evaporative cooling on photovoltaic module performance. *Process Integration and Optimization for Sustainability*, 2022, vol. 6, pp. 921–930.
13. Ibrahim A., Ramadan M.R., Khallaf A. A comprehensive study for Al₂O₃ nanofluid cooling effect on the electrical and thermal properties of polycrystalline solar panels in outdoor conditions. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, vol. 1, pp. 1–22.
14. Sunarno A., Rakin S., Suherman S. A passive cooling system for increasing efficiency of solar panel output. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1379, pp. 1–6.
15. Siker J., Kusakana K., Numbi B.P. Review of cooling technologies for solar photovoltaic systems. *Energy*, 2020, vol. 79, pp. 192–203.
16. Colza G. Performance evaluation of a PV panel by rear surface water active cooling. *ICATE*, 2016, vol. 10, pp. 1–5.
17. Kabeel A., Abdelgaied M., Sathyamurthy R. A comprehensive investigation of the optimization cooling technique for improving the performance of PV module with reflectors under Egyptian conditions. *Solar Energy*, 2019, vol. 186, pp. 257–263.
18. Bahaidarah H., Subhan A., Gandhidasan P., Rehman S. Performance evaluation of a PV (photovoltaic) module by back surface water cooling for hot climatic conditions. *Energy*, 2013, vol. 59, pp. 445–453.
19. Baloch A., Bahaidarah H., Gandhidasan P., Al-Sulaiman F. Experimental and numerical performance analysis of a converging channel heat exchanger for PV cooling. *Energy Conversion and Management*, 2015, vol. 103, pp. 14–27.
20. Ozgoren M., Aksoy M.H., Bakir C., Dogan S. Experimental performance investigation of photovoltaic/thermal (PV-T) system. *EPJ Web Conference*, 2013, vol. 45, pp. 301–312.
21. *FIX ALL elastic hybrid adhesive sealant*. Available at: https://soudal.ru/images/stories/soudal/tds-diy/tds_fix-all-classic_ru.pdf?ysclid=llzzvlqofs882636174 (accessed: 1 September 2023).
22. Glazyrin A.S., Bolovin E.V., Arkhipova O.V., Kovalev V.Z., Khamitov R.N., Kladiev S.N., Filipas A.A., Timoshkin V.V., Kopyrin V.A., Beliauskene E.A. Rational dimension of a basis of a regression model for adaptive short-term forecasting the state of a discrete nonstationary dynamic system. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 11, pp. 257–272. (In Russ.)
23. Glazyrin A.S., Bolovin E.V., Arkhipova O.V., Timoshkin V.V., Kopyrin V.A. Adaptive short-term forecasting of electricity consumption by autonomous power systems of small northern settlements based on retrospective regression analysis methods. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 4, pp. 231–248. (In Russ.)
24. Arkhipova O.V., Kovalev V.Z., Khamitov R.N. Methodology for modeling a regional isolated electrotechnical complex. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 1, pp. 173–180. (In Russ.)
25. Isaev Yu.N., Arkhipova O.V., Kovalev V.Z., Khamitov R.N. Adaptive short-term forecasting of electricity consumption by autonomous power systems of small northern settlements based on correlation analysis methods. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 2, pp. 224–239. (In Russ.)

Information about the authors

Alexander S. Sorogin, Postgraduate Student, Industrial University of Tyumen, 38, Volodarsky street, Tyumen, 625000, Russian Federation; sorg96@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-3579-5264>

Rustam N. Khamitov, Dr. Sc., Professor, Industrial University of Tyumen, 38, Volodarsky street, Tyumen, 625000, Russian Federation; Professor, Omsk State Technical University, 11, Mira avenue, Omsk, 644050, Russian Federation; apple_27@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9876-5471>

Sergey N. Zherebtsov, Cand. Sc., Associate Professor, Industrial University of Tyumen, 38, Volodarsky street, Tyumen, 625000, Russian Federation; s.n.zherebtsov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3579-5264>

Received: 06.02.2024

Revised: 09.09.2024

Accepted: 07.10.2024

УДК 534.29.66.084:534-13

DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4463

Шифр специальности ВАК: 2.6.13

Выявление условий ультразвукового воздействия на газодисперсную среду и создание излучателей для повышения эффективности коагуляции в устройствах с закрученными потоками

В.Н. Хмелев, В.А. Нестеров[✉], А.В. Шалунов, С.А. Терентьев

Алтайский государственный технический университет, Россия, г. Бийск

[✉]nva@bti.secna.ru

Аннотация. *Актуальность* исследования обусловлена наличием и неконтролируемым распространением в воздухе аэрозолей различных веществ, которые оказывают негативное влияние на человека, флору и фауну. Особенно эта проблема стоит при добыче, переработке и сжигании георесурсов. Наиболее эффективным способом решения проблемы является применение ультразвуковых колебаний высокой интенсивности, воздействие которых на аэрозоли вызывает процессы сближения и агломерации мелких частиц в крупные. Однако при низкой концентрации эффективность коагуляции частиц недостаточна для увеличения степени улавливания газоочистного оборудования. Поэтому существует необходимость поиска новых путей оптимизации ультразвукового оборудования для коагуляции высокодисперстных частиц с целью повышения его эффективности. *Цель:* определение оптимальных условий ультразвукового воздействия на закрученный газодисперсный поток, обеспечивающих максимальную эффективность агломерации высокодисперсных частиц. Проведение сравнительных исследований процесса коагуляции частиц при воздействии ультразвуковыми полями, формируемыми различными видами излучателей и их совместным воздействием, позволит определить эффективность ультразвуковой коагуляции и оптимальную конструктивную схему ультразвукового воздействия. *Объекты:* процесс коагуляции частиц под ультразвуковым воздействием, формируемым различными типами излучателей. *Методы:* компьютерное моделирование формируемого ультразвукового поля методом конечных элементов с помощью гармонического акустического анализа; моделирование и разработка дисковых излучателей методом конечных элементов с помощью модального анализа. Для определения характеристик аэрозоля использован Анализатор частиц Malvern Spraytec. *Результаты.* Результаты расчетов и экспериментов показали, что наиболее энергоэффективным может быть применение в качестве основного источника ультразвукового воздействия для устройств с закрученными потоками протяженного трубчатого излучателя, работающего на изгибно-диаметральной моде колебаний и формирующего кольцевую стоячую волну с уровнем звукового давления 162–165 дБ. Дальнейшее повышение эффективности коагуляции может обеспечиваться только совместным воздействием, трубчатым излучателем и продольно-колеблющимся излучателем. Это существенно модифицирует структуру поля и обеспечивает не только увеличение уровня звукового давления (до 167 дБ), но и количества формируемых узловых поверхностей (до 44).

Ключевые слова: ультразвук, газоочистка, коагуляция, агломерация, акустическое поле, фракционная эффективность, резонансный промежуток, вихревой поток

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта РФ (проект №19-19-00121, <https://rscf.ru/project/19-19-00121/>).

Для цитирования: Выявление условий ультразвукового воздействия на газодисперсную среду и создание излучателей для повышения эффективности коагуляции в устройствах с закрученными потоками / В.Н. Хмелев, В.А. Нестеров, А.В. Шалунов, С.А. Терентьев // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 10. – С. 238–252. DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4463

UDC 534.29.66.084:534-13

DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4463

Identification of conditions for ultrasonic effect on gas-dispersed medium and creation of radiators to increase the efficiency of coagulation in devices with swirling flow

V.N. Khmelev, V.A. Nesterov✉, A.V. Shalunov, S.A. Terentyev

Altay State Technical University, Biysk, Russian Federation

✉nva@bti.secna.ru

Abstract. Relevance. The presence and uncontrolled distribution of aerosols of various substances in the air, which have a negative impact on humans, flora and fauna. This problem is especially acute in the extraction, processing and combustion of georesources. The most effective way to solve the problem is the use of high-intensity ultrasonic vibrations, the effect of which on aerosols causes convergence and agglomeration of small particles into large ones. However, at low concentrations, the particle coagulation efficiency is not sufficient to increase the recovery rate of gas treatment equipment. Therefore, there is a need to find new ways to optimize ultrasonic equipment for coagulation of fine particles in order to increase its efficiency. **Aim.** To determine the optimal conditions for ultrasonic influence on a swirling gas-dispersed flow, ensuring maximum efficiency of agglomeration of highly dispersed particles. Carrying out comparative studies of coagulation of particles when exposed to ultrasonic fields generated by different types of radiators and their combined effects will make it possible to determine the effectiveness of ultrasonic coagulation and the optimal design scheme of ultrasonic exposure. **Objects.** Coagulation of particles under ultrasonic impact, formed by various types of radiators. **Methods.** Computer modeling of the generated ultrasonic field using the finite element method with the help of harmonic acoustic analysis. Finite element modeling and design of disk radiators using modal analysis. To determine the characteristics of the aerosol, a Malvern Spraytec Particle Analyzer was used. **Results.** The results of calculations and experiments have shown that the use of an extended ultrasonic tubular radiator operating on a bending-diametric mode of vibration and forming a ring standing wave with a sound pressure level of 162–165 dB as the main source of ultrasonic impact for devices with swirling flows may be the most energy efficient. Further increase in the efficiency of coagulation can only be achieved by the combined action of a tubular radiator and a longitudinally oscillating radiator. This significantly modifies the field structure and provides not only an increase in the sound pressure level (up to 167 dB), but also in the number of formed nodal surfaces (up to 44).

Keywords: ultrasound, gas purification, coagulation, agglomeration, acoustic field, fractional efficiency, resonant gap, vortex flow

Acknowledgements: The research was carried out using the RSF grant (project no. 19-19-00121, <https://rscf.ru/project/19-19-00121/>).

For citation: Khmelev V.N., Nesterov V.A., Shalunov A.V., Terentyev S.A. Identification of conditions for ultrasonic effect on gas-dispersed medium and creation of radiators to increase the efficiency of coagulation in devices with swirling flow. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 10, pp. 238–252. DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4463

Введение

Основные усилия экологических служб направлены на обеспечение высококачественной очистки окружающего воздуха, загрязняемого промышленными производствами и техногенными природными явлениями. Обусловлено это тем, что наличие и неконтролируемое распространение в воздухе аэрозолей различных веществ оказывает негативное влияние на человека, флору и фауну [1, 2]. Особенно эта проблема стоит при добыче, переработке и сжигании георесурсов. Общеизвестно, что наиболее опасными являются частицы размером 2,5 мкм и менее, поскольку дыхательная система

вносит такие частицы в кровоток и накапливает токсический материал в органах человека [3, 4]. Это определяет исключительную важность поиска способов защиты людей и разработки систем очистки воздуха от мелкодисперсных аэрозолей.

Все существующие системы очистки (сепараторы) практически не улавливают частицы размером менее 2,5 мкм [5–8], а системы, способные улавливать такие частицы (фильтры и электрофильтры), характеризуются малой пылеемкостью или работают с образованием очень вредных для окружающей среды и здоровья человека оксидов азота и озона.

Наиболее эффективным способом решения проблемы является применение ультразвуковых (УЗ) колебаний высокой интенсивности, воздействие которых на аэрозоли вызывает процессы сближения и агломерации мелких частиц в крупные. Этот процесс называется ультразвуковой агломерацией [9, 10]. Установлено [11–14], что кроме уровня давления, создаваемого УЗ-колебаниями, определяющим фактором для реализации механизмов взаимодействия частиц размером менее 2,5 мкм является расстояние между частицами, т. е. УЗ-воздействие эффективно только для относительно высоких счетных концентраций взвешенных частиц.

Очевидно, что для обеспечения ультразвуковой коагуляции частиц размером менее 2,5 мкм необходимо создавать условия для обеспечения максимальной эффективности воздействия. В частности, для обеспечения максимального уровня УЗ-давления предлагаются различные системы агломерации, использующие воздействия на аэрозоли в режиме стоячей волны. Наиболее эффективной следует признать опытно-промышленную установку, созданную Хуаном Гальего-Хуарес и др., сочетающую в себе электростатический осадитель и камеру акустической коагуляции, удаляющую субмикронные частицы (средний размер частиц 0,8 мкм) из потока дымовых газов [15]. К сожалению, в этой установке при малой концентрации частицы практически не взаимодействуют между собой даже в пределах узловых областей. По этой причине установка не нашла широкого промышленного распространения.

Таким образом, для дальнейшего повышения эффективности УЗ-коагуляции частиц размером менее 2,5 мкм необходимо создать конструктивную схему ультразвуковых агломераторов, способных не только обеспечивать увеличение амплитуды колебаний воздействия на частицы, но и формировать в поле ультразвукового воздействия локальные области с высокой концентрацией дисперсных частиц.

Известно, что образование областей с повышенной концентрацией частиц может быть обеспечено за счет формирования закрученного потока, заставляющего частицы двигаться к внешнему радиусу под действием центробежных сил [16, 17]. За счет локального повышения концентрации частиц во внешней области вихря расстояние между частицами будет уменьшаться и начнет возрастать эффективность УЗ-коагуляции. Конструктивные схемы коагуляторов, обеспечивающих формирование закрученных потоков, широко известны. В связи с этим дальнейшее повышение эффективности коагуляции частиц наиболее эффективно реализовать в устройствах с закрученными потоками.

Разработка ультразвуковых излучателей для агломерационных камер с закрученными потоками

Однако для реализации условий энергоэффективного ультразвукового воздействия необходимо обеспечить создание излучателей для повышения эффективности коагуляции в устройствах с закрученными потоками. Конструирование излучателей ультразвуковых колебаний, которые определяют конечную эффективность агломерации частиц, необходимо осуществлять с учетом особенностей создаваемых камер, в которых будет осуществляться коагуляция (агломерация) частиц.

Ультразвуковое воздействие на дисперсные частицы наиболее эффективно осуществлять в закрученном потоке, поэтому наиболее правильным будет использование агломерационной камеры на основе горизонтального циклона. Особенность реализации такой камеры заключается в том, что для эффективной агломерации частиц внутри камеры необходимо создать равномерное ультразвуковое поле с максимально возможным уровнем звукового давления. Реализовать такое воздействие возможно только при помощи двух типов излучателей, способных формировать ультразвуковые колебания как с торцов агломерационной камеры, т. е. продольно вдоль оси камеры, так и с её боковой стенки, т. е. радиально. Конструктивная схема агломерационной камеры с указанными направлениями ультразвукового воздействия показана на рис. 1.

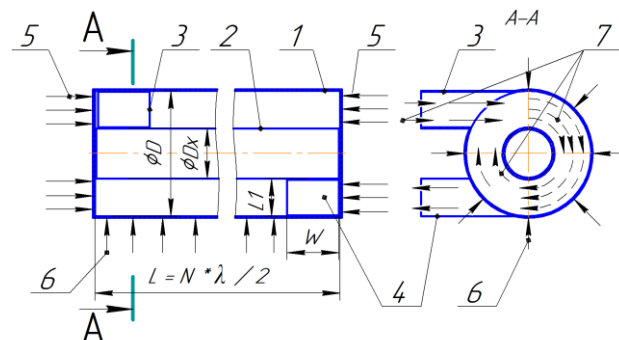


Рис. 1. Эскиз агломерационной камеры: 1 – корпус агломерационной камеры; 2 – вытеснитель; 3 – тангенциальный входной патрубок; 4 – тангенциальный выходной патрубок; 5 – продольное направление УЗ-воздействия; 6 – радиальное направление УЗ-воздействия; 7 – направление движения газовых потоков

Fig. 1. Sketch of agglomeration chamber: 1 – body of the agglomeration chamber; 2 – displacer; 3 – tangential inlet pipe; 4 – tangential outlet pipe; 5 – longitudinal direction of ultrasonic influence; 6 – radial direction of ultrasonic influence; 7 – direction of movement of gas flows

Для осуществления продольного ультразвукового воздействия к камере с торцов присоединяются ультразвуковые излучатели. Для формирования стоячей волны внутри камеры ультразвуковые излучатели расположены друг от друга на расстоянии L . Расстояние L должно быть кратно половине длины волны ультразвуковых колебаний на частоте воздействия в газовой среде. Кроме того, для обеспечения высокой равномерности УЗ-воздействия внутренний диаметр агломерационной камеры и диаметр ультразвукового излучателя должны совпадать.

