

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

ИЗВЕСТИЯ ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ

Том 333, № 4, 2022

Издательство Томского политехнического университета 2022

ИЗВЕСТИЯ ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА. ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ

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

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

> Подписной индекс в объединённом каталоге «Пресса России» – 18054

> > © ФГАОУ ВО НИ ТПУ, 2022

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

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

Учредителем является Томский политехнический университет.

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

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

«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



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

BULLETIN OF THE TOMSK POLYTECHNIC UNIVERSITY GEO ASSETS ENGINEERING

Volume 333, № 4, 2022

Tomsk Polytechnic University Publishing House 2022

BULLETIN OF THE TOMSK POLYTECHNIC UNIVERSITY. GEO ASSETS ENGINEERING

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) Belozerov V.B., Dr. Sc. (Russia) Nikitenkov N.N., Dr. Sc. (Russia) Silkin V.M., PhD (Spain) Koroteev Yu.M., Dr. Sc. (Russia) Ulenekov O.N., Dr. Sc. (Russia) Borisov A.M., Dr. Sc. (Russia) Korshunov A.V., Dr. Sc. (Russia) Pestryakov A.N., Dr. Sc. (Russia) Teipel U., Dsc (Germany) Jin-Chun Kim, Dsc (South Korea) Zavorin A.S., Dr. Sc. (Russia) Hanialic K., Dsc (Netherlands) Markovich D.M., Dr. Sc. (Russia) Alekseenko S.V., Dr. Sc. (Russia) Voropai N.I., Dr. Sc. (Russia) Kochegurov A.I., Cand. Sc. (Russia) Rui D., PhD (Portugal) Ziatdinov R.A., Cand. Sc. (South Korea) Muravvov 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) Glazyrin A.S., managing editor, Dr. Sc. (Russia)

© Tomsk Polytechnic University, 2022

AIMS AND SCOPES

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

The journal was founded in 1903.

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

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

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

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

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

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

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

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

The publication of manuscripts is free of charge.

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

7

27

37

СОДЕРЖАНИЕ

- Экогеохимическая оценка рек Ярлы-Амры и Чибитка, расположенных в ореоле действия Акташского ртутного месторождения и его отвалов (Горный Алтай) Мягкая И.Н., Сарыг-оол Б.Ю., Кириченко И.С., Густайтис М.А., Лазарева Е.В.
- Разработка способа низкотемпературного обескремнивания активированного цирконового концентрата раствором NH₄HF₂ Смороков А.А., Кантаев А.С., Брянкин Д.В., Миклашевич А.А.
 - Карта распределения плотности теплового потока кровли фундамента восточной части Томской области Исаев В.И., Лобова Г., Меренкова А.С., Осипова Е.Н., Кузьменков С.Г., Фомин А.Н.
- Минералогия руд Сохатиного золоторудного месторождения
 53

 (Северо-Восток Азии, Россия)

 Тимкин Т.В., Ворошилов В.Г., Юркова М.В., Ziaii М.
- Использование методов машинного обучения «без учителя» 66 для предупреждения прихватов бурильной и обсадной колонн Щербаков Р.Э., Ковалев А.В.
- Токсичные элементы в природных водах севастопольской городской агломерации: распределение, фон, аномалии Новиков Д.А., Черных А.В., Хващевская А.А., Максимова А.А., Деркачев А.С., Дульцев Ф.Ф., Ничкова Л.А., Хоменко Т.Ю., Яхин Т.А.
- Изучение проблемы потери устойчивости поперечного сечения магистральных газопроводов в защитных футлярах под автомобильными и железными дорогами в результате увеличения объема замерзающей воды в межтрубном пространстве Тарасов В.А., Султанмагомедов Т.С., Султанмагомедов С.М.
 - Применение пен и пенопластов для повышения крепи скважин Заливин В.Г.
 - Гидрогеодинамические и гидрогеохимические условия самоочищения вод Обского болота (Западная Сибирь) Савичев О.Г., Ян Хэн, Чжоу Дань
 - Применение статистических методов на основе ГИС для оценки потенциального развития оползней в районе Шапа, Вьетнам Зыонг В.Б., Фоменко И.К., Нгуен Ч.К., Ви Т.Х.Л., Зеркаль О.В., Ву Х.Д.
 - Цифровая модель износа конвективных поверхностей теплообмена пылеугольного котла Тюрина Э.А., Медников А.С.
 - Особенности учёта анизотропии проницаемости верхнеюрских терригенных коллекторов на примере нефтяного пласта Коровин М.О.
 - Новые результаты комплексного литолого-фациального и биостратиграфического изучения Осинского горизонта нижнего кембрия юга Сибирской платформы (скважины Западно-Ярактинские 45, 361) Токарев Д.А., Плюснин А.В., Терлеев А.А.
 - Анализ точности исходных данных, используемых при моделировании рельефа и профиля трассы магистральных трубопроводов Долгополов Д.В., Аврунев Е.И., Мелкий В.А., Веретельник Д.А., Жидиляева Е.В.
 - Резцы *РDС* с вогнутой поверхностью режущей грани Нескоромных В.В., Попова М.С., Комаровский И.А., Баочанг Л.