Для практической реализации радиального ультразвукового воздействия сам корпус агломерационной камеры должен быть выполнен в виде ультразвукового излучателя, конструктивно представляющего собой трубчатый излучатель, колеблющийся на изгибно-диаметральной моде колебаний. В дополнение к этому для формирования стоячей диаметральной волны должно обеспечиваться следующее условие: расстояние L_1 (разница между внутренним радиусом $D/2$ трубчатого излучателя и наружным радиусом вытеснителя $D_x/2$) должно быть кратно половине длины волны в газовой среде. Поэтому в дальнейшем при помощи моделирования акустического поля был определен диаметр вытеснителя D_x , обеспечивающий диаметрально стоячую волну.

Агломерационная камера работает следующим образом. Газодисперсный поток, поступает во внутреннюю полость корпуса – 1 (коагуляционную камеру) через тангенциальный входной патрубок – 3. Внутри камеры, в результате движения по спиральной траектории, под действием центробежных сил происходит расслоение закрученного газодисперсного потока и смещение дисперсных частиц к периферийной области потока, в направлении внешнего корпуса – 1. Газодисперсный поток, содержащий агломераты дисперсных частиц, покидает камеру через выходной патрубок – 4. Вытеснитель – 2 исключает попадание частиц в приосевую область, в которой центробежные силы малы и недостаточны для отнесения частиц на периферию. При таких условиях частицы смещаются в узлы стоячей волны, в результате чего в узлах колебаний формируются зоны локального повышения концентрации. Это приводит к сближению частиц и образованию агломератов. В то же время увеличение размеров и повышение массы агломератов приводит к дальнейшему увеличению скорости смещения дисперсных частиц к периферийной области потока.

Далее рассмотрены конструкции ультразвуковых излучателей трех типов, способных формировать ультразвуковые колебания как с боковой стенки, т. е. радиально, так и с торцов агломерационной камеры, т. е. продольно вдоль оси камеры.

УЗ-излучатель для формирования радиального ультразвукового воздействия

Для воздействия на газодисперсный поток в радиальном направлении был разработан трубчатый излучатель, выполненный в виде полого цилиндра, колеблющегося на изгибно-диаметральной моде колебаний. Излучатель одновременно служит внешним корпусом агломерационной камеры. Определение акустических и геометрических параметров и расчет формы колебаний излучателя осуществлялся при помощи модального анализа в системе конечно-элементного моделирования (пакет Ansys). На рис. 2 представлена полученная по результатам расчетов конструкция трубчатого излучателя и форма его колебаний. На рис. 3, в показано фото изготовленного излучателя. Разработанный излучатель формирует изгибно-диаметральные колебания по всей длине, что позволяет создать регулярную равноамплитудную структуру колебаний большой протяженности. Поэтому протяженность такого излучателя ограничена только затуханием колебаний в материале излучателя, мощностью пьезоэлектрического преобразователя и механической прочностью узла присоединения излучателя к пьезоэлектрическому преобразователю.

Создание регулярной структуры колебаний позволяет использовать трубчатый излучатель как корпус агломерационной камеры либо как участок газохода с целью увеличения времени УЗ-воздействия на газодисперсный поток при минимальном гидравлическом сопротивлении.

УЗ-излучатели для формирования продольного ультразвукового воздействия

При продольном воздействии (с торцов агломерационной камеры) ультразвуковыми колебаниями на закрученный газодисперсный поток диаметр ультразвукового излучателя должен соответствовать внутреннему диаметру агломерационной камеры. Поскольку в качестве корпуса агломерационной камеры выступает трубчатый излучатель (описанный в предыдущем разделе), диаметр проектируемых излучателей должен соответствовать внутреннему диаметру трубчатого излучателя. Для создания ультразвуковых колебаний с торцов агломерационной камеры в качестве излучающего элемента наиболее эффективно использовать известные изгибно-колеблющийся диск или продольно-колеблющийся цилиндр. На рис. 3 представлены эскизы, формы колебаний и фотографии излучателей.

В зависимости от типа излучающий элемент может быть выполнен в виде:

- диска (возможно, со ступенчато переменной толщиной), изгибно-колеблющегося на частоте,

кратной основной частоте диска [18]. Поскольку излучатель работает на высших модах колебаний (для обеспечения частоты колебаний более 20 кГц), форма колебаний поверхности такого

излучателя представляет собой последовательность изгибно-колеблющихся кольцевых участков, разделенных нулями колебаний (в виде окружностей).

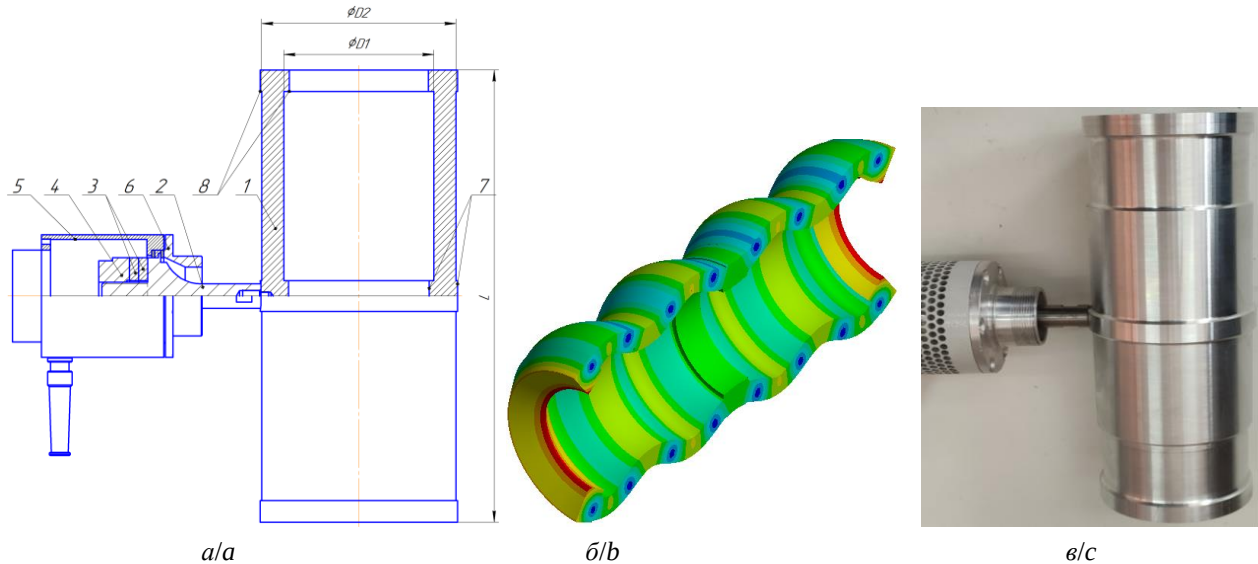


Рис. 2. Эскиз УЗ-излучателя с изгибно-колеблющейся трубой (а), форма колебаний (б) и фото (в): 1 – излучающий элемент в виде изгибно-колеблющегося полого цилиндра; 2 – концентратор пьезопреобразователя; 3 – пьезокерамические элементы; 4 – отражающая накладка; 5 – корпус; 6 – фланец; 7 – усиленная область для резьбового отверстия; 8 – область коррекции амплитуды торцов излучателя; L – длина излучателя; D1 – внутренний диаметр; D2 – внешний диаметр

Fig. 2. Sketch of an ultrasonic radiator with a bending-oscillating pipe (a), vibration shape (b) and photo (c): 1 – radiating element in the form of a bending-oscillating hollow cylinder; 2 – piezoelectric transducer concentrator; 3 – piezoceramic elements; 4 – reflective pad; 5 – body; 6 – flange; 7 – reinforced area for threaded hole; 8 – area for correction of the amplitude of the radiator ends; L – radiator length; D1 – inner diameter; D2 – outer diameter

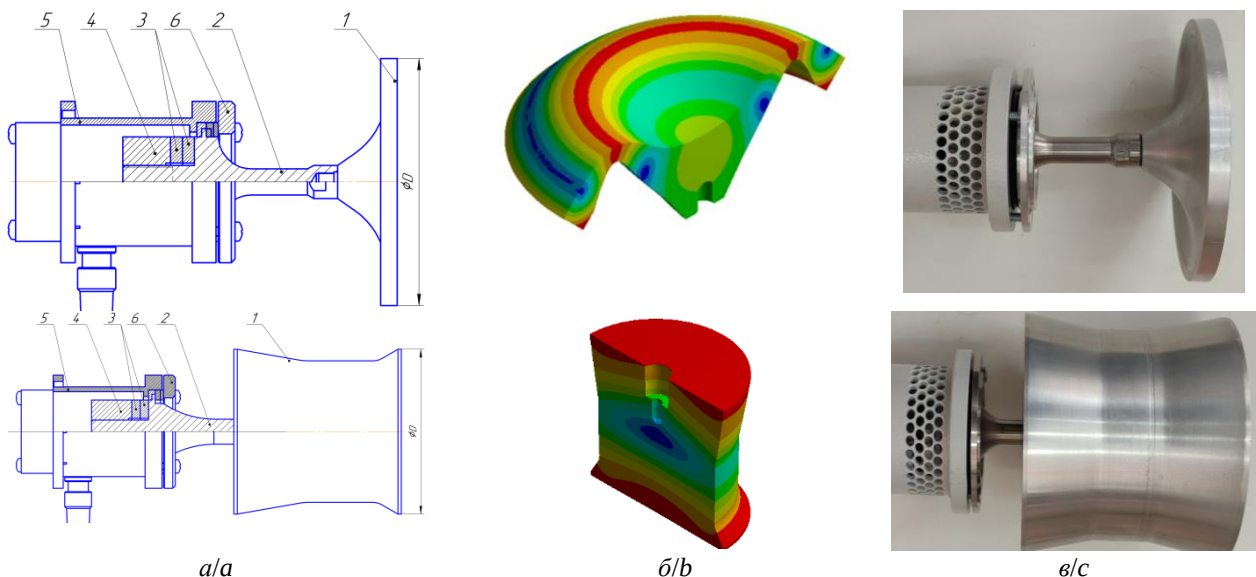


Рис. 3. Эскиз УЗ-излучателя с изгибно-колеблющимся диском (а), форма колебаний (б) и фото (в) УЗ-излучателя (в): 1 – излучающий элемент (диск или цилиндр); 2 – концентратор пьезопреобразователя (излучающая накладка); 3 – пьезокерамические элементы; 4 – отражающая накладка; 5 – корпус; 6 – фланец

Fig. 3. Sketch of an ultrasonic radiator with a bending-oscillating disk (a), vibration shape (b) and photo of an ultrasonic radiator (c): 1 – radiating element (disk or cylinder); 2 – piezoelectric transducer concentrator (radiating pad); 3 – piezoceramic elements; 4 – reflective pad; 5 – body; 6 – flange

Особенностью такого излучателя является то, что соседние кольцевые области диска (не имеющие изменений толщины вдоль радиуса) формируют равноамплитудные колебания в противофазе. Это обуславливает формирование поля со сложной структурой, в котором области, колеблющиеся в противофазе, расположены не только вдоль оси излучения и в направлении перпендикулярном ей. За счет этого может происходить снижение уровня звукового давления (взаимная компенсация). Одновременно с этим такая структура акустического поля способствует интенсивному развитию акустических течений, что положительно влияет на эффективность агломерации дисперсных частиц.

- цилиндра длиной, кратной половине длины волны УЗ-колебаний, совершающего продольные колебания [19]. При расчетах в качестве критерия неравномерности амплитуды колебаний было использовано относительное средне-квадратичное (стандартное) отклонение амплитуды колебаний точек торцевой поверхности, которое для данного излучателя составило не более 2 %. Диаметр обоих разработанных излучателей равен 120 мм. Резонансная частота дискового излучателя равна 22,5 кГц, а цилиндрического – 22,4 кГц.

Определение технических параметров УЗ-излучателей

Основными техническими параметрами созданных излучателей являются: амплитуда и частота колебаний, создаваемый уровень звукового давления (излучаемая акустическая энергия) и потребляемая электрическая мощность.

Измерения значений амплитуд колебаний, обеспечиваемых созданными излучателями, производи-

лось при помощи электронного измерителя перемещений Shahe 5310-10 с точностью ± 2 мкм. Измерения проводились вдоль диаметральной линии излучающей поверхности дискового и цилиндрического излучателей и по образующей линии цилиндрического излучателя. Измеренные распределения относительных амплитуд колебаний вдоль излучающих поверхностей всех используемых излучателей представлены на рис. 4. На этом же рисунке, для сравнения, представлены расчетные распределения колебаний, полученные при проектировании излучателей в системе Ansys.

Из представленных зависимостей следует, что дисковый излучатель имеет две кольцевые зоны «нулей» колебаний, соответственно, он колеблется на второй кольцевой моде колебаний, при этом амплитуда колебаний в центре излучателя равна 35 мкм. Дисковый излучатель спроектирован таким образом, чтобы амплитуда колебаний в центре была меньше, чем в других кольцевых областях. Максимальная амплитуда колебаний кольцевых областей превышает 55 мкм и такое распределение обеспечивает снижение максимальных механических напряжений.

Анализ распределения амплитуд колебаний продольно-колеблющегося излучателя показал, что разница между минимальной и максимальной амплитудой колебаний фронтальной поверхности излучателя не превышает 5 %, при этом вся излучающая поверхность колеблется синфазно.

Анализ распределения амплитуд колебаний трубчатого излучателя показал, что в продольном сечении формируются изгибные колебания с восьмью «нулями» колебаний, при этом часть областей колеблется синфазно, а часть – в противофазе.

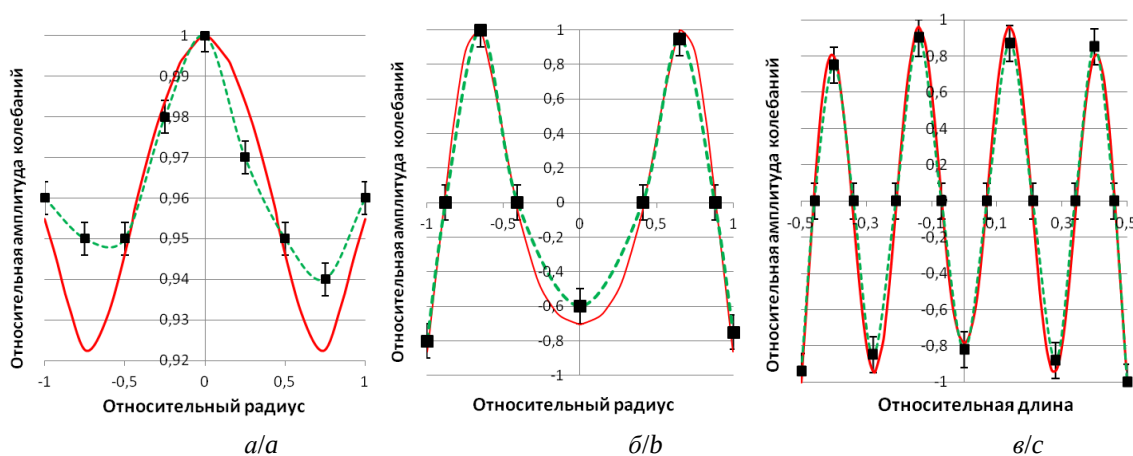


Рис. 4. Распределения относительных амплитуд колебаний излучателей: а) изгибно-колеблющегося диска; б) продольно-колеблющегося цилиндра; в) диаметрально изгибно-колеблющейся трубы; непрерывная линия – расчетные зависимости; пунктирная линия – экспериментальные зависимости.

Fig. 4. Distributions of relative vibration amplitudes of the radiators: а) flexural-oscillating disk; б) longitudinally oscillating cylinder; в) diametrically bending-oscillating pipe; continuous line – calculated dependencies; dotted line – experimental dependences

При анализе формы колебаний трубчатого излучателя в поперечном сечении было установлено, что в каждой кольцевой области, находящейся между «нулями» колебаний, формируются диаметрально-направленные колебания – диаметрально-направленные колебания – диаметрально-направленные колебания – диаметрально-направленные колебания. Таким образом, в совокупности такой излучатель работает на изгибно-диаметральной моде колебаний. Анализ полученных данных показал, что расчетные и экспериментальные значения амплитуд колебаний различаются не более чем на 10 %. Это позволяет на практике использовать полученные (с помощью модального анализа в системе Ansys) распределения амплитуд колебаний.

В свою очередь, излучаемая акустическая мощность определялась как разница между полной потребляемой электрической мощностью излучателя и мощностью собственных потерь в излучателе. Мощность потерь определялась в вакуумной камере (остаточное давление 1000 Па). Проведенные исследования позволили определить основные технические характеристики разработанных излучателей (таблица).

Таблица. Технические характеристики ультразвуковых излучателей для газовых сред

Table. Technical characteristics of ultrasonic radiators for gaseous media

Параметр/Parameter	Значение/Value		
Тип излучающего элемента Type of radiating element	Диск Disc	Цилиндр Cylinder	Трубчатый Tubular
Размеры излучающей поверхности, мм Dimensions of the radiating surface, mm	D=120	D=120	D2=136 D1=120 L=295
Частота колебаний, кГц Oscillation frequency, kHz	22,5	22,4	22,2
Электрическая мощность, Вт Electrical power, W	101	130	150
Амплитуда (размах) колебаний поверхности макс-мин, мкм Amplitude (peak to peak) of surface vibrations max-min, μm	55–35	55–53	55–45
Акустическая мощность, Вт Acoustic power, W	67	86	105

Далее на основании измеренных технических характеристик и полученных форм колебаний ультразвуковых излучателей было проведено моделирование формируемого созданными излучателями ультразвукового поля.

Определение параметров формируемого поля УЗ-колебаний в объеме коагуляционной камеры

Известно, что распределение уровня звукового давления в объеме агломерационной камеры явля-

ется одним из основных факторов, определяющих эффективность УЗ0 коагуляции. Точное измерение распределения уровня звукового давления внутри агломерационной камеры затруднено, поскольку размеры измерительного микрофона сопоставимы с длиной волны УЗ-колебаний и вносят искажения в картину регистрируемого поля. Поэтому был проведен расчет распределения уровня звукового давления посредством конечно-элементного анализа в системе ANSYS. При этом использовался модуль гармонического акустического анализа Harmonic Acoustics.

При моделировании были установлены граничные условия на основе полученных экспериментальных данных о параметрах разработанных и изготовленных ультразвуковых излучателей (частота колебаний и распределение амплитуд колебаний излучающей поверхности). Поверхности внутренних стенок камеры заданы как отражающие границы с определенным уровнем поглощения. Путем сравнения результатов моделирования со значениями уровня звукового давления, измеренными экспериментально, определен уровень поглощения УЗ-колебаний стенками коагуляционной камеры, который составил 11 %. Это значение принято в дальнейших расчетах. Линейный размер элемента тетраэдральной сетки составил 3 мм.

На первом этапе был определен оптимальный диаметр вытеснителя, обеспечивающий установление кольцевой стоячей волны в коагуляционной камере для случая, когда в качестве излучателя будет использоваться только трубчатый излучатель. Начальное значение диаметра было выбрано равным 1/3 от внутреннего диаметра коагуляционной камеры [20]. Оптимальный диаметр вытеснителя определялся на основе результатов ряда акустических расчетов, при этом от расчета к расчету проводилась итерационная корректировка диаметра. Критерием оптимальности считалось обеспечение максимального уровня звукового давления при частоте воздействия, соответствующей собственной частоте разработанного и изготовленного излучателя 22,2 кГц.

На следующем этапе учитывалось как самостоятельное, так и дополнительное продольное УЗ-воздействие. При этом определялось расстояние между излучателями, обеспечивающими установление продольной стоячей волны. Излучатели каждого типа располагались в количестве двух штук с обоих торцов агломерационной камеры.

На рис. 5 приведены распределения уровня звукового давления, формируемого в коагуляционной камере, при использовании только дискового излучателя (а), только продольно-колеблющегося излучателя (б) и только трубчатого излучателя (в).

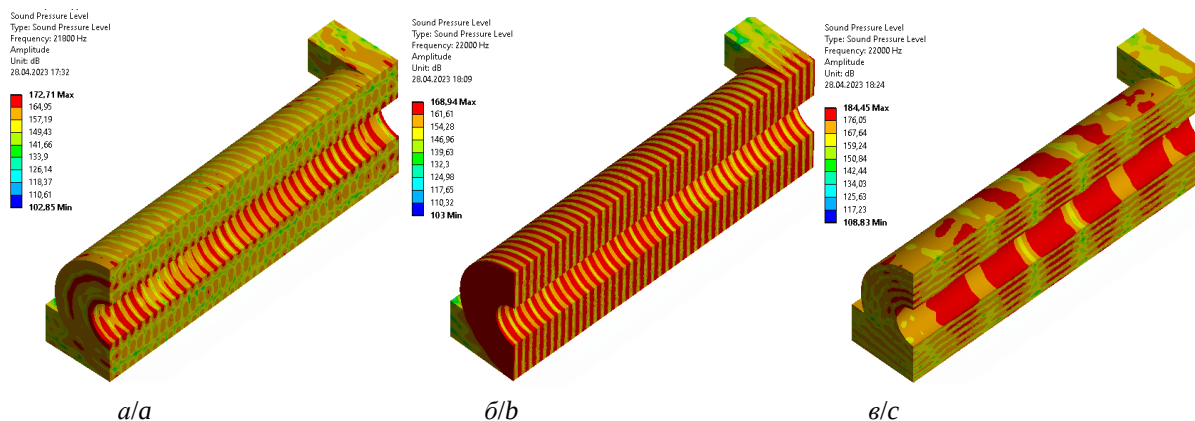


Рис. 5. Распределение уровня звукового давления в коагуляционной камере при использовании различных типов излучателей: дискового излучателя (а), продольно-колеблющегося излучателя (б) и трубчатого излучателя (в)

Fig. 5. Distribution of the sound pressure level in the coagulation chamber when using different types of radiators: disk radiator (a), longitudinally oscillating radiator (b) and tubular radiator (c)

Дальнейшие расчеты были направлены на анализ эффективности воздействия УЗ-колебаний на газовую среду при совместном использовании двух типов излучателей – трубчатого и по два излучателя одинакового типа с обоих торцов агломерационной камеры. При одновременном УЗ-воздействии тремя излучателями (трубчатый и два торцевых) расчет распределения поля УЗ-колебаний в камере производился с учетом принципа суперпозиции.

Далее проведены расчеты формируемого УЗ-поля при совместном воздействии различных типов излучателей (рис. 6).

В таблице представлены результаты расчетов параметров ультразвукового воздействия во всех исследованных вариантах.

Анализ полученных параметров УЗ-воздействия и распределений уровня звукового давления показал следующее:

- При использовании изгибно-колеблющегося излучателя (рис. 6, а) средний уровень звукового давления составил 158 дБ, при этом формируется регулярная структура изменения поля вдоль камеры, в которой пиковые значения достигают 174 дБ.
- Продольно-колеблющийся излучатель (рис. 6, б) обеспечивает высокую равномерность ультразвукового поля, в котором средний уровень звукового давления составил 165 дБ, и регулярную структуру изменений ультразвукового поля, в которых пиковые значения достигают 174 дБ. При этом формируется регулярная структура с образованием 44 узловых плоскостей. Пониженный средний уровень звукового давления в камере обусловлен взаимной компенсацией противофазных колебаний соседних областей.

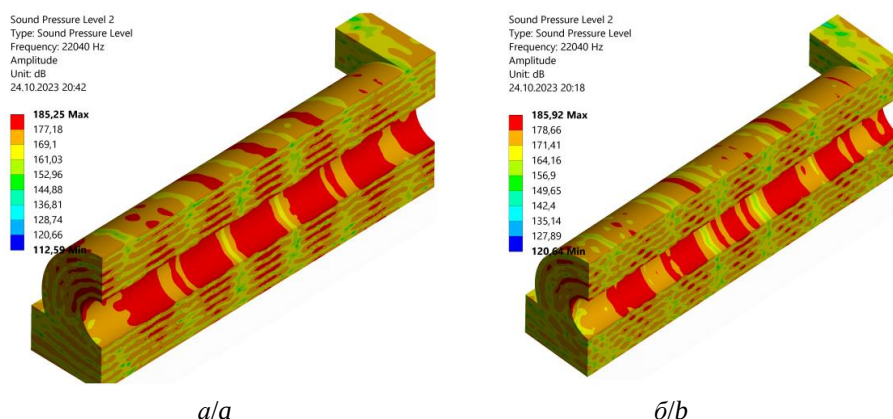


Рис. 6. Распределение уровня звукового давления в коагуляционной камере при совместном использовании различных типов излучателей: изгибно-колеблющегося и трубчатого излучателя (а), продольно-колеблющегося и трубчатого излучателя (б)

Fig. 5. Distribution of the sound pressure level in the coagulation chamber when using different types of radiators together: flexural-oscillating and tubular radiator (a), longitudinally oscillating and tubular radiator (b)

- При использовании трубчатого излучателя (рис. 6, *в*) формируется регулярная структура изменений ультразвукового поля, при этом средний уровень звукового давления составил 169 дБ, пиковые значения достигали 184 дБ. За счет изгибно-диаметральных колебаний трубчатого излучателя формируется кольцевая стоячая волна с множеством узлов колебаний (36 узловых областей) – 6 узловых кольцевых поверхностей в поперечном направлении и 6 узловых плоскостей в продольном направлении.
- При одновременном воздействии трубчатым и изгибно-колеблющимся излучателями (рис. 7, *а*) на газовую среду уровень звукового давления составил 170 дБ, пиковые значения достигали 185 дБ. Структура формируемого УЗ-поля похожа на структуру поля при воздействии только трубчатым излучателем. Продольного резонанса практически не наблюдается.
- При одновременном воздействии трубчатым и продольно-колеблющимся излучателями (рис. 7, *б*) уровень звукового давления составил 171 дБ, пиковые значения выше 185 дБ. Ярко выражен продольный резонанс. При этом структура формируемого УЗ-поля существенно изменилась. Одновременно с формируемой за счет изгибно-диаметральных колебаний трубчатого излучателя регулярной структурой при дополнительном воздействии продольно-колеблющимися излучателями формируется кольцевая стоячая волна, разделенная в поперечном направлении продольной стоячей волной с множеством узлов колебаний (264 узловых областей) – 6 узловых кольцевых поверхностей в поперечном направлении и 44 узловых поверхностей в продольном направлении.

Экспериментальная установка и измерительное оборудование

Экспериментальная установка состояла из агломерационной камеры, внешним корпусом которой служит трубчатый излучатель. Это же излучатель использовался для создания ультразвукового воздействия в радиальном направлении. Для обеспечения воздействия ультразвуковыми колебаниями в продольном направлении (вдоль агломерационной камеры) использовалось два типа излучателей: или в виде изгибно-колеблющегося диска, или в виде продольно-колеблющегося цилиндра. Излучатели каждого типа располагались в количестве двух штук с обоих торцов агломерационной камеры. Для синхронизации частоты и фазы колебаний излучателей их питание осуществлялось от электронных генераторов с независимым возбуждением, имеющих общий задающий генератор и отдельные выходные усилительные каскады.

Внутри камеры был расположен вытеснитель, диаметр которого был предварительно рассчитан на предыдущем этапе. Для верификации проведенных расчетов размеров вытеснителя было изготовлено восемь образцов вытеснителей с разными внешними диаметрами от 37 до 58 мм, которые обеспечивают ширину кольцевого зазора (размер L_1) в диапазоне от 31 до 41,5 мм. Для каждого изготовленного вытеснителя определялся уровень звукового давления в камере и степень укрупнения частиц. Степень укрупнения рассчитывалась как отношение среднего объемно-поверхностного диаметра частиц на выходе и среднего объемно-поверхностного диаметра на входе в камеру агломерации.

Входной патрубок обеспечивал тангенциальный ввод и формирование закрученного потока внутри агломерационной камеры. Скорость воздушного потока измерялась анемометром Kimo LV-110. Дисперсные частицы вводились в воздушный поток при помощи эжекционного диспергатора. В качестве дисперсного материала использовался диоксид кремния с начальными размерами частиц от 0,5–2 мкм марки Аэросил А 175. Измерение размеров частиц осуществлялось при помощи лазерного измерителя Malvern Spraytec. Уровень звукового давления измерялся шумомером-виброметром Экофизика-110А с микрофоном ВМК-401.

Обсуждение полученных результатов

На первом этапе были установлены оптимальные резонансные расстояния между излучателями (для продольного ультразвукового воздействия) и между трубчатым излучателем и вытеснителем/отражателем (для радиального ультразвукового воздействия) в реальных условиях. Критерием оптимальности являлось достижение максимального уровня звукового давления при формировании внутри камеры стоячей волны с максимальной амплитудой колебаний. Эффективность процесса коагуляции оценивалась по степени укрупнения частиц. Исследования проводились при следующих условиях: скорость газодисперсного потока – 5 м/с; концентрация – 1 г/м³; размер подаваемых частиц – 1 мкм. Полученные зависимости степени укрупнения частиц и уровень звукового давления от диаметра вытеснителя (от расстояния L_1) для коагуляционной камеры, использующей только трубчатый излучатель, представлены на рис. 7.

Анализ полученных данных позволил установить, что максимальный уровень звукового давления и максимальная эффективность коагуляции обеспечивается при расстояниях (L_1) равных 32,5 и 40 мм, т. е. при условии установления стоячей волны. При расстоянии 35–37 мм уровень звукового давления и одновременно с этим эффективность

коагуляции падает до минимального значения. Вариация диаметра вытеснителя и, соответственно, площади поперечного сечения камеры практически не влияло на режим течения газа, однако привела к незначительному изменению эффективности коагуляции. При этом основным влияющим фактором является время УЗ-воздействия на газодисперсный поток.

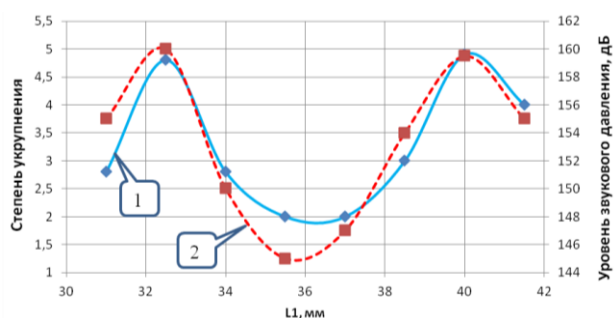


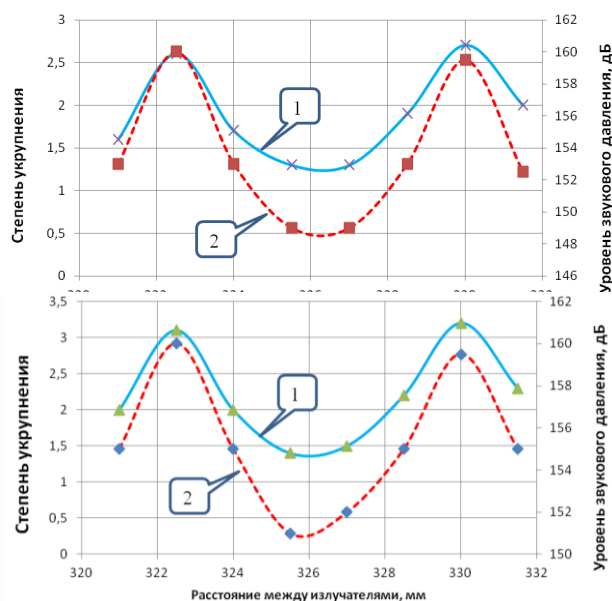
Рис. 7. Зависимости степени укрупнения дисперсных частиц (кривая 1) и уровня звукового давления (кривая 2) от расстояния (L_1) при использовании только трубчатого излучателя

Fig. 7. Dependences of dispersed particles coarsening degree (curve 1) and sound pressure level (curve 2) on distance (L_1) when using tubular radiator

Аналогичные исследования были проведены для определения оптимального расстояния между излучателями для конфигурации коагуляционной камеры с источником ультразвуковых колебаний в виде изгибно-колеблющегося дискового и продольно-колеблющегося излучателей. Условия проведения эксперимента были аналогичными предыдущим, при этом расстояние между излучателями изменялось в пределах от 321 до 331,5 мм. В результате исследований получены следующие зависимости (рис. 8).

Анализ данных показал, что эффективность коагуляции зависит от структуры формируемого УЗ-поля и уровня звукового давления. Установлено, что максимальная эффективность коагуляции обеспечивается при расстояниях 322,5 и 330 мм.