CONTENTS

- Ecogeochemical characteristics of the Yarly-Amry and the Chibitka rivers, located in the dispersion train of Aktash mercury deposit and its wastes (Gorny Altai) Myagkaya I.N., Saryg-ool B.Yu., Kirichenko I.S., Gustaytis M.A., Lazareva E.V.
- Development of a low-temperature desiliconization method for zircon concentrate after activation with NH₄HF₂ Smorokov A.A., Kantaev A.S., Bryankin D.V., Miklashevich A.A.
- Heat flow density distribution map of the foundation roof in the eastern part of the Tomsk region Isaev V.I., Lobova G., Merenkova A.S., Osipova E.N., Kuzmenkov S.G., Fomin A.N.
- Ore mineralogy of Sokhatiny gold deposit (northeast Asia, Russia) Timkin T.V., Voroshilov V.G., Yurkova M.V., Ziaii M.
- Using unsupervised machine learning algorithm to prevent the sticking of drilling and casing strings Shcherbakov R.E., Kovalev A.V.
- 79 Toxic elements in natural waters of the Sevastopol urban agglomeration: distribution, background, anomalies Novikov D.A., Chernykh A.V., Khvacshevskaya A.A., Maksimova A.A., Derkachev A.S., Dultsev F.F., Nichkova L.A., Sigora G.A., Khomenko T.Yu., Yakhin T.A.
- 93 Study of the problem of stability loss of the main gas pipelines cross-section in protective cases under highways and railway lines as a result of increase in the volume of freezing water in the inter-pipe space Tarasov V.A., Sultanmagomedov T.S., Sultanmagomedov S.M.
- 105 Increasing well fastening by application of curing foams Zalivin V.G.
- 115 Hydrogeodynamic and hydrogeochemical conditions of self-clearance of the Obskoe fen water (Western Siberia) Savichev O.G., Yang Heng, Zhou Dan
- 126 Application of GIS-based bivariate statistical methods for landslide potential assessment in Sapa, Vietnam Duong V.B., Fomenko I.K., Nguyen T.K., Vi Th.L., Zerkal O.V., Vu H.D.
- 141 Digital model of wear of heat exchange convective surfaces of a charcoal boiler Tyurina E.A., Mednikov A.S.
- 151 Features of calculation of upper Jurassic terrigenous reservoirs permeability anisotropy on the example of the oil formation Korovin M.O.
- 157 New results of a comprehensive lithological-facies and biostratigraphic study of the Osinsky horizon of the lower Cambrian in the south of the Siberian platform (West Yarakta wells 45, 361) Tokarev D.A., Plyusnin A.V., Terleev A.A.
- 168 Analysis of accuracy of initial data used in modeling relief and profile of the main pipelines route Dolgopolov D.V., Avrunev E.I., Melkiy V.A., Veretelnik D.A., Zhidilyaeva E.V.
- 181 Concave PDC cutter Neskoromnykh V.V., Popova M.S., Komarovsky I.A., Baochang L.

- Технология разработки неоднородной залежи массивного типа с газонефтяным и водонефтяным контактами Леонтьев Д.С., Ваганов Ю.В., Шаляпин Д.В., Шаляпина А.Д., Жигалковская М.И.
- Regional analysis of the occurrence and spread of engineeringgeological processes in the Republic of Belarus Galkin A.N., Krasovskaya I.A., Pavlovsky A.I., Shershnev O.V.
- Influence of the oxidizer on the formation and purification efficiency of acid gases produced during asphaltene gasification Ermolaev D.V., Daminov A.Z.
 - Optimization of operational control of autonomous photo-diesel power supply system with DC bus Lukutin B.V., Muravyev D.I.
 - Увеличение пропускной способности электрической сети и повышение энергоэффективности действующей электроэнергетической системы нефтегазопромысловых потребителей Латыпов И.С., Сушков В.В., Хмара Г.А., Паршуков А.Н., Хамитов Р.Н.

- 193 Technology for development of a massive type inhomogeneous deposit with gas-oil and water-oil contacts Leontev D.S., Vaganov Yu.V., Shalyapin D.V., Shalyapina A.D., Zhigalkovskaya M.I.
- 202 Региональный анализ возникновения и распространения инженерно-геологических процессов в республике Беларусь Галкин А.Н., Красовская И.А., Павловский А.И., Шершнёв О.В.
- 215 Влияние окислителя на образование и эффективность очистки кислых газов, полученных в процессе газификации асфальтена Ермолаев Д.В., Даминов А.З.
- 224 Оптимизация оперативного управления автономной фото-дизельной системой электроснабжения с шиной постоянного тока Лукутин Б.В., Муравьев Д.И.
- 236 The electric grid capacity increasing and the energy efficiency improving for the existing oil and gas consumers' electric power system Latypov I.S., Sushkov V.V., Khmara G.A., Parshukov A.N., Khamitov R.N.

УДК 504.4.054

ЭКОГЕОХИМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА РЕК ЯРЛЫ-АМРЫ И ЧИБИТКА, РАСПОЛОЖЕННЫХ В ОРЕОЛЕ ДЕЙСТВИЯ АКТАШСКОГО РТУТНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ И ЕГО ОТВАЛОВ (ГОРНЫЙ АЛТАЙ)

Мягкая Ирина Николаевна¹,

i_myagkaya@igm.nsc.ru

Сарыг-оол Багай-оол Юрьевич¹, sarygool@igm.nsc.ru

Кириченко Иван Сергеевич¹,

iskirichenko@igm.nsc.ru

Густайтис Мария Алексеевна¹,

gustaitis@igm.nsc.ru

Лазарева Елена Владимировна¹,

lazareva@igm.nsc.ru

¹ Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Ак. Коптюга, 3.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью развития российских показателей оценки состояния донных отложений и их влияния на живые организмы, а также водоемов в целом. Проблема загрязнения природных вод потенциальнотоксичными элементами актуальна. В России отсутствуют федеральные нормативы, регламентирующие качество донных отложений. Кроме того, объект исследования расположен в популярном туристическом районе Республики Алтай. Знания о состоянии водной экосистемы в этом районе имеет важный информативный характер.

Цель: изучить распределение потенциально-токсичных элементов (Hg, As, Cu, Zn, Ni, Pb, Cd, Sb, Se) в водах и донных отложениях рек Ярлы-Амры и Чибитка и провести оценку экологического состояния донных отложений согласно российским и зарубежным нормативным показателям, а также выявить их токсичность для живых организмов.

Объекты. Река Чибитка и ее приток река Ярлы-Амры (Улаганский район, п.Акташ) расположены в пределах Курайской ртутной зоны и дополнительно подвержены влиянию ореола рассеяния Акташского горно-металлургического предприятия. Его отвалы складированы на берегу р. Ярлы-Амры.

Методы. В водах измерены pH и Eh (методом потенциометрии). Содержание растворенного С_{орг} определялось методом ИКспектроскопии. Анионный состав изучался методом капиллярного электрофореза. Содержания потенциально-токсичных элементов в речных водах определялись методами пламенной и электротермической атомно-абсорбционной спектрометрии, а также методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой на квадрупольном масс-спектрометре; Hg определялась методом «холодного пара» с последующей атомно-абсорбционной спектрометрией. Содержания потенциальнотоксичных элементов в донных отложениях определены методом РФА-СИ, пламенной и электротермической атомноабсорбционной спектрометрии и методом «холодного пара» атомно-абсорбционной спектрометрии. Оценка геохимических особенностей донных отложений проведена на основании расчета степени обогащения донных отложений относительно верхней континентальной коры. Степень загрязнения донных отложений рек и вероятность негативного влияния на живые организмы оценена на основании сравнения содержаний потенциально-токсичных элементов с российскими и зарубежными показателями.