На следующем этапе исследовалось влияние скорости газодисперсного потока на эффективность коагуляции при выявленных на предыдущем этапе геометрических параметрах коагуляционной камеры (диаметре вытеснителя) и расстоянии между излучателями. Экспериментальные исследования проводились при следующих условиях: скорость газодисперсного потока – от 0,8 до 7,4 м/с; концентрация – 1 г/м³; уровень звукового давления – 160 дБ; размер подаваемых частиц – 1 мкм; диаметр вытеснителя – 40 мм; расстояние между излучателем и отражателем – 322,5 мм.



б/б

Рис. 8. Зависимости степени укрупнения дисперсных частиц (кривая 1) и уровня звукового давления (кривая 2) от расстояния (L) между продольно-колеблющимися (а) и дисковыми (б) излучателями

Fig. 8. Dependences of dispersed particles coarsening degree (curve 1) and the sound pressure level (curve 2) on the distance (L) between longitudinally oscillating (a) and disk (b) radiators

В результате экспериментальных исследований получены зависимости степени укрупнения дисперсных частиц от скорости газового потока при использовании излучателей различных типов (рис. 9). Для сравнения приведены данные о степени коагуляции без УЗ-воздействия. Анализ полученных данных показал, что скорость газового потока существенно влияет на эффективность коагуляции. При этом степень влияния скорости на эффективность коагуляции зависит от нескольких факторов.

Из полученных зависимостей следует, что при увеличении скорости газового потока эффективность ультразвуковой коагуляции снижается за счет уменьшения времени УЗ-воздействия. При этом, напротив, при отсутствии УЗ-воздействия на газодисперсный поток увеличение скорости приводит к незначительному возрастанию эффективности коагуляции вследствие турбулизации потока.

При использовании поршневого излучателя увеличение скорости потока приводит к монотонному снижению эффективности коагуляции частиц.

При использовании дискового излучателя эффективность коагуляции начинает резко снижаться при скорости потока от 2,5 до 4 м/с.

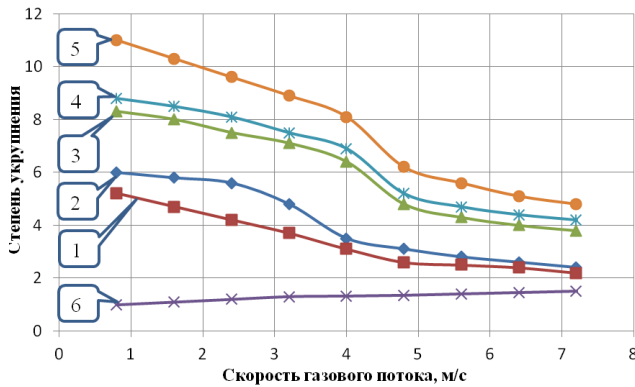


Рис. 9. Зависимости степени укрупнения дисперсных частиц от скорости газового потока: 1 – продольно-колеблющийся излучатель; 2 – дисковый излучатель; 3 – трубчатый излучатель; 4 – трубчатый+дисковый излучатель; 5 – трубчатый+продольно-колеблющийся излучатель; 6 – без УЗ-воздействия

Fig. 9. Dependences of dispersed particles coarsening degree on the gas flow velocity: 1 – longitudinally oscillating radiator; 2 – disk radiator; 3 – tubular radiator; 4 – tubular+disk radiator; 5 – tubular+longitudinally oscillating radiator; 6 – without ultrasonic impact

Это связано с разрушением структуры акустических потоков, позволяющих перемещать частицы как в пределах узлов стоячей волны, так и между ними. За счет акустических потоков эффективность коагуляции частиц выше при использовании дискового излучателя в сравнении с эффективностью коагуляции, обеспечиваемой поршневым излучателем.

При использовании трубчатого излучателя также формируется стоячая волна с акустическими потоками, которые существенно повышают эффективность коагуляции. При этом за счет большей площади акустического воздействия интенсивность формируемых потоков выше. Поэтому увеличение скорости газодисперсного потока в диапазоне от 3,2 до 5 м/с приводит к резкому снижению эффективности коагуляции.

Дальнейшие исследования были направлены на определение влияния уровня звукового давления на эффективность коагуляции частиц. При этом исследования проводились при максимальной критической скорости газодисперсного потока, при которой эффективность коагуляции остается еще высокой. На предыдущем этапе было выявлено, что максимальная критическая скорость составляет не более 3,2 м/с.

Экспериментальные исследования проводились при следующих условиях: уровень звукового давления – 140–167 дБ; скорость газодисперсного потока – от 3,2 м/с; концентрация – 1 г/м³; размер подаваемых на коагуляцию частиц – 1 мкм; диаметр

вытеснителя – 40 мм; расстояние между излучателем и отражателем – 322,5 мм.

В результате экспериментальных исследований получены зависимости степени укрупнения дисперсных частиц от уровня звукового давления, формируемого различными излучателями (рис. 10).

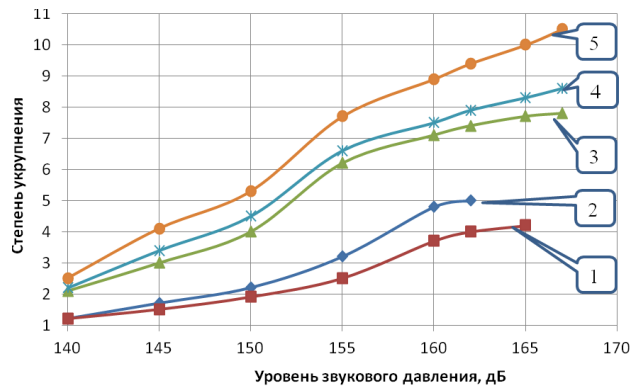


Рис. 10. Зависимости степени укрупнения дисперсных частиц от уровня звукового давления: 1 – продольно-колеблющийся излучатель; 2 – дисковый излучатель; 3 – трубчатый излучатель; 4 – трубчатый+дисковый излучатель; 5 – трубчатый+продольно-колеблющийся излучатель

Fig. 10. Dependences of dispersed particles coarsening degree on the sound pressure level: 1 – longitudinally oscillating radiator; 2 – disk radiator; 3 – tubular radiator; 4 – tubular+disk radiator; 5 – tubular+longitudinally oscillating radiator

Анализ полученных зависимостей позволяет сделать вывод о том, что при одинаковом уровне звукового давления использование продольно-колеблющегося излучателя обеспечивает меньшую степень укрупнения, чем при использовании дискового излучателя. Такая зависимость связана с формированием акустических потоков, которые турбулизируют поток, что приводит к перемещению частиц от одной узловой области к другой, а также обеспечивает перемещение частиц в пределах узловых областей. При использовании продольно-колеблющегося излучателя частицы удерживаются в узловых областях, а их перемещение происходит только за счет течения газового потока. При скоростях газодисперсного потока близких к нулю частицы не перемещаются в узловых областях и между ними, что определяет низкую эффективность коагуляции.

Также установлено, что при равном уровне звукового давления степень укрупнения выше при озвучивании газодисперсного потока с помощью трубчатого излучателя. Достигается это за счет того, что трубчатый излучатель работает на изгибно-диаметральной моде. Это позволяет формировать регулярную структуру ультразвукового поля: фор-

мируется диаметральной стоячая волна в маленьком кольцевом зазоре (не более трех длин волн), при этом соседние кольцевые зоны стоячей волны колеблются в противофазе. На границе этих зон формируются акустические течения как вдоль, так и поперек трубчатого излучателя. За счет возникновения большого количества таких зон происходит интенсификация процесса коагуляции частиц. Как видно из графиков, при уровне звукового давления 160 дБ достигается степень укрупнения, равная 7, а дисковые излучатели при этих же условиях обеспечивают степень укрупнения, равную 5.

Проведенные исследования позволили установить также, что существенный рост эффективности коагуляции начинается при уровне звукового давления более 150–155 дБ. Следует отметить, что при повышении уровня звукового давления более 160 дБ рост эффективности коагуляции заметно снижается.

На следующем этапе получена зависимость эффективности коагуляции частиц от концентрации дисперсных частиц (рис. 11). Экспериментальные исследования проводились при следующих условиях: уровень звукового давления – 160 дБ; скорость газодисперсного потока – от 3,2 м/с; концентрация – 0,05–1,8 г/м³; размер частиц – 1 мкм; диаметр вытеснителя – 40 мм; расстояние между излучателем и отражателем – 322,5 мм.

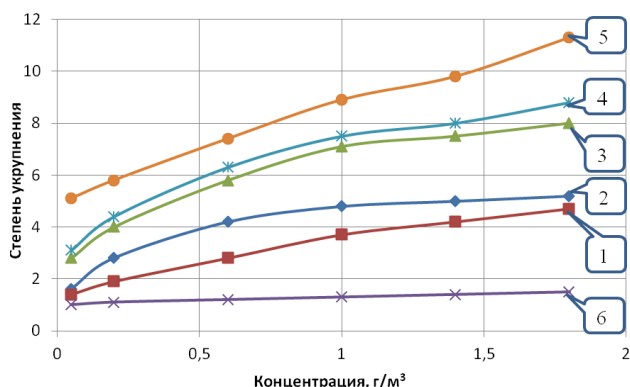


Рис. 11. Зависимости степени укрупнения дисперсных частиц от концентрации: 1 – продольно-колеблющийся излучатель; 2 – дисковый излучатель; 3 – трубчатый излучатель; 4 – трубчатый+дисковый излучатель; 5 – трубчатый+продольно-колеблющийся излучатель; 6 – без УЗ-воздействия

Fig. 11. Dependences of dispersed particles coarsening degree on concentration: 1 – longitudinally oscillating radiator; 2 – disk radiator; 3 – tubular radiator; 4 – tubular+disk radiator; 5 – tubular+longitudinally oscillating radiator; 6 – without ultrasonic influence

Результаты экспериментальных исследований позволили установить, что при малой концентра-

ции, равной 0,05 г/м³, при использовании как дискового, так и продольно-колеблющегося излучателя, обеспечивается достаточно низкая эффективность коагуляции, степень укрупнения составляет 1,3–1,5. Однако за счет применения трубчатого излучателя при той же концентрации степень укрупнения возрастает до 2,8.

Таким образом, было установлено, что турбулизация потока за счет акустических течений, возникающих на границах кольцевых областей стоячих волн, колеблющихся в противофазе, приводит к увеличению эффективности коагуляции. При этом трубчатый излучатель обеспечивает большую протяженность ультразвукового воздействия в таких условиях (кольцевой зазор не превышает 3–5 длин волн).

Вследствие того, что изгибно-колеблющийся излучатель несущественным образом изменяет структуру ультразвукового поля, формируемого трубчатым излучателем, и при этом немного увеличивает средний уровень звукового давления, эффективность коагуляции незначительно повышается.

Однако при одновременном воздействии продольно-колеблющимся и трубчатым излучателями на газовую среду за счет существенного изменения структуры УЗ-поля и появления множества дополнительных узловых поверхностей возникает также и множество акустических потоков, интенсифицирующих процесс взаимодействия между частицами. Благодаря этому эффективность коагуляции существенно возрастает. Степень укрупнения возрастает до 9 (при концентрации 1 г/м³) по сравнению с эффективностью коагуляции, равной 7, обеспечиваемой только трубчатым излучателем.

Заключение

Для повышения эффективности коагуляции в устройствах с закрученными потоками были проведены теоретические и экспериментальные исследования, позволившие разработать и предложить источники ультразвукового воздействия трех типов.

1. Использование в качестве источника ультразвукового воздействия только изгибно-колеблющихся излучателей, устанавливаемых на торцах коагуляционной камеры, обеспечивает формирование структурированного поля с множеством узловых поверхностей и смежно-расположенных колеблющихся в противофазе областей. Вследствие того, что часть энергии ультразвуковых колебаний в смежных областях, колеблющихся в противофазе, теряется из-за взаимной компенсации, средний уровень звукового давления, обеспечиваемый таким излучателем, не высок и составляет 162 дБ. При этом

использование только такого излучателя обеспечивает достаточно высокую степень укрупнения дисперсных частиц. Обусловлено это формированием акустических потоков, позволяющих перемещать частицы между узловыми областями, интенсифицируя процесс объединения частиц.

2. Использование только продольно-колеблющихся излучателей и воздействие ими на газодисперсный поток формирует плоскую стоячую волну с 44 узловыми поверхностями параллельными излучателям, при этом уровень звукового давления достигается выше 165 дБ. Формирование такой структуры УЗ-поля обеспечивает удержание частиц в узловых областях. Однако перемещение между ними осуществляется только в одном направлении за счет воздействия на частицы потока газа. Взаимодействие между частицами обеспечивается только в пределах узловых областей, соответственно, эффективность коагуляции невысока.
3. В качестве основного источника ультразвукового воздействия для созданной конструкции коагуляционной камеры наиболее эффективно использование протяженного ультразвукового трубчатого излучателя, работающего на изгибно-диаметральной моде колебаний и формирующего кольцевую стоячую волну с уровнем звукового давления 162–165 дБ. При этом такой излучатель является одновременно внешним корпусом камеры. За счет наличия соседних кольцевых цилиндрических поверхностей, колеблющихся в противофазе, обеспечено формирование зон, в которых инициируются акустические течения, позволяющие перемещаться частицам между узловыми областями и обеспечивающие дополнительное взаимодействие между частицами. Сочетание достигнутых высоких уровней звукового давления и формирование акустических течений обеспечило повышенную эффективность коагуляции, в сравнении с эффективностью коагуляции, обеспечиваемой торцевыми излучателями.
4. Совместное с основным трубчатым излучателем дополнительное воздействие продольно-колеблющимися излучателями на газодисперсный поток повысило эффективность коагуляции. Установлено, что дополнительное воздействие продольно-колеблющимся излучателем существенно модифицирует структуру ультразвукового поля, формируемого трубчатым излучателем. Это обеспечивает увеличение количества формируемых узловых поверхностей и среднего уровня звукового давления, что позволяет существенно повысить эффективность коагуляции частиц.
5. Полученные результаты УЗ-коагуляции при помощи предложенных и разработанных ультразвуковых излучателей различного типа позволяют рекомендовать их для практического использования в создаваемых современных системах очистки от особо опасных частицы размерами 2,5 мкм и менее.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Progress of air pollution control in China and its challenges and opportunities in the ecological civilization era / X. Lu, S. Zhang, J. Xing, Y. Wang, W. Chen, D. Ding, J. Hao // *Engineering*. – 2020. – Vol. 6. – № 12. – P. 1423–1431.
2. Miller L., Xu X. Ambient PM_{2.5} human health effects – findings in China and research directions // *Atmosphere*. – 2018. – Vol. 9. – № 424. – P. 1–16.
3. Mortality risk and PM_{2.5} air pollution in the USA: an analysis of a national prospective cohort / C.A. Pope, M. Ezzati, J.B. Cannon, R.T. Allen, M. Jerrett, R.T. Burnett // *Air Quality, Atmosphere & Health*. – 2017. – Vol. 11. – № 3. – P. 245–252.
4. Particulate air pollution acute cardio respiratory hospital admissions and mortality among the elderly / J. Halonen, T. Lanki, T. Yli-Tuomi, P. Tiittanen, V. Kulmala, J. Pekkanen // *American Journal of Epidemiology*. – 2009. – Vol. 20. – № 1. – P. 143–153.
5. Inlet particle-sorting cyclone for the enhancement of PM_{2.5} separation / P.B. Fu, F. Wang, X.J. Yang, L. Ma, X. Cui, H.L. Wang // *Am J Environ Sci*. – 2017. – Vol. 51. – № 3. – P. 1587–1594.
6. Hoekstra A.J. Gas flow field and collection efficiency of cyclone separators. Ph.D. Thesis. – Delft, 2000. – 165 p.
7. Leith D., Licht W. The Collection efficiency of cyclone type particle collectors-a new theoretical approach // *AIChE Symp*. – 1972. – Vol. 68. – P. 196–206.
8. Qian F., Wu Y. Effects of the inlet section angle on the separation performance of a cyclone // *Chem. Eng. Res. Des*. – 2009. – Vol. 87. – № 12. – P. 1567–1572.
9. Study on aerosol agglomeration using the airborne ultrasonic transducer / Y. Guo, G. Zhang, Y. Li, H. Gu, D. Yuan, M. Liu // *Particuology*. – 2023. – Vol. 82. – P. 157–165.
10. Hoda Y., Asami T., Miura H. Aerosol agglomeration by aerial ultrasonic sources containing a cylindrical vibrating plate with the same diameter as a circular tube // *Jpn. J. Appl. Phys*. – 2022. – Vol. 61. – P. SG1073.
11. Ono Y., Asami T., Miura H. Agglomeration of aerosol using small equipment with two small aerial ultrasonic sources // *Jpn. J. Appl. Phys*. – 2023. – Vol. 62. – P. SJ1029.
12. A novel U-shaped acoustic-manipulated design to enhance the performance of low-efficiency filters for sub-micron particles / Y.T. Zhang, S.K. Lai, J.C.W. Yu, H. Guo, C.W. Lim // *Powder Technol*. – 2021. – Vol. 392. – P. 412–423.
13. König. W. Hydrodynamisch-akustische Untersuchungen. Über die Kräfte zwischen zwei Kugeln in einer schwingenden Flüssigkeit und über die Entstehung der Kundtschen Staubfiguren // *Ann. Phys. und Chem*. – 1891. – Vol. 42. – № 4. – P. 549.
14. Brandt O., Freund H., Hiedemann E. Zur Theorie der akustischen Koagulation // *Kolloid-Zeitschrift*. – 1936. – Vol. 77. – P. 103–115.