Результаты. За счет попадания отходов Акташского горно-металлургического предприятия в р. Ярлы-Амры происходит увеличение валовых содержаний Си, Сd, Hq и Se в речной воде. Содержания Ni, Zn, As, Pb, Sb преобладают в истоке р. Ярлы-Амры, по сравнению с частью реки, подверженной влиянию отвалов Акташского горно-металлургического предприятия. Вода р. Чибитка выше устья р. Ярлы-Амры (участок 1) содержит Zn и Sb больше, чем на участке 2 (ниже устья), где увеличиваются содержания Ni, Cu, As, Hg. Превышения предельно-допустимых концентраций для водных объектов рыбохозяйственного значения для Zn, Cu и Hg составляют 4,9; 1,7 и 46 раз в водах обеих рек. Донные отложения обеих рек значительно обогащены Hq, As, Ni, Sb, Se по сравнению с верхней континентальной корой. Содержания Hq, As, Sb, Se в отложениях участка 1 р. Чибитка возрастают с удалением от истока. Установлено резкое увеличение Hg и Sb в отложениях участка 2 р. Чибитка. Загрязнение Hg, As, Se и Sb донных осадков обеих рек варьирует от умеренного до очень сильного и даже опасного уровня (согласно показателям допустимых концентраций, фактору загрязнения, суммарной степени загрязнения и показателя качества отложений); загрязнение Ni, Cu, Zn, Pb, Cd – от низкого до умеренного уровня. Донные отложения р. Ярлы-Амры и участка 2 р. Чибитка имеют 50–100 % вероятность риска воздействия на микробиоту (согласно показателям ERL/ERM и TEL/PEL) за счет попадания отходов Акташского горно-металлургического предприятия и высоких содержаний Hg, Ni, As, Cu. Вероятность токсичности донных отложений обеих рек оценивается в 5-30 % и обусловлена содержаниями Zn, Pb и Cd. Среднее значение вероятности биологического воздействия среднего уровня (M-ERM-Q) показывает суммарную токсичность донных отложений рек Чибитка и Ярлы-Амры и варьирует от 21 до 76 % в зависимости от удалённости от отвалов Акташского горно-металлургического предприятия. Отложения р. Чибитка вблизи п. Акташ тоже высокотоксичные: вероятность токсичности снижается до умеренной (21 %) только в 9,2 км от устья р. Ярлы-Амры. Ключевыми факторами загрязнения донных отложений и речных вод являются природный высокий геохимический фон Курайской ртутной зоны с сопутствующей рудной минерализацией и техногенные аномалии, сформировавшиеся в результате деятельности Акташского горно-металлургического предприятия. Изменение состояния и качества водоемов (преимущественно донные отложения) избирательно определяется геохимической спецификой района и зависит от содержания преимущественно Hg и в меньшей степени As, Cu, Ni, Se, Sb. Полученные результаты важны для оценки экологического состояния туристического района региона. В глобальном масштабе они дают возможность проведения сравнительного анализа экологических обстановок с другими ртутными зонами мира с целью выявления особенностей загрязнения и миграции потенциально-токсичных элементов.

Ключевые слова:

Курайская ртутная зона, Акташское ртутное месторождение, ореол рассеяния, речная вода, донные осадки, загрязнение, ртуть, потенциально-токсичные элементы.

Введение

В последние годы всё больше внимания уделяется экологической обстановке в местах проживания и отдыха людей [1, 2]. С каждым годом увеличивается интенсивность антропогенного влияния на природную экосистему. Одной из составляющих негативного влияния является горнодобывающая промышленность (ГДП). В результате ее деятельности формируются масштабные ореолы рассеяния [3], где все компоненты природной экосистемы подвержены техногенной нагрузке и значительно загрязнены разными поллютантами. К негативным последствиям ГДП относятся: пыление отходов [4], загрязнение воздуха Hg [5] и Сu, Zn, Cd, As, Sb [6], загрязнение водоемов [7, 8] и почв [9] разными поллютантами и др. Всё перечисленное в той или иной мере влияет на здоровье человека [10].

Антропогенные ореолы рассеяния от объектов ГДП накладываются на повышенный геохимических фон территорий, на которых располагаются месторождения с первичными и вторичными ореолами рассеяния рудных полей. Последние характеризуются концентрациями химических элементов (включая потенциально токсичные элементы (ПТЭ)), специфичных для месторождения [7, 11, 12], превышающими среднее содержание в земной коре [13]. Влияние газовыделений из недр Земли также приводит к повышенному геохимическому фону как воздуха [14], так и поверхностных вод (термальные источники) [15]. К примеру, в Сибири расположены три ртутные провинции: Алтай-Саянская, Забайкальская и Верхояно-Колымская, входящие в состав среднеазиатских и тихоокеанских океанических глобальных ртутных поясов [16]. Алтай-Саянский регион, где расположен объект нашего исследования – Акташское месторождение (Республика Алтай, Улаганский район, п. Акташ, см. Объект исследования), имеет ареал проявления Hg с ее крупнейшей аккумуляцией [17].