15. Application of acoustic agglomeration to reduce fine particle emissions from coal combustion plants / J.A. Gallego-Juarez, E. Riera-Franco De Sarabia, G. Rodriguez-Corral, T.L. Hoffmann, J.C. Gálvez-Moraleda, J.J. Rodríguez-Maroto, M. Acha // *Environmental Science & Technology*. – 1999. – Vol. 33. – № 21. – P. 3843–3849.
16. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Nesterov V.A. Improving the performance of air purification efficiency from fine-dispersed particles by ultrasonic exposure in swirling flow // *Int. J. Environ. Sci. Technol.* – 2020. – Vol. 17. – P. 3927–3934.
17. Inlet particle-sorting cyclone for the enhancement of PM 2.5 separation / P.B. Fu, F. Wang, X.J. Yang, L. Ma, X. Cui, H.L. Wang // *Am J Environ Sci.* – 2017. – Vol. 51. – № 3. – P. 1587–1594.
18. Khmelev V.N., Nesterov V.A., Shalunov A.V. Increasing the uniformity of amplitude oscillations of anisotropic ultrasonic disc emitters for gas media // 2018 19th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM). – Erlagol, 2018. – P. 270–274.
19. Longitudinally oscillating ultrasonic emitter for influencing gas-dispersed systems / V.N. Khmelev, V.A. Nesterov, A.V. Shalunov, R.V. Barsukov, S.N. Tsyganok // *J. Phys.: Conf. Ser.* – 2020. – Vol. 1679. – 022008.
20. Васильевский М.В. Обеспыливание газов инерционными аппаратами: монография. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 258 с.

Информация об авторах

Владимир Николаевич Хмелев, доктор технических наук, заместитель директора по научной работе Бийского технологического института Алтайского государственного технического университета, Россия, 659305, г. Бийск, ул. Трофимова, 27; vnh@bti.secna.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7089-3578>

Виктор Александрович Нестеров, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Бийского технологического института Алтайского государственного технического университета, Россия, 659305, г. Бийск, ул. Трофимова, 27; nva@bti.secna.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6140-5699>

Андрей Викторович Шалунов, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Бийского технологического института Алтайского государственного технического университета, Россия, 659305, г. Бийск, ул. Трофимова, 27; shalunov@bti.secna.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5299-9931>

Сергей Александрович Терентьев, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Бийского технологического института Алтайского государственного технического университета, Россия, 659305, г. Бийск, ул. Трофимова, 27; sergey@bti.secna.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6989-9769>

Поступила в редакцию: 09.11.2023

Поступила после рецензирования: 20.11.2023

Принята к публикации: 09.09.2024

REFERENCES

1. Lu X., Zhang S., Xing J., Wang Y., Chen W., Ding D., Hao J. Progress of air pollution control in China and its challenges and opportunities in the ecological civilization era. *Engineering*, 2020, vol. 6, no. 12, pp. 1423–1431.
2. Miller L., Xu X. Ambient PM_{2.5} human health effects – findings in China and research directions. *Atmosphere*, 2018, vol. 9, no. 424, pp. 1–16.
3. Pope C.A., Ezzati M., Cannon J.B., Allen R.T., Jerrett M., Burnett R.T. Mortality risk and PM_{2.5} air pollution in the USA: an analysis of a national prospective cohort. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 2017, vol. 11, no. 3, pp. 245–252.
4. Halonen J., Lanki T., Yli-Tuomi T., Tiittanen P., Kulmala V., Pekkanen J. Particulate air pollution acute cardio respiratory hospital admissions and mortality among the elderly. *American Journal of Epidemiology*, 2009, vol. 20, no. 1, pp. 143–153.
5. Fu P.B., Wang F., Yang X.J., Ma L., Cui X., Wang H.L. Inlet particle-sorting cyclone for the enhancement of PM_{2.5} separation. *Am J Environ Sci*, 2017, vol. 51, no. 3, pp. 1587–1594.
6. Hoekstra A.J. *Gas flow field and collection efficiency of cyclone separators*. Ph.D. Thesis. Delft, 2000. 165 p.
7. Leith D., Licht W. The collection efficiency of cyclone type particle collectors-a new theoretical approach. *AIChE Symp*, 1972, vol. 68, pp. 196–206.
8. Qian F., Wu Y. Effects of the inlet section angle on the separation performance of a cyclone. *Chem. Eng. Res. Des*, 2009, vol. 87, no. 12, pp. 1567–1572.
9. Guo Y., Zhang G., Li Y., Gu H., Yuan D., Liu M. Study on aerosol agglomeration using the airborne ultrasonic transducer. *Particuology*, 2023, vol. 82, pp. 157–165.
10. Hoda Y., Asami T., Miura H. Aerosol agglomeration by aerial ultrasonic sources containing a cylindrical vibrating plate with the same diameter as a circular tube. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2022, vol. 61, pp. SG1073.
11. Ono Y., Asami T., Miura H. Agglomeration of aerosol using small equipment with two small aerial ultrasonic sources. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2023, vol. 62, pp. SJ1029.
12. Zhang Y.T., Lai S.K., Yu J.C.W., Guo H., Lim C.W. A novel U-shaped acoustic-manipulated design to enhance the performance of low-efficiency filters for sub-micron particles. *Powder Technol.*, 2021, vol. 392, pp. 412–423.
13. König. W. Hydrodynamic-acoustic investigations. On the forces between two spheres in a vibrating fluid and on the formation of Kundt's dust figures. *Ann. Phys. und Chem*, 1891, vol. 42, no. 4, pp. 549. (In Germ.)
14. Brandt O., Freund H., Hiedemann E. On the Theory of Acoustic Coagulation. *Kolloid-Zeitschrift*, 1936, vol. 77, pp. 103–115. (In Germ.)

15. Gallego-Juarez J.A., Riera-Franco De Sarabia E., Rodríguez-Corral G., Hoffmann T.L., Gálvez-Moraleda J.C., Rodríguez-Maroto J.J., Acha M. Application of acoustic agglomeration to reduce fine particle emissions from coal combustion plants. *Environmental Science & Technology*, 1999, vol. 33, no. 21, pp. 3843–3849.
16. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Nesterov V.A. Improving the performance of air purification efficiency from fine-dispersed particles by ultrasonic exposure in swirling flow. *Int. J. Environ. Sci. Technol*, 2020, vol. 17, pp. 3927–3934.
17. Fu P.B., Wang F., Yang X.J., Ma L., Cui X., Wang H.L. Inlet particle-sorting cyclone for the enhancement of PM 2.5 separation. *Am J Environ Sci*, 2017, vol. 51, no. 3, pp. 1587–1594.
18. Khmelev V. N., Nesterov V.A., Shalunov A.V. Increasing the uniformity of amplitude oscillations of anisotropic ultrasonic disc emitters for gas media. *2018 19th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM)*. Erlagol, 2018, pp. 270–274.
19. Khmelev V.N., Nesterov V.A., Shalunov A.V., Barsukov R.V., Tsyganok S.N. Longitudinally oscillating ultrasonic emitter for influencing gas-dispersed systems. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2020, vol. 1679, 022008.
20. Vasilevsky M.V. *Dust removal of gases using inertial devices: monograph*. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. house, 2008, 258 p. (In Russ.)

Information about the authors

Vladimir N. Khmelev, Dr. Sc., Deputy Director of Research, Altay State Technical University, 27, Trofimov street, Biysk, 659305, Russian Federation. vnh@bti.secna.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7089-3578>

Viktor A. Nesterov, Cand. Sc., Leading Researcher, Altay State Technical University, 27, Trofimov street, Biysk, 659305, Russian Federation. nva@bti.secna.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6140-5699>

Andrey V. Shalunov, Dr. Sc., Leading Researcher, Altay State Technical University, 27, Trofimov street, Biysk, 659305, Russian Federation. shalunov@bti.secna.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5299-9931>

Sergey A. Terentyev, Cand. Sc., Senior Researcher, Altay State Technical University, 27, Trofimov street, Biysk, 659305, Russian Federation. sergey@bti.secna.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6989-9769>

Received: 09.11.2023

Revised: 20.11.2023

Accepted: 09.09.2024

УДК 62-192:519:234:622.06

DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4721

Шифр специальности ВАК: 05.13.07

Вероятностная модель надежности погружных электродвигателей скважинных насосных агрегатов при добыче урана методом скважинного подземного выщелачивания

А.А. Ефремов^{1✉}, К.К. Кадыров², М.Д. Носков³, А.А. Филипас¹, А.А. Щипков³

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

² Акционерное общество «ДАЛУР», Россия, с. Уксянское

³ Северский технологический институт – филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия, г. Северск

✉ alexyefremov@tpu.ru

Аннотация. Актуальность. Погружной электродвигатель является наиболее уязвимым узлом электроцентробежного насосного агрегата, используемого при добыче урана методом скважинного подземного выщелачивания. Точность расчета потребности в новых электродвигателях напрямую влияет на рентабельность производства. **Цель.** Разработка вероятностной модели надежности погружного электродвигателя, обеспечивающей расчет вероятности его отказа на предстоящий период времени, и позволяющей с достаточной точностью оценить количество двигателей, необходимых для замены отказавших. **Методы.** Статистические методы, анализ выживаемости, проверка статистических гипотез. **Результаты и выводы.** Проведено исследование трех вероятностных моделей надежности для электродвигателей погружных насосов, используемых при добыче урана методом скважинного подземного выщелачивания. Для каждой модели определены оценки максимального правдоподобия ее параметров и проведена проверка ее адекватности на основе непараметрических критериев согласия. Несмотря на то, что результаты проверки не позволили исключить ни одну из рассматриваемых моделей, в качестве вероятностной модели надежности была выбрана модель, основанная на смеси двух распределений Вейбулла, которая продемонстрировала более высокую согласованность с реальными данными по сравнению с другими моделями. При этом анализ компонентов смеси распределений показал наличие группы электродвигателей, имеющих нехарактерно низкое значение наработки до отказа по сравнению со средним значением, рассчитанным для всей совокупности исследуемого оборудования, и позволил оценить долю таких двигателей, составившую 8 % от общего количества. Возможными причинами, объясняющими подобную неоднородность данных, по мнению авторов, являются скрытые производственные дефекты или более тяжелые условия эксплуатации, в которых функционирует некоторая часть погружных электродвигателей.

Ключевые слова: вероятностная модель надежности, погружной электродвигатель, добыча урана, скважинное подземное выщелачивание, смесь распределений Вейбулла, выбор модели

Для цитирования: Вероятностная модель надежности погружных электродвигателей скважинных насосных агрегатов при добыче урана методом скважинного подземного выщелачивания / А.А. Ефремов, К.К. Кадыров, М.Д. Носков, А.А. Филипас, А.А. Щипков // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 10. – С. 253–264. DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4721

UDC 62-192:519:234:622.06

DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4721

Probabilistic reliability model of electrical motors in submersible well pumping units used in the uranium mining by in-situ leaching

A.A. Efremov^{1✉}, K.K. Kadyrov², M.D. Noskov³, A.A. Filipas¹, A.A. Shchipkov³

¹ National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

² DALUR, JSC, Uksyanskoe, Russian Federation

³ Seversk Technological Institute – branch of National Research Nuclear University “MEPhI”,
Seversk, Russian Federation

✉ alexyefremov@tpu.ru

Abstract. Relevance. A submersible electric motor is the most vulnerable component of an electric centrifugal pumping unit used in in-situ leaching uranium mining. The accuracy of calculating the need for new electric motors directly affects the profitability of the uranium production. **Aim.** Development of a probabilistic reliability model for a submersible electric motor that provides the calculation of its failure probability for the upcoming period of time and allows estimating with sufficient accuracy the number of motors required to replace the failed ones. **Methods.** Statistical methods, survival analysis, statistical hypothesis testing. **Results and conclusions.** The authors conducted a study of three probabilistic reliability models for electric motors of submersible well pumping units used in in-situ leaching uranium mining. As a result of the study, the maximum likelihood estimates of model parameters were determined for each model; the adequacy of the models under study was checked based on nonparametric goodness-of-fit tests. Despite the fact that the test results did not allow excluding any of the considered models, a model based on a mixture of two Weibull distributions was selected as a probabilistic reliability model demonstrating higher consistency with real data, compared to the other models. At the same time, the analysis of the components of the mixture distribution indicated the presence of a group of electric motors with an uncharacteristically low time-to-failure value compared to the average value calculated for the entire set of equipment under study, and made it possible to estimate the share of such motors, which amounted to 8% of the total population. Possible reasons explaining such heterogeneity of data, according to the authors, are hidden manufacturing defects or more severe operating conditions in which some submersible electric motors operate.

Keywords: probabilistic reliability model, submersible electrical motor, uranium mining, in-situ leaching, mixture of Weibull distributions, model selection

For citation: Efremov A.A., Kadyrov K.K., Noskov M.D., Filipas A.A., Shchipkov A.A. Probabilistic reliability model of electrical motors in submersible well pumping units used in the uranium mining by in-situ leaching. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 10, pp. 253–264. DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4721

Введение

Добыча урана методом скважинного подземного выщелачивания (СПВ) является экономически более эффективной по сравнению с подземным и открытым горными способами [1–3]. Благодаря этому преимуществу методом СПВ в настоящее время добывается более 50 % урана в мире. При этом методе добыча урана осуществляется с помощью системы технологических скважин. Через нагнетательные скважины в зону ураноносных пород подается выщелачивающий раствор, который взаимодействует с ураносодержащими минералами, после чего продуктивный раствор с растворенным ураном поднимается на поверхность через откачные скважины. Таким образом, одним из основных элементов технологической цепочки добычного комплекса предприятий, применяющих метод СПВ,

являются откачные скважины. Их количество на добычных полигонах может достигать нескольких сотен.

Наиболее экономичным способом подъема продуктивных растворов является установка в откачных скважинах электроцентробежных насосных агрегатов (ЭЦНА). ЭЦНА состоят из погружных электродвигателей (ПЭД) и центробежных насосов (ЦН). Они работают практически круглосуточно в сложных условиях взаимодействия с агрессивными жидкостями, что влияет на срок службы ЭЦНА. Оперативная замена вышедших из строя ПЭД или ЦН является необходимым условием эффективности добычи урана. Это обеспечивается достаточным количеством насосного оборудования на складах предприятия. Для прогнозирования количества ЭЦНА, которые выйдут из строя в течение плани-

руемого периода, как правило, используются методики, основанные на среднем времени наработки на отказ ПЭД и ЦН. Подобный подход имеет невысокую точность, поэтому предприятия вынуждены планировать закупки с существенным запасом. Это негативно влияет на экономические показатели производства. В связи с этим необходимо добиваться повышения точности предсказания сроков выхода из строя работающего насосного оборудования.

В последнее время предприятиями, добывающими уран методом СПВ, активно проводится цифровая трансформация производства, в рамках которой внедряются информационные системы добычных комплексов (ИСДК) [4–6]. ИСДК делают доступными для анализа данные, определяющие широкий спектр показателей, характеризующих технологический процесс добычи урана методом СПВ. Наличие фактических данных позволяет проанализировать время наработки до отказа оборудования, определить законы распределения отказов и создать на этой основе математическую модель надежности [7–10]. В нашем случае появляется возможность создать вероятностную модель надежности ПЭД как наиболее уязвимого узла ЭЦНА, с помощью которой можно будет предсказать вероятность его выхода из строя на предстоящий период. На основе рассчитанных вероятностей выхода из строя ПЭД, как для отдельного участка, так и в рамках всего предприятия, можно более точно произвести расчет потребности в новых электродвигателях, необходимых для замены отказавших. Это позволяет сократить запасы ПЭД на складах предприятия, что делает производство более рентабельным.

На основе вышесказанного разработка вероятностной модели надежности ПЭД является актуальной задачей. Модель должна обеспечить расчет вероятности выхода из строя каждого ПЭД на предстоящий период времени с учетом его текущей наработки и позволить произвести расчет количества ПЭД, которые выйдут из строя за выбранный период. Для этого необходимо обосновать вид модели, определить её параметры и проверить её адекватность. Именно этим вопросам посвящена настоящая статья.

Подход к выбору вероятностной модели надежности

Теория надежности рассматривает отказы оборудования как случайные события, численным выражением которых является случайная величина X – «наработка до отказа», распределенная в соответствии с неким законом распределения вероятностей F_X , в общем случае неизвестным. Известно, что работоспособность технических систем зависит

от большого числа факторов, поэтому истинное распределение случайной величины X может представлять собой сложную комбинацию различных более простых распределений и, как следствие, может иметь большой набор параметров, что приводит к увеличению сложности анализа надежности таких систем, даже если функциональная форма закона распределения определена.

Очевидным выходом из этой ситуации является использование вероятностных моделей надежности (ВМН) [11], обычно представляющих собой хорошо известные законы распределения случайных величин или их простые комбинации с небольшим количеством параметров, достаточно точно описывающие поведение случайной величины X и согласующиеся с результатами наблюдений.

Процедуры выбора и верификации адекватной ВМН используют методы математической статистики, результаты применения которых зависят от качества используемых данных, а именно от их объема, точности и полноты. Основными проблемами при решении задачи определения ВМН являются:

- малый объем выборок данных об отказах оборудования;
- низкая точность этих данных, во многом обусловленная человеческим фактором;
- высокая степень цензурирования данных.

Использование крупными предприятиями больших партий однотипного оборудования в течение длительных промежутков времени, а также широкое внедрение информационных систем, способных в числе прочего с высокой точностью фиксировать значения наработок до отказа конкретных экземпляров оборудования, позволяет во многом устранить указанные выше проблемы.

Данные о наработках до отказа и текущих наработках экземпляров оборудования могут быть представлены в виде множества упорядоченных пар (выборки) $V = \{(t_i, \sigma_i)\}$, $i = 1, 2, \dots, N$, где t_i – значения наблюдаемых наработок; $\sigma_i = 1$, если t_i представляет собой время до отказа, и $\sigma_i = 0$, если t_i есть наработка i -го объекта, не отказавшего к текущему моменту времени; N – количество объектов.

Текущие наработки не отказавших объектов рассматриваются как моменты правого цензурирования [12]. Поскольку экземпляры оборудования могут вводиться в эксплуатацию в разное время, значения t_i наработок объектов, сохранивших работоспособность к текущему моменту, будут разными. Следовательно, анализируемые данные в общем случае являются многократно цензурированными справа.

Поскольку случайная величина X – «наработка до отказа» может принимать лишь неотрицательные значения, представляется целесообразным вы-

бирать в качестве возможных ВМН (моделей-кандидатов) абсолютно непрерывные распределения, функции распределения которых отличны от нуля только для положительных значений аргумента.

Будем полагать, что выбор ВМН производится из некоторого множества $\mathbf{M}=\{M_1, M_2, \dots, M_m\}$, состоящего из m моделей-кандидатов. Каждой модели-кандидату $M_j, j=1, 2, \dots, m$, соответствует функция распределения $F_j(x, \Theta_j)$ и функция плотности распределения $f_j(x, \Theta_j)$, где $\Theta_j=(\theta_1^j, \theta_2^j, \dots, \theta_{p_j}^j)^T$ – вектор оцениваемых параметров j -й модели-кандидата, p_j – число параметров j -й модели-кандидата.

Для получения значений точечных оценок параметров модели могут использоваться различные методы, однако наибольшей популярностью пользуется метод максимального правдоподобия (ММП). В частности, для решаемой в данной работе задачи ММП позволяет без особых затруднений учитывать наличие цензурирования в анализируемой выборке [13]. Так, для модели-кандидата M_j с функцией распределения $F_j(x, \Theta_j)$ и функцией плотности распределения $f_j(x, \Theta_j)$ логарифмическая функция правдоподобия, рассчитанная по выборке $\mathbf{V}=\{(t_i, \sigma_i)\}$, $i=1, 2, \dots, N$ и модифицированная для случая правого цензурирования, будет иметь вид:

$$\Lambda_j(\mathbf{V}|\Theta_j) = \sum_{i=1}^N \left[\sigma_i \ln(f_j(t_i, \Theta_j)) + (1 - \sigma_i) \ln(1 - F_j(t_i, \Theta_j)) \right]. \quad (1)$$

Вектор значений оценок параметров модели M_j тогда будет равен

$$\Theta_j = \arg \max \Lambda_j(\mathbf{V}|\Theta_j).$$

Для выбора наиболее адекватной ВМН из списка моделей-кандидатов может применяться подход, основанный на использовании информационных критериев, таких как информационный критерий Акаике (AIC) [14], байесовский информационный критерий (BIC) [15] и критерий Ханнана–Куинна (HQ) [16], позволяющих оценить относительное качество рассматриваемых моделей. Информационные критерии предоставляют возможность соблюсти баланс между точностью и сложностью модели, используя корректировку максимальных значений правдоподобия, зависящую от числа параметров и, в некоторых случаях, от объема выборки.

Значения перечисленных выше критериев для модели M_j определяются как

$$AIC_j = 2p_j - 2\Lambda_j(\mathbf{V}|\Theta_j); \quad (2)$$

$$BIC_j = p_j \ln(N) - 2\Lambda_j(\mathbf{V}|\Theta_j); \quad (3)$$

$$HQ_j = 2p_j \ln(\ln(N)) - 2\Lambda_j(\mathbf{V}|\Theta_j), \quad (4)$$

где p_j – число параметров j -й модели; N – объем выборки; $\Lambda_j(\mathbf{V}|\Theta_j)$ – максимальное значение логарифмической функции правдоподобия j -й модели в соответствии с (1).

Модель-кандидат с наименьшим значением критерия считается наиболее пригодной. Однако, поскольку информационные критерии позволяют оценить лишь относительное качество моделей, необходима дополнительная проверка адекватности выбранной ВМН на основе критериев согласия. В данной работе такая проверка будет проводиться с использованием широко применяющихся в подобных задачах критериев согласия: Пирсона (хи-квадрат), Колмогорова, ω^2 Крамера–Мизеса–Смирнова и Ω^2 Андерсона–Дарлингса [17].

Проверяемая гипотеза $H_0: F(x) = F_0(x, \Theta)$, где $F_0(x, \Theta)$ есть функция распределения вероятностей, с которой проверяется согласие выборки, а Θ – вектор известных параметров распределения, является простой, если выборки, используемые для оценки параметров и для проверки согласия, различны.

Для вычисления значения критерия согласия Пирсона по выборке $\mathbf{V}$ область определения случайной величины X делят на k непересекающихся интервалов $(0; x_1], (x_1; x_2], \dots, (x_{k-1}; x_k]$ и определяют количество элементов выборки, попавших в каждый интервал [18].

Статистика χ_N^2 Пирсона определяется как

$$\chi_N^2 = N \sum_{i=1}^k \frac{(n_i/N - p_i(\Theta))^2}{p_i(\Theta)}, \quad (5)$$

где N – объем выборки; n_i – количество элементов выборки, попавших в i -й интервал;

$p_i(\Theta) = \int_{x_{i-1}}^{x_i} f_0(x, \Theta) dx$, $f_0(x, \Theta)$ – функция плотности распределения вероятностей.

Нулевая гипотеза отклоняется при заданном уровне значимости α , если полученное значение статистики больше, чем критическое значение $\chi_{N-1, \alpha}^2$, являющееся квантилем уровня $1-\alpha$ распределения хи-квадрат с $k-1$ степенями свободы. В противном случае у нас нет оснований отвергнуть нулевую гипотезу.

Вычисление значений статистики χ_N^2 по формуле (5) предполагает, что выборка $\mathbf{V}$ является полной, то есть анализируемые данные не цензурированы. Для случая цензурированных данных в работе [19] предлагается получить «псевдополную» вы-

борку, то есть заменить элементы $(t_i, 0) \in V$ на элементы вида $(\xi_i, 1)$, где ξ_i – случайное число, распределенное равномерно на интервале $(F_0^{-1}(t_i, \Theta); 1)$;

$F_0^{-1}(x, \Theta)$ – функция, обратная к $F_0(x, \Theta)$. Там же утверждается, что погрешность, связанная с подобной модификацией выборки, незначительна уже для выборки объема $N > 20$.

Использование критерия Колмогорова для проверки гипотез подразумевает расчет значения статистики [20]

$$S_K = \frac{6ND_N + 1}{6\sqrt{N}}, \quad (6)$$

где

$$D_N = \max(D_N^+, D_N^-), \quad D_N^+ = \max_{1 \leq i \leq N} \left\{ \frac{i}{N} - F_0(x_i, \Theta) \right\},$$

$$D_N^- = \max_{1 \leq i \leq N} \left\{ F_0(x_i, \Theta) - \frac{i-1}{N} \right\}, \quad F_0(x, \Theta)$$

– теоретическая функция распределения.

Статистику критерия ω^2 Крамера–Мизеса–Смирнова [20] можно найти по формуле

$$S_\omega = \frac{1}{12N} + \sum_{i=1}^N \left\{ F_0(x_i, \Theta) - \frac{2i-1}{2N} \right\}^2, \quad (7)$$

а критерия Ω^2 Андерсона–Дарлинга [20] как

$$S_\Omega = -N - 2 \sum_{i=1}^N \left\{ \frac{2i-1}{2N} \ln F_0(x_i, \Theta) + \left(1 - \frac{2i-1}{2N} \right) \ln (1 - F_0(x_i, \Theta)) \right\}. \quad (8)$$

Рассчитанные по формулам (6)–(8) значения статистик сравниваются с критическими значениями соответствующих критериев для заданного уровня значимости α [21]. При этом нулевая гипотеза $H_0: F(x) = F_0(x, \Theta)$ отвергается, если полученное значение статистики больше критического.

Модели-кандидаты

Помимо адекватности и высокой предсказательной способности дополнительными требованиями, выдвигаемыми к ВМН, являются простота модели и удобство работы с ней. Этим требованиям удовлетворяет, например, двухпараметрическое распределение Вейбулла [22], функцию распределения и функцию плотности распределения которого можно записать в следующем виде:

$$F_W(x, \eta, \beta) = 1 - \exp \left(- \left(\frac{x}{\eta} \right)^\beta \right); \quad (9)$$

$$f_W(x, \eta, \beta) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{x}{\eta} \right)^{\beta-1} \exp \left(- \left(\frac{x}{\eta} \right)^\beta \right), \quad (10)$$

где $x \geq 0$; $\eta > 0$ – параметр масштаба; $\beta > 0$ – параметр формы.

Распределение Вейбулла нашло широкое применение в задачах надежности и при анализе выживаемости, во многом благодаря малому количеству параметров и возможности получать различные формы кривых интенсивности отказов в зависимости от значения параметра β . Также несомненным достоинством этого распределения является наличие прозрачной интерпретации для параметра η : выражаемый в тех же единицах измерения, что и сама случайная величина (наработка до отказа), параметр η определяет наработку, в течение которой откажут приблизительно 63 % объектов из исследуемой популяции.

При этом использование распределения Вейбулла в качестве закона распределения наработки на отказ не лишено недостатков: единственный параметр формы не позволяет получить большое разнообразие форм кривых интенсивностей отказов; являясь унимодальным, распределение Вейбулла не может служить адекватной ВМН в случаях, когда, например, отказы оборудования возникают по разным причинам.

Тем не менее мы не можем исключить модель надежности, основанную на распределении Вейбулла (МНВ), из списка рассматриваемых моделей-кандидатов.

При анализе выживаемости и в задачах эконометрики часто используются так называемые модели конкурирующих рисков (МКР) (*competing risk model – CRM*) [23], предназначенные для описания наработок оборудования в случаях, когда отказы могут являться результатами воздействия разных факторов.

Пусть существует $k \geq 2$ различных причин возникновения отказов, и времена отказов, возникших по i -й причине ($i=1, 2, \dots, k$), являются случайными величинами, распределенными в соответствии с законом, имеющим функцию распределения $F_i(x)$. Тогда функция распределения наработки до отказа оборудования задается как

$$F_{CRM}(x) = 1 - \prod_{i=1}^k (1 - F_i(x)), \quad x \geq 0. \quad (11)$$

В данной работе в качестве одной из моделей-кандидатов будет использоваться модель конкурирующих рисков с $k=2$ при допущении о том, что $F_i(x) = F_W(x, \eta_i, \beta_i)$, то есть что существуют две основных причины выхода ПЭД из строя и что времена отказов ПЭД по i -й причине являются слу-

чайными величинами, имеющими распределение Вейбулла, задаваемое выражениями (9), (10), с параметрами η_i и β_i . С учетом этого выражение (11) примет вид

$$F_{CRM}(x, \mathbf{H}, \mathbf{B}) = 1 - \prod_{i=1}^2 \exp \left[- \left(\frac{x}{\eta_i} \right)^{\beta_i} \right], \quad (12)$$

а функция плотности распределения будет определяться как

$$f_{CRM}(x, \mathbf{H}, \mathbf{B}) = \sum_{i=1}^2 \left[\frac{\beta_i}{\eta_i} \left(\frac{x}{\eta_i} \right)^{\beta_i-1} \right] \prod_{j=1}^2 \exp \left[- \left(\frac{x}{\eta_j} \right)^{\beta_j} \right], \quad (13)$$

где $\mathbf{H} = \begin{pmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \end{pmatrix}$ – вектор параметров масштаба, а

$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \end{pmatrix}$ – вектор параметров формы распределения Вейбулла.

Используемая в данной работе МКР имеет четыре параметра, что, с одной стороны, позволяет надеяться на большую гибкость модели по сравнению с МНВ, но, с другой, данную модель, строго говоря, нельзя назвать простой. Однако современное математическое программное обеспечение позволяет без особых проблем использовать ее для практических расчетов.

Еще одним видом сложных распределений, нашедшим свое применение в задачах анализа эксплуатационной надежности, является конечная смесь распределений. Смеси распределений демонстрируют высокую адекватность при описании неоднородных данных [22, 24] и позволяют, например, учитывать наличие в общей популяции объектов нескольких субпопуляций, различающихся по каким-то признакам. Будем считать, что значения некоторой случайной величины X распределены в соответствии с k -компонентной смесью распределений, если функция распределения этой величины определяется выражением

$$F_X(x) = \sum_{i=1}^k w_i F_i(x), \quad (14)$$

где $F_i(x)$ – функция распределения i -й субпопуляции объектов; $0 < w_i < 1$ – весовые коэффициенты,

такие, что $\sum_{i=1}^k w_i = 1$. В общем весовой коэффициент w_i выражает долю объектов i -й субпопуляции в генеральной совокупности. Для уменьшения сложности вероятностной модели можно сократить ко-

личество весовых коэффициентов, выразив, например, весовой коэффициент последнего компонента

смеси в виде $w_k = 1 - \sum_{i=1}^{k-1} w_i$.

Подставляя в выражение (14) различные функции распределения, можно получить разнообразные законы распределения случайных величин. В данной работе в качестве одной из моделей-кандидатов будет использоваться двухкомпонентная смесь распределений Вейбулла (2СРВ), имеющая функцию распределения вида

$$F_{2CPB}(x, \mathbf{H}, \mathbf{B}, w) = 1 - w \exp \left[- \left(\frac{x}{\eta_1} \right)^{\beta_1} \right] - (1-w) \exp \left[- \left(\frac{x}{\eta_2} \right)^{\beta_2} \right] \quad (15)$$

и функцию плотности распределения

$$f_{2CPB}(x, \mathbf{H}, \mathbf{B}, w) = w \left[\frac{\beta_1}{\eta_1} \left(\frac{x}{\eta_1} \right)^{\beta_1-1} \exp \left[- \left(\frac{x}{\eta_1} \right)^{\beta_1} \right] \right] + (1-w) \left[\frac{\beta_2}{\eta_2} \left(\frac{x}{\eta_2} \right)^{\beta_2-1} \exp \left[- \left(\frac{x}{\eta_2} \right)^{\beta_2} \right] \right], \quad (16)$$

где $\mathbf{H} = \begin{pmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \end{pmatrix}$ – вектор параметров масштаба;

$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \end{pmatrix}$ – вектор параметров формы распределения Вейбулла, а w – весовой коэффициент.