Негативное воздействие ПТЭ на живые организмы происходит при превышении определенной концентрации в компонентах экосистемы, что приводит к токсичности, канцерогенности, биоаккумуляции [18]. После поступления в водную среду ПТЭ, как правило, изменяют физико-химическую форму, рассеиваются и переносятся под воздействием гидродинамических процессов, осаждаются из водной среды, адсорбируются и накапливаются в донных осадках [19]. Аккумулируя загрязняющие вещества, которые поступают в водоём на протяжении продолжительного периода, донные отложения выступают в качестве индикатора экологического состояния территории, представляют собой показатель уровня загрязненности [20, 21].

Проблема загрязнения природных вод ПТЭ до сих пор остается актуальной. В России отсутствуют федеральные нормативы, регламентирующие качество донных отложений [22], существуют лишь региональные нормативы, созданные на основе зарубежных, например, «Нормы и критерии оценки загрязненности донных отложений в водных объектах Санкт-Петербурга». При разработке данного норматива за основу приняты нормы и критерии Нидерландов [23]. Этот норматив регламентирует содержания (Cd, Hg, Cu, Ni, Pb, Zn, As) в донных отложениях в зависимости от концентраций (табл. 1), сравниваемых с допустимыми концентрациями (ДК) по каждому элементу. Выделяются пять классов отложений - от чистых до опасно загрязненных [23]: ДК-0 – чистые (концентрация элемента ниже пограничного значения ДК-І); ДК-І – слабозагрязненные (концентрация элемента варьирует в диапазоне пограничных значений ДК-I-ДК-II); ДК-II - умеренно загрязненные отложения (концентрация элемента варьирует в диапазоне пограничных значений ДК-ІІ–ДК-III); ДК-III – сильно загрязненные отложения (концентрация элемента варьирует в диапазоне пограничных значений ДК-III–ДК-IV); ДК-IV – опасно загрязненные отложения (концентрация элемента превышает пограничное значение ДК-IV).

В зарубежной практике для оценки качества донных отложений водоемов и их влияния на живые организмы используются критерии под общим названием «sediment quality guidelines» (SQG) [24, 25]. Несмотря на то, что SQG не являются окончательными нормативами токсичного влияния донных отложений, их можно использовать как инструмент для оценки опасности загрязненных отложений для водных организмов. Критерии SQG, предлагаемые в разных странах (табл. 1), отличаются друг от друга из-за разных методов расчета пороговых показателей [26].

Первый тип критериев позволяет оценить состояние донных отложений - от незагрязнённых до сильнозагрязнённых осадков. Известны следующие: (1) SQG-1-3 (<SQG1 - незагрязненные осадки; SQG2-SQG3 – умеренно загрязненные осадки; >SQG3 – сильнозагрязненные осадки), согласно Агентству по защите окружающей среды США (US EPA), которые относятся к референтной базе данных, с которой сравниваются содержания в осадках (табл. 1) [27, 28]; (2) коэффициент загрязнения для каждого отдельного элемента (contamination factor (CF)); (3) общая степень загрязнения несколькими ПТЭ (degree of contamination (DC)). Последние два показателя рассчитываются по формулам, приведенным в работах [25, 27, 28], и далее сравниваются с референтными значениями.

Таблица 1. Валовое содержание элементов в донных отложениях (г/т) рек Ярлы-Амры и Чибитка в сравнении с литературными данными и международными показателями состояния/качества донных осадков (ДК-I–ДК-IV, SQG1-3) и их влияние на живые организмы (US EPA, ERM-ERL, TEL-PEL)

 Table 1.
 Elements total content in bottom sediments (ppm) of the Yarly-Amry and the Chibitka Rivers vs. References and Guidelines of the state/quality of bottom sediments (DK-I–DK-IV, SQG1-3) and their impact on living organisms (US EPA, ERM-ERL, TEL-PEL)