Используемая в данной работе модель 2СРВ имеет пять параметров и, таким образом, является самой сложной моделью из рассматриваемых.

Описание используемых данных

В работе используется выборка V данных о наработках ПЭД, мощностью 5,5 кВт, введенных в эксплуатацию с 2010 по 2015 гг., объемом $N=688$, содержащая $N_F=588$ значений наработок до отказа (в сутках) и $N_R=100$ значений наработок двигателей, не отказавших к началу 2024 г. Все ПЭД изготовлены одним производителем, имеют одинаковую мощность и одинаковое исполнение, что позволяет считать их статистически идентичными объектами. Выбор ПЭД с мощностью 5,5 кВт для анализа в данной статье обусловлен тем, что для них имеется наиболее представительная выборка, поскольку предприятием в основном используются именно такие двигатели.

Поскольку анализируемые данные не содержат информацию о наработках до отказа для всех ПЭД, выборка V не является полной. Будем рассматривать значения наработок не отказавших двигателей как значения моментов правого цензурирования. Таким образом, выборка V является многократно цензурированной справа со степенью цензурирования $\alpha=0,145$.

В данной работе для выбора ВМН решаются задачи определения оценок параметров распределений вероятностей, используемых в качестве моделей-кандидатов, и проверки гипотезы об адекватности выбранной ВМН с использованием непараметрических критериев согласия. Как утверждается в работе [25], использование одной и той же выборки для оценки параметров и для проверки приведет к тому, что проверяемая гипотеза будет сложной, а критерии согласия в этом случае лишатся свойства свободы от распределения. В связи с этим было принято решение о разделении выборки V на две части, $V^{(1)}$ и $V^{(2)}$, с объемами $N_1=347$ и $N_2=341$, соответственно. Разделение проводилось случайным образом так, чтобы примерно половина значений наработок ПЭД, введенных в эксплуатацию в каждом году из рассматриваемого промежутка, попало в выборку $V^{(1)}$, которая будет использоваться для оценки параметров распределений. Оставшаяся часть значений составит выборку $V^{(2)}$ и будет использоваться для верификации результатов. Также при разделении данных значения наработок до отказа и моментов цензурирования для двигателей, введенных в эксплуатацию в каждом году, делились в той же пропорции, для сохранения степени цензурирования каждой выборки приблизительно на одном уровне. В итоге выборка $V^{(1)}$ содержит $N_{F1}=296$ значений наработок до отказа и $N_{R1}=51$ значений времен цензурирования (степень цензурирования $\alpha_1=0,147$); выборка $V^{(2)}$ содержит $N_{F2}=292$ значения наработок до отказа и $N_{R2}=49$ значений времен цензурирования (степень цензурирования $\alpha_2=0,144$).

Результаты исследования

Оценки максимального правдоподобия параметров рассматриваемых моделей-кандидатов, рассчитанные по выборке $V^{(1)}$, приведены в табл. 1.

Таблица 1. Оценки максимального правдоподобия параметров исследуемых вероятностных моделей надежности

Table 1. Maximum likelihood estimates of the parameters of the probabilistic reliability models under consideration

ВМН	η_1	β_1	η_2	β_2	w
W	1605	1,16	–	–	–
МКР	1609	1,15	9954	4,61	–
2СРВ	205	4,46	1753	1,29	0,08

Подставив полученные оценки в формулы (9), (12) и (15), получим выражения функций вероятности отказа для моделей надежности Вейбулла, МКР и 2СРВ, соответственно. Значения информационных критериев, рассчитанные по формулам (2)–(4) для каждой из моделей-кандидатов, приведены в табл. 2.

Таблица 2. Значения информационных критериев

Table 2. Values of the information criteria

ВМН	$-2\Delta_{\max}$	AIC	HQ	BIC
W	4942,6	4946,6	4949,7	4954,3
МКР	4942,7	4950,7	4956,8	4966,1
2СРВ	4929,1	4939,1	4946,7	4958,3

Видно, что модель, основанная на двухкомпонентной смеси распределений Вейбулла, имеет наименьшие значения критериев AIC и HQ, и лишь немного уступает модели Вейбулла в соответствии с байесовским информационным критерием. При этом значения трех информационных критериев для всех рассматриваемых моделей-кандидатов различаются незначительно. Однако наивысшим значением правдоподобия, т. е. наименьшим значением $-2\Delta_{\max}$ без учета поправок, определяющих сложность ВМН, обладает модель 2СРВ.

При наличии настолько близких значений информационных критериев проведем процедуру верификации на основе критериев согласия для всех трех моделей-кандидатов.

Для верификации используется цензурированная выборка $V^{(2)}$ объемом $N_2=341$ со степенью цензурирования $\alpha_2=0,144$. В соответствии с процедурой, описанной в [19], для каждой модели M_j с функцией распределения $F_j(x, \Theta_j)$ получим «псевдополные» выборки и разобьем область определения случайной величины X – «наработка до отказа» – на $k=6$ равновероятных непересекающихся интервалов. Задав значение уровня значимости $\alpha=0,05$, определим значения статистики χ_N^2 Пирсона по формуле (5). Также рассчитаем по формулам (6)–(8) значения статистик критериев Колмогорова (S_K), Крамера–Мизеса–Смирнова (S_ω) и Андерсона–Дарлингса (S_Ω). Полученные значения статистик для рассматриваемых моделей приведены в табл. 3.

Таблица 3. Значения статистик критериев согласия

Table 3. Values of the goodness-of-fit criteria

ВМН	χ_N^2	S_K	S_ω	S_Ω
W	9,656	0,769	0,113	0,896
МКР	9,512	0,765	0,112	0,894
2СРВ	7,039	0,707	0,093	0,609

Критическое значение статистики Пирсона для уровня значимости $\alpha=0,05$ и $k-1=5$ степеней свободы равно $\chi^2_{5,0,95}=11,07$. Приведенные в [21] табличные критические значения для критериев Колмогорова, Крамера–Мизеса–Смирнова и Андерсона–Дарлингга для того же уровня значимости равны, соответственно,

$$S_K^\alpha = 1,3581, S_\phi^\alpha = 0,4614 \text{ и } S_\Omega^\alpha = 2,4924.$$

Из табл. 3 видно, что рассчитанные значения статистик используемых критериев согласия для всех рассматриваемых моделей меньше критических, следовательно, мы не можем отвергнуть ни одну из них. Однако вероятностная модель надежности, основанная на двухкомпонентной смеси распределений Вейбулла, обладает наименьшими значениями статистик, что дает нам, вместе с результатами анализа значений информационных

критериев, дополнительное основание отдать предпочтение именно этой ВМН.

Сопоставление гистограммы распределения наблюдаемых наработок до отказа из проанализированной выборки **V** и функции плотности распределения (16) с параметрами из табл. 1 говорит о высокой степени соответствия полученной модели 2СРВ и имеющихся данных об отказах ПЭД (рис. 1).

Более того, функция плотности распределения на рис. 1 хорошо отражает наличие в имеющейся совокупности ПЭД значительного числа экземпляров с низкой наработкой до отказа, что подтверждается совпадением моды функции плотности модели 2СРВ и наблюдаемого всплеска количества отказов двигателей. Вероятностные модели Вейбулла и МКР такой возможности не предоставляют (рис. 2, 3), поскольку их функции плотности, определяемые соответственно выражениями (10) и (13), игнорируют наличие такого всплеска.

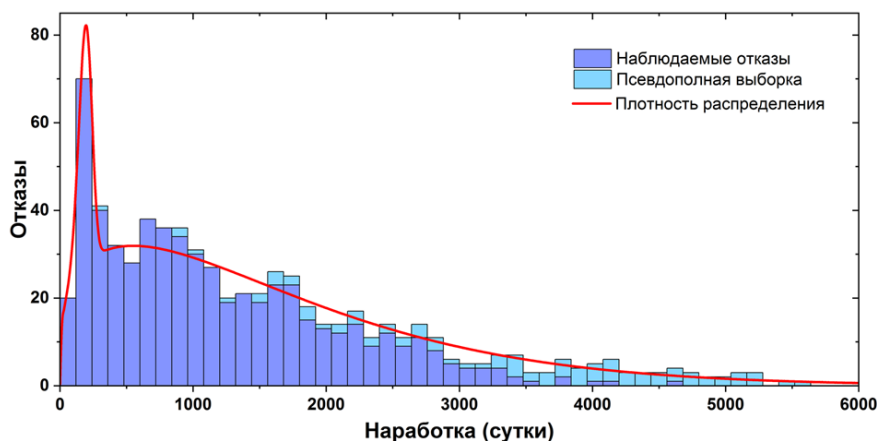


Рис. 1. Гистограмма распределения наработок до отказа и функция плотности модели надежности, основанной на двухкомпонентной смеси распределений Вейбулла

Fig. 1. Histogram of times-to-failure and the failure density function for the reliability model based on two-component mixture of Weibull distributions

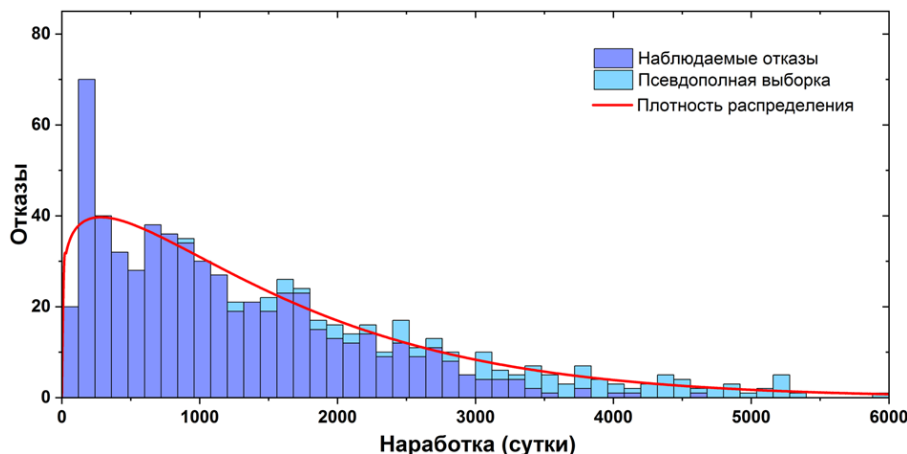


Рис. 2. Гистограмма распределения наработок до отказа и функция плотности модели надежности Вейбулла

Fig. 2. Histogram of times-to-failure and the failure density function for the Weibull reliability model

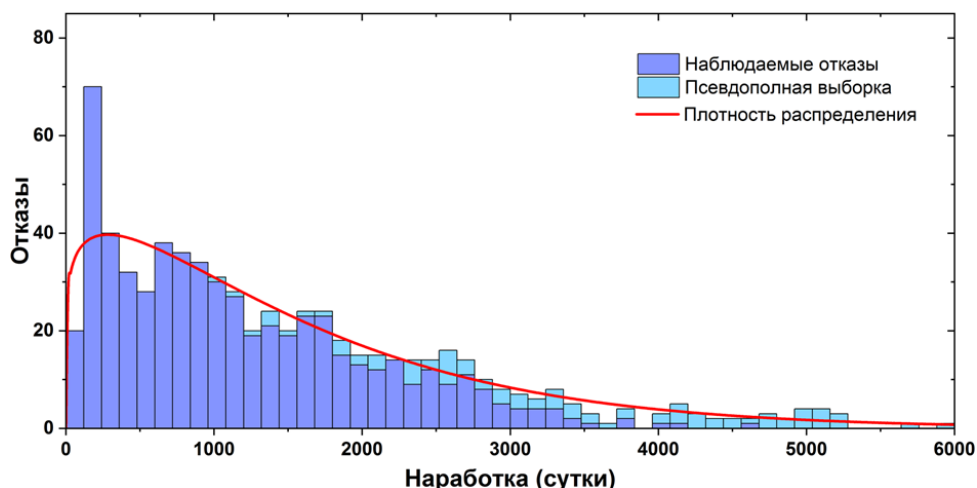


Рис. 3. Гистограмма распределения наработок до отказа и функция плотности модели надежности конкурирующих рисков

Fig. 3. Histogram of times-to-failure and the failure density function for the competing risks reliability model

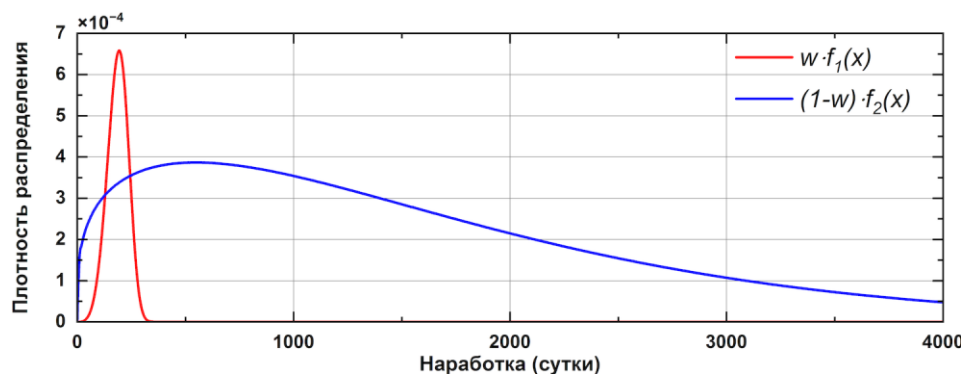


Рис. 4. Функции плотности компонентов двухкомпонентной смеси распределений Вейбулла

Fig. 4. Probability density functions of components in the two-component mixture of Weibull distributions

Коэффициенты модели 2СРВ из табл. 1 позволяют утверждать, что наработка до отказа около 8 % всех ПЭД является случайной величиной, распределенной по закону Вейбулла с параметрами $\eta_1=205$ и $\beta_1=4,46$ (средняя наработка до отказа равна 187 суток). Отказы основной части оборудования распределены по закону Вейбулла с параметрами $\eta_2=1753$ и $\beta_2=1,29$ (средняя наработка до отказа равна 1622 суток).

На рис. 4 приведены графики функций плотности компонентов смеси распределений, масштабированные с учетом весового коэффициента: $wf_1(x, \eta_1, \beta_1)$ (красная кривая) и $(1-w)f_2(x, \eta_2, \beta_2)$ (синяя кривая), где f_1 и f_2 – функции, определяемые выражением (10).

Таким образом, в соответствии с моделью 2СРВ в общей совокупности ПЭД можно выделить две группы двигателей с существенно различающимися показателями надежности. Данная модель принята за базовую модель надежности ПЭД, используемых для добычи урана методом СПВ. В ходе дальнейших исследований, на основе вновь полу-

ченных данных, эту модель планируется усовершенствовать путем уточнения её параметров с учетом различных типов ПЭД и условий их эксплуатации. Кроме того, на основе полученных в результате данного исследования закономерностей выхода из строя ПЭД планируется провести анализ причин отказов и подготовить предложения по увеличению их времени наработки до отказа.

Заключение

Было проведено исследование трех ВМН для электродвигателей погружных насосов, используемых при добыче урана методом скважинного подземного выщелачивания:

- модели надежности Вейбулла;
- МКР, предполагающей, что отказы ПЭД происходят по одной из двух несовместных причин;
- модели, основанной на предположении о том, что распределение наработки до отказа описывается двухкомпонентной смесью распределений Вейбулла (2СРВ).

Используя метод максимального правдоподобия, были определены точечные оценки параметров ВМН. Для всех ВМН были рассчитаны значения информационных критериев, а также значения статистик критериев согласия.

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Значения информационных критериев не позволили однозначно выявить наилучшую ВМН. Однако модель 2СРВ является наиболее точной и определена как наиболее предпочтительная в соответствии с двумя критериями из трех используемых.
2. Проверка адекватности моделей на основе критериев согласия не позволила отвергнуть ни одну из рассматриваемых ВМН. При этом модель 2СРВ продемонстрировала более высокую согласованность с реальными данными, чем другие модели.
3. Использование модели 2СРВ позволило обнаружить наличие группы двигателей с низкими

значениями средней наработки до отказа в совокупности рассматриваемых ПЭД.

4. Поскольку для анализа были предоставлены данные статистически идентичных объектов, мы не можем объяснить имеющуюся неоднородность данных наличием ПЭД с различающимися техническими характеристиками
5. Наличие существенного количества электродвигателей с низкими значениями наработок до отказа может быть связано либо с невыявленными дефектами ПЭД, либо с более тяжелыми условиями эксплуатации, в которых функционируют некоторые экземпляры оборудования. Окончательный вывод по этому поводу может быть сделан на основании дополнительных исследований.
6. Результаты данного исследования могут быть использованы для уточнения потребности в закупках ПЭД при разработке новых или в ходе эксплуатации существующих месторождений урана, разрабатываемых методом скважинного подземного выщелачивания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Геотехнология урана (русский опыт): монография / под ред. И.Н. Солодова, Е.Н. Камнева. – М.: КДУ «Университетская книга», 2017. – 576 с.
2. Exploration, mining, milling and processing of uranium / T. Sreenivas, A.K. Kalburgi, M.L. Sahu, S.B. Roy // Nuclear Fuel Cycle / Eds. B.S. Tomar, P.R.V. Rao, S.B. Roy, J.P. Panakkal, K. Raj, A.N. Nandakumar. – Singapore: Springer, 2023. – P. 17–79. DOI: 10.1007/978-981-99-0949-0_2.
3. Experimental investigation on the influence of surfactant to the seepage characteristics of acid leaching solution during in-situ leaching of uranium / S. Zeng, J. Sun, B. Sun et al. // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. – 2023. – Vol. 332. – P. 3651–3660. DOI: 10.1007/s10967-023-09038-5.
4. Технологическая информационная система для контроля и управления добычным комплексом предприятия по добыче урана методом подземного выщелачивания / А.Д. Истомин, А.С. Бабкин, М.Д. Носков, А.А. Чеглоков, Н.А. Попонин // Цветные металлы. – 2012. – № 1/3. – С. 16–22.
5. Программный модуль учета, контроля и анализа работы насосного оборудования на предприятии, ведущем добычу урана методом скважинного подземного выщелачивания / С.Н. Валитов, А.Д. Истомин, М.Д. Носков, А.А. Чеглоков // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2017. – Т. 60. – № 9/2. – С. 18–23.
6. «Умный полигон» скважинного подземного выщелачивания урана / М.Д. Носков, А.Н. Михайлов, Р.С. Нарышкин, Р.С. Рудин // Горный журнал. – 2022. – № 4. – С. 41–46.
7. Ведяшкин М.В., Муравлев О.П. Оценка параметров законов распределения отказов обмоток статоров при эксплуатации крановых асинхронных двигателей // Известия ТПУ. – 2011. – Т. 319. – № 4. – С. 117–122.
8. Практическое применение статистической модели определения ресурса электрооборудования / Карандаев А.С., Ячиков И.М., Храмина Е.А., Николаев А.А., Николаев А.А. // Известия вузов. Электромеханика. – 2018. – Т. 61. – № 3. – С. 43–52. DOI: 10.17213/0136-3360-2018-3-43-52.
9. Болдырев А.С., Веревкин А.Л., Веревкина Л.С. Алгоритм моделирования надежности системы управления группой роботизированных платформ с горячим резервированием // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. – 2021. – № 4. – С. 49–57.
10. Грачева Е.И., Тошходжаева М.И. Моделирование работоспособности электрооборудования систем электроснабжения и электрических сетей: монография. – Казань: Отечество, 2021. – 220 с.
11. Reliability models of components / B.W. Tuinema, J.L. Rueda Torres, A.I. Stefanov, F.M. Gonzalez-Longatt, M.A.M.M. Van der Meijden // Probabilistic Reliability Analysis of Power Systems. – Cham: Springer, 2020. – P. 57–90. DOI: 10.1007/978-3-030-43498-4_3.
12. Kvam P., Lu J.C. Statistics for Reliability Modeling // Springer Handbook of Engineering Statistics / Ed. by H. Pham. – London: Springer, 2023. – P. 53–65. DOI: 10.1007/978-1-4471-7503-2_3.
13. Николаев Д.А., Антонов А.В., Чепурко В.А. Оценка параметров законов распределения с учетом усеченных слева и цензурированных справа данных // Вестник Кибернетики. – 2017. – № 2 (26). – С. 94–102.
14. García-Pérez A. Variogram model selection // Trends in Mathematical, Information and Data Sciences. Studies in Systems, Decision and Control / Eds. N. Balakrishnan, M.Á. Gil, N. Martín, D. Morales, M.d.C. Pardo. – Cham: Springer, 2023. – Vol. 445. – P. 21–27. DOI: 10.1007/978-3-031-04137-2_3.
15. Bayesian models / A.K. Chakraborty, S. Dey, P. Chakraborty, A. Chanda // Springer Handbook of Engineering Statistics / Ed. by H. Pham. – London: Springer, 2023. – P. 763–793. DOI: 10.1007/978-1-4471-7503-2_37.
16. Zhang J., Yang Y., Ding J. Information criteria for model selection // WIREs Computational Statistics. – 2023. – № 15 (5). – e1607. DOI: 10.1002/wics.1607.

17. Лемешко Б.Ю., Лемешко С.Б., Семенова М. А. К вопросу статистического анализа больших данных // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. – 2018. – № 44. – С. 40–49. DOI: 10.17223/19988605/44/5.
18. Devore J.L., Berk K.N., Carlton M.A. Chi-squared tests // Modern Mathematical Statistics with Applications. Springer Texts in Statistics. – Cham: Springer, 2021. – P. 823–854. DOI: 10.1007/978-3-030-55156-8_13.
19. Nonparametric goodness-of-fit tests for censored data / E. Chimitova, M. Nikulin, B. Lemesko et al. // Proceedings of the 7th International Conference on Mathematical Methods in Reliability: Theory, Methods and Applications. – Beijing, 20–24 June 2011. – Beijing: Beijing Institute of Technology, 2011. – P. 817–823.
20. О решении проблем применения некоторых непараметрических критериев согласия / Б. Ю. Лемешко, А.А. Горбунова, С.Б. Лемешко, А.П. Рогожников // Автометрия. – 2014. – Т. 50. – № 1. – С. 26–43.
21. Лемешко Б.Ю. Непараметрические критерии согласия: руководство по применению. – М.: Общество с ограниченной ответственностью «Научно-издательский центр ИНФРА-М», 2014. – 163 с.
22. ГОСТ Р 50779.27-2017. Статистические методы. Распределение Вейбулла. Анализ данных. – М.: Стандартинформ, 2020. – 62 с. URL: <https://protect.gost.ru/document.aspx?control=7&id=218209> (дата обращения: 23.01.2024).
23. Sankaran P.G., Antony A.A. Non-parametric estimation of lifetime distribution of competing risk models when censoring times are missing // Statistical Papers. – 2009. – № 50. – P. 339–361. DOI: 10.1007/s00362-007-0086-z.
24. Kumar S., Jain M. Shifted mixture model using Weibull, Lognormal, and Gamma distributions // National Academy Science Letters. – 2023. – № 46. – P. 539–545. DOI: 10.1007/s40009-023-01287-y.
25. Лемешко Б.Ю. О проблемах и ошибках применения критериев согласия // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. – 2023. – № 64. – С. 74–90. DOI: 10.17223/19988605/64/8.

Информация об авторах

Александр Александрович Ефремов, старший преподаватель отделения автоматизации и робототехники Инженерной школы информационных технологий и робототехники, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; alexuefremov@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8149-3641>

Камол Касимжанович Кадыров, первый заместитель генерального директора – директор по производству АО «Далур», Россия, 641750, село Уксянское, ул. Лесная, 1; kakkadyrov@rosatom.ru

Михаил Дмитриевич Носков, доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики Северского технологического института Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Россия, 636036, г. Северск, пр. Коммунистический, 65; MDNoskov@mephi.ru

Александр Александрович Филипас, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой – руководитель отделения автоматизации и робототехники на правах кафедры Инженерной школы информационных технологий и робототехники, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; filipas@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5376-5416>

Александр Андреевич Щипков, кандидат технических наук, доцент кафедры электроники и автоматизации физических установок Северского технологического института Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Россия, 636036, г. Северск, пр. Коммунистический, 65; AAShipkov@mephi.ru; <https://orcid.org/0009-0006-4633-9175>

Поступила в редакцию: 03.06.2024

Поступила после рецензирования: 13.06.2024

Принята к публикации: 19.09.2024

REFERENCES

1. *Geotechnology of uranium (Russian experience): monograph*. Eds. I.N. Solodova, E.N. Kamneva. Moscow, KDU, Universitetskaya Kniga Publ., 2017. 576 p. (In Russ.)
2. Sreenivas T., Kalburgi A.K., Sahu M.L., Roy S.B. Exploration, mining, milling and processing of uranium. *Nuclear Fuel Cycle*. Eds. B.S. Tomar, P.R.V. Rao, S.B. Roy, J.P. Panakkal, K. Raj, A.N. Nandakumar. Singapore, Springer, 2023. pp. 17–79. DOI: 10.1007/978-981-99-0949-0_2.
3. Zeng S., Sun J., Sun B. Experimental investigation on the influence of surfactant to the seepage characteristics of acid leaching solution during in-situ leaching of uranium. *J Radioanal Nucl Chem*, 2023, vol. 332, pp. 3651–3660. DOI: 10.1007/s10967-023-09038-5.
4. Istomin A.D., Babkin A.S., Noskov M.D., Cheglov A.A., Poponin N.A. Technological information system for monitoring and managing the mining complex of an enterprise for the extraction of uranium using the in-situ leaching method. *Non-Ferrous Metals*, 2012, no. 1/3, pp. 16–22. (In Russ.)
5. Valitov S.N., Istomin A.D., Noskov M.D., Cheglov A.A. Software module for recording, monitoring and analyzing the operation of pumping equipment at an uranium mining enterprise using the method of borehole in-situ leaching. *Russian Physics Journal*, 2017, vol. 60, no. 9/2, pp. 18–23. (In Russ.)

6. Noskov M.D., Mikhailov A.N., Naryshkin R.S., Rudin R.S. “Smart field” of in-situ leach uranium mining. *Gornyi Zhurnal*, 2022, no. 4, pp. 41–46.
7. Vedyashkin M.V., Muravlyov O.P. The estimation of failure distributions parameters of stator windings during operation of crane asynchronous motors. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2011, vol. 319, no. 4, pp. 117–122. (In Russ.)
8. Karandaev A.S., Yachikov I.M., Khrushina E.A., Nikolaev A.A., Nikolaev A.A. Practical application of a statistical model for determining the service life of electrical equipment. *Russian Electromechanics*, 2018, vol. 61, no. 3, pp. 43–52. (In Russ.)
9. Boldyrev A.S., Voryovkin A.L., Voryovkina A.L. Algorithm for modeling the reliability of a control system for a group of robotic platforms with hot standby. *Proceedings of Saint Petersburg Electrotechnical University*, 2021, no. 4, pp. 49–57. (In Russ.)
10. Grachova E.I., Toshkhodzhayeva M.I. *Modeling the performance of electrical equipment of power supply systems and electrical networks: monograph*. Kazan, Otechestvo Publ., 2021. 220 p. (In Russ.)
11. Tuinema B.W., Rueda Torres J.L., Stefanov A.I., Gonzalez-Longatt F.M., Van der Meijden M.A.M.M. Reliability models of components. *Probabilistic Reliability Analysis of Power Systems*. Cham, Springer, 2020. pp. 57–90. DOI: 10.1007/978-3-030-43498-4_3.
12. Kvam P., Lu J.C. Statistics for reliability modeling. Ed. by Pham H. *Springer Handbook of Engineering Statistics*. London, Springer, 2023. pp. 53–65. DOI: 10.1007/978-1-4471-7503-2_3.
13. Nikolaev D.A., Antonov A.V., Chepurko V.A. Distribution law parameters evaluation considering left-truncated and right-censored data. *Proceedings in Cybernetics*, 2017, no. 2 (26), pp. 94–102. (In Russ.)
14. García-Pérez A. Variogram model selection. *Trends in Mathematical, Information and Data Sciences. Studies in Systems, Decision and Control*. Eds. N. Balakrishnan, M.Á. Gil, N. Martín, D. Morales, M.d.C. Pardo. Cham, Springer, 2023. vol. 445, pp. 21–27. DOI: 10.1007/978-3-031-04137-2_3.
15. Chakraborty A.K., Dey S., Chakraborty P., Chanda A. Bayesian models. *Springer Handbook of Engineering Statistics*. Ed. by H. Pham. London, Springer, 2023. pp. 763–793. DOI: 10.1007/978-1-4471-7503-2_37.
16. Zhang J., Yang Y., Ding J. Information criteria for model selection. *WIREs Computational Statistics*, 2023, vol. 15, Iss. 5, e1607. DOI: 10.1002/wics.1607.
17. Lemesko B.Yu., Lemesko S.B., Semyonova M.A. On the issue of statistical analysis of big data. *Bulletin of Tomsk State University. Control, Computing and Information Science*, 2018, no. 44, pp. 40–49. (In Russ.)
18. Devore J.L., Berk K.N., Carlton M.A. Chi-Squared Tests. *Modern Mathematical Statistics with Applications. Springer Texts in Statistics*. Cham, Springer, 2021. pp. 823–854. DOI: 10.1007/978-3-030-55156-8_13.
19. Chimitova E., Nikulin M., Lemesko B. Nonparametric goodness-of-fit tests for censored data. *Proceedings of the 7th International Conference on Mathematical Methods in Reliability Theory, Methods and Applications*. Beijing, 2011. pp. 817–823.
20. Lemesko B.Yu., Gorbunova A.A., Lemesko S.B., Rogozhnikov A.P. On solving the problems of applying some nonparametric goodness-of-fit tests. *Autometry*, 2014, vol. 50, no. 1, pp. 26–43. (In Russ.)
21. Lemesko B.Yu. *Nonparametric goodness-of-fit tests: application guide*. Moscow, Scientific Publishing Center INFRA-M Ltd, 2014. 163 p. (In Russ.)
22. SS R 50779.27-2017 *Statistical methods. Weibull distribution. Data analysis*. Moscow, Standartinform Publ., 2020. 62 p. (In Russ.) Available at: <https://protect.gost.ru/document.aspx?control=7&id=218209> (accessed 23 January 2024).
23. Sankaran P.G., Antony A.A. Non-parametric estimation of lifetime distribution of competing risk models when censoring times are missing. *Stat Papers*, 2009, no. 50, pp. 339–361. DOI: 10.1007/s00362-007-0086-z.
24. Kumar S., Jain M. Shifted mixture model using Weibull, Lognormal, and Gamma distributions. *Natl. Acad. Sci. Lett.*, 2023, no. 46, pp. 539–545. DOI: 10.1007/s40009-023-01287-y.
25. Lemesko B.Yu. On problems and errors in applying goodness-of-fit tests. *Bulletin of Tomsk State University. Control, Computing and Information Science*, 2023, no. 64, pp. 74–90. (In Russ.)

Information about the authors

Alexander A. Efremov, Senior Lecturer, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; alexyefremov@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8149-3641>

Kamol K. Kadyrov, First Deputy Director, Production Director, DALUR JSC, 1, Lesnaya street, Uksyanskoye, Kurgan region, 641750, Russian Federation; kakkadyrov@rosatom.ru

Mikhail D. Noskov, Dr. Sc., Professor, Seversk Technological Institute of the National Research Nuclear University «MEPhI», 65, Kommunistichesky avenue, Seversk, 636036, Russian Federation. MDNoskov@mephi.ru

Alexander A. Filipas, Cand. Sc., Associate Professor, Head of Division for Automation and Robotics, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; filipas@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5376-5416>

Alexander A. Shchipkov, Cand. Sc., Associate Professor, Seversk Technological Institute of the National Research Nuclear University “MEPhI”, 65, Kommunistichesky avenue, Seversk, 636036, Russian Federation; AAShchipkov@mephi.ru; <https://orcid.org/0009-0006-4633-9175>

Received: 03.06.2024

Revised: 13.06.2024

Accepted: 19.09.2024

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 29.10.2024. Дата выхода журнала: 31.10.2024.
Формат 60х84/8 (А4). Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл. печ. л. 30,82. Уч.-изд. л. 27,88.
Заказ 346-24. Тираж 500 экз. Цена свободная.



Издательство

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Адрес учредителя, редакции, издателя, типографии:
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.