Место отбора Номер точки Sampling area Sampling point		Ni	Zn	Cu	As	Pb	Hg	Cd	Se	Sb	
р.Ярлы-Амры выше АГМП ир off АММЕ		Я-1/Үа-1	54,7	53	74	34,5	10,3	0,27	0,1	0,44	1,9
River	ниже АГМП down off AMME	Я-7/Үа-7	56	50,7	30,2	72,7	7,7	34,14	0,043	0,23	6,2
	Участок 1*	ЧБ-1,4,6-8	34,2	56,2	23,4	20,6	10,22	0,08	0,092	0,22	1,4
р. Чибитка	Section 1*	Chb-1,4,6-8	(26,445,2)	(48,567)	(16,134,3)	(4,639)	(7,912)	(0,010,22)	(0,0750,1)	(0,110,34)	(0,682,4)
the Chibitka River	Участок 2*	ЧБ-9-12,14-15	47	51,8	34,1	36,6	8,92	15,8	0,081	0,51	8,25
	Section 2*	Chb-9-12,14-15	(4161)	(43,3102)	(2877)	(13,144)	(6,711,2)	(0,3430,7)	(0,050,11)	(0,30,71)	(2,217)
				Литер	ратурные данные	/References					
Среднее содержание в донных отложениях р. Ярлы-Амры в районе АГМП [34, 35] Average content in bottom sediments of the Yarly-Amry river in the AMME area [34, 35]			7276	106	104	100	2024	368371	20	_	_
UCC [13]			20	71	25	1,5	20	0,05	0,098	0,05	0,2
ДК-І/DК-І [23]			35	140	35	29	85	0,3	0,8	-	-
ДК-II/DK-II [23]			35	480	35	55	530	0,5	2	_	—
ДК-III/DK-III [23]			45	720	90	55	530	1,6	7,5	-	-
ДК-IV/DK-IV [23]			210	720	190	55	530	10	12	_	-
SQG-1 согласн	to US EPA/SQG-1 b	y US EPA [27]	<20	<90	<25	<40	<40	-	-	-	-
SQG-2 согласно US EPA/SQG-2 by US EPA [27]			эгласно US EPA/SQG-2 by US EPA [27] 20–50		25-50	40-60	40-60	_	_	_	_
SQG-3 согласно US EPA/SQG-3 by US EPA [27]			>50	>200	>50	>60	>60	_	>6	_	-
ERL [30]			21	150	34	8,2	47	0,15	1,2	_	2 [29]
ERM [30]			52	410	270	70	218	0,71	9,6	-	25 [29]
TEL [32]			15,9	124	18,7	7,24	30,2	0,13	0,68	_	-
PEL [32]			42,8	271	108,2	41,6	112,2	0,7	4,21	-	-
US EPA [33]			22,7	121	31,6	9,8	35,8	0,18	0,99	2	2

Примечание: * – среднее по участку реки (один сезон отбора); в скобках – разброс значений от минимального до максимального; прочерк – нет данных.

Note: * – average content for the river section (one sampling season); in brackets – range of minimum to maximum; dash – no data.

Второй тип критериев позволяет оценить степень влияния ПТЭ на биоту. Часто используемыми в США критериями этого типа являются ERL (effect range low) и ERM (effect range median) [29-31]. Близкими к ним считаются канадские критерии TEL (threshold effects level) и PEL (probable effects level) [32]. При условии если <ERL/TEL, то вероятность негативного влияния на живые организмы – 5-30 %; >ERL/TEL и <ERM/PEL - 50 % и выше вероятность негативного влияния на живые организмы; >ERM/PEL - 50-100 % вероятность негативного влияния на живые организмы. Для оценки общей потенциальной токсичности донных осадков для биоты рассчитывают коэффициент М-ERM-Q (усредненное ERM) [24, 31]. Не для всех элементов (Sb и Se, в частности) рассчитаны пороговые значения показателей SQG, по этой причине для оценки донных осадков используют референтные значения, указывающие на возможность токсичного влияния. Например, база данных US EPA (табл. 1) [33].

Цель исследования – изучить распределение Hg, As, Cu, Zn, Ni, Pb, Cd, Sb, Se в водах и донных отложениях рек Ярлы-Амры и Чибитка в ореоле действия Акташского ртутного месторождения и его отвалов и провести оценку их экологического состояния согласно российским и зарубежным нормативным показателям, а также оценить токсичность отложений на живых организмов.

Объект исследования

Участок, где расположен объект исследования (Акташское месторождение, Республика Алтай, Улаганский район, п. Акташ), находится на территории, которая входит в состав Курайской аккреционной вендско-раннеордовикской Кузнецкозоны Алтайской островной дуги и состоит из фрагментов системы островных дуг, и представлена тремя единицами, ограниченными разломами в основном с запада на восток: (1) средне-позднекембрийские породы (Ануйско-Чуйский преддуговой прогиб); (2) Курайский аккреционный клин; (3) Уйменско-Лебедская островная дуга (рис. 1) [36]. Территория характеризуется сложной зоной разломов (рис. 1), которая представляет собой серию параллельных дугообразных разрывов, обрамляющих северо-восток Курайской и Чуйской впадин. В пределах зоны глубинного разлома выделяют две ветви разломов: северная ветвь – Кубардинский, и южная ветвь – Курайский разломы [37].

На юго-востоке Ануйско-Чуйской зоны развиты эпитермальные месторождения ртути, которые выделены в Курайскую ртутную зону (КРЗ) [38]. Акташское месторождение является одним из главных представителей месторождений КРЗ. Оно расположено в пределах Ануйско-Чуйский преддугового прогиба, в пределах сочленения Кадринской и Курайской ветвей Курайского глубинного разлома [37], приурочено к зоне полого сброса (Акташского надвига), лежачее крыло сложено известняками с прослоями песчаников (нижний кембрий), висячее крыло – глинистоизвестковыми сланцами и алевролитами (средний кембрий) [39, 40]. Рудная эпитермальная минерализация связана с основным и ультраосновным постгерцинским магматизмом [38]. Рудные тела образуют пласты, гнезда и жилы среди известняков и сланцев; руда представлена брекчированными, а также вкрапленными и пленочными доломитезированными известняками [39], а также претерпевшими окварцевание и аргиллизацию. Минеральный состав руд представлен киноварью, антимонитом, пиритом, блеклыми рудами, реальгаром, кальцитом, доломитом и кварцем [38]. Основные минералы руд – киноварь, антимонит, пирит, блеклые руды (в том числе Hgсодержащие, швацит (тетраэдрит с Нg до 20 %, в составе также присутствуют As и Sb), акташит, реальгар, кальцит, доломит и кварц. Оруденение неравномерное, среднее содержание Нд на месторождении 0,38 мас. %, варьирует от 0,0001 до 10,81 мас. % [40].

Месторождение отрабатывалось Акташским горнометаллургическим предприятием (АГМП) с 1937–1990 гг., располагалось вне населенной местности, в 10 км восточнее п. Акташ на юго-западном макросклоне Курайского хребта (рис. 1). Промышленная зона расположена на высотах 2150-2200 м в верховье р. Ярлы-Амры (левый приток р. Чибитка, бассейн р. Чуя (главный приток р. Катунь)). В 2009 г. Ю.В. Робертусом с соавторами [41] дана информация о том, что технологическим процессом на АГМП был обжиг шихты ртутьсодержащих отходов, смешанных с огарками, в печи при температуре 750-800 °С. Получаемые ртутьсодержащие технологические газы очищались от пыли и конденсировались. Таким образом, за счет процессов возгонки ртути, атмосфера и окружающие компоненты экосистемы значительно загрязнялись токсикантом. В последующем перерабатывались ртутьсодержащие отходы, поступавшие от предприятий Сибирского и Уральского федеральных округов [35]. В 2007 г. предприятие было ликвидировано.

Отвалы АГМП складированы на берегу р. Ярлы-Амры и попадают в реку, смываясь дождями, снеготалыми водами и перемещаясь ветрами. В отходах установлены повышенные и аномально высокие содержания Ni (до 2500 г/т), Li и Hg (>10000 г/т), Sn (до 500 г/т), Си (до 10000 г/т) и др. [34, 42], а в донных отложениях р. Ярлы-Амры и р. Чибитка в 2007 г. установлены значительные содержания тяжелых металлов 1-3 классов токсичности: Hg, As, Sb, Zn, Cu, Ni, Pb и др. [35]. Район бывшего АГМП является территорией с высоким уровнем накопленного экологического ущерба [42]. Поэтому изучаемая в данной работе территория подвержена как природным, так и техногенным факторам загрязнения. К первым факторам можно относить природные аномалии ПТЭ, присущие рудопроявлениям территории, ко вторым развитие горнодобывающей деятельности и последующее хранение отходов обогащения.

Методы исследования

Экспедиционные работы

Опробование рек Ярлы-Амры и Чибитка (рис. 1) проводилось в октябре 2018 г., далее в марте, апреле и июле 2019 г. На его основании рассчитывалось среднее валовое содержание ПТЭ в реках. Опробование р. Ярлы-Амры (протяженность 10 км) проведено на двух участках: первый – это исток реки, расположенный северо-восточнее и юго-восточнее от отвалов АГМП и выше них на 3–4 км (рис. 1; точки Я-1). Второй участок – река на удалении от отвалов АГМП на 5,7 км (рис. 1; точки Я-7). Река Чибитка опробована на протяжении от истока до впадения в р. Чуя. Протяженность опробованного участка составляет 27,4 км. Река разделена на два участка. Участок 1 (протяженность 17,7 км) – река выше устья р. Ярлы-Амры (рис. 1; точки Чб-1, ЧБ-4, ЧБ-6-8). Участок 2 (протяженность 9,7 км) – река ниже устья р. Ярлы-Амры, вплоть до впадения р. Чибитка в р. Чуя (рис. 1, точки Чб-9-12, ЧБ-14-15).



Рис. 1. Геолого-геодинамическая схема Курайской рудной зоны на основе комплекта геологических карт СССР масштаба 1:200000 Серии Алтайская (1962 г.), карт геологического строения и полезных ископаемых Курайской зоны Горного Алтая (Отчет Чуйской партии о результатах геологического доизучения площадей масштаба 1:50000, проведенного в 1983–1991 гг.) и Геолого-геодинамической схемы Курайской зоны юговосточной части Горного Алтая [36] с уточнениями

Fig. 1. Geological and geodynamic scheme of the Kurai ore zone based on a set of geological maps of the USSR at a scale of 1:200000 Altai series (1962), maps of the geological structure and minerals of the Kurai zone of Gorny Altai (Report of the Chuya party on the results of geological additional study of areas at a scale of 1:50000 carried out in 1983–1991) and the geological and geodynamic scheme of the Kurai zone of the southeastern part of Gorny Altai [36] with clarifications

рН и Ећ вод определялись на месте потенциометрическим методом с использованием портативного анализатора Анион 7051 производства «Инфраспак-Аналит» (Россия). Пробы воды были отобраны для определения катионного и анионного состава, Сорг, содержаний ПТЭ. Вода для анионного состава и Сорг отбиралась в полипропиленовые пробирки и не подкислялась. Водные пробы на Нg отбирались в боросиликатные пробирки, для остальных ПТЭ – полипропиленовые пробирки. Подкисление проб проводилось в соотношении 2:500.

Отбор донных отложений проводился в октябре 2018 г. На территории Горного Алтая из-за каменистого дна горных рек донные осадки как таковые опробовались не везде, а только в прибрежной части, зачерпыванием наиболее мягкого материала. В р. Ярлы-Амры были взяты 2 основные точки – выше отвалов АГМП (Я-1) и на удалении от них (Я-7). В р. Чибитка: на участке 1 (У-1) опробованы точки Чб1, 4, 6–8, на участке 2 (У-2) – точки Чб-9-12, 14-15 (рис. 1).

Анализ воды

Содержание растворенного органического углерода определялось методом ИК спектроскопии на анализаторе растворенного углерода ТОС-V_{CSH} производства «Shumadzu» (Япония). Анионный состав изучался методом капиллярного электрофореза на анализаторе Капель 103Р производства «Люмэкс» (Россия). Содержания элементов в пробах воды, отобранных в октябре 2018 г., определялись в аналитическом центре ИГМ СО РАН методами пламенной и электротермической атомно-абсорбционной спектрометрии на спектрометре Solaar M6 производства «Thermo Electron» (США). Содержания элементов в остальных воды определялись пробах методом массспектрометрии с индуктивно-связанной плазмой на квадрупольном масс-спектрометре Agilent 7500 CE производства «Agilent Technologies» (США). Содержания Нд определялись методом «холодного пара» на атомно-абсорбционном анализаторе «PA-915M» с приставкой "PП-92" производства «Люмэкс» (Россия).

Анализ донных отложений

Донные отложения высушивали до воздушносухого состояния при ±25 °C, далее измельчали и гомогенизировали до 200 меш с помощью виброистирателя.

Содержания Cu, Ni, Pb, Zn, As были определены методом рентгенофлуоресцентного анализа с синхротронным излучением (РФА-СИ) на спектрометре ВЭПП-3 с Si(Li) детектором PentaFET производства «Охford Instruments». Содержание Hg определялось методом «холодного пара» на атомно-абсорбционном анализаторе «РА-915М» с приставкой «РП-91» («Люмэкс», Россия). Содержания Cd, Se и Sb определялись методом атомно-абсорбционной спектрометрии с электротермической атомизацией (ЭТА-ААС) на спектрометре Solaar M6 производства «Thermo Electron» (США). Разложение образцов для ЭТА-ААС проводилось смесью минеральных кислот HF-HClO₄-HNO₃-HCl после предварительного обжига при 480 °С.

Расчет показателей геохимических особенностей

и качества донных отложений

Степень обогащения (СО) донных отложениях рек Горного Алтая потенциально-токсичными элементами относительно верхней континентальной коры (upper continental crust – UCC) [13] рассчитана согласно формуле (1).

$$CO = \frac{c_{AO}}{c_{UCC}},$$
(1)

где C_{DO} – концентрация элемента в донном осадке (г/т); C_{UCC} – концентрация элемента в UCC (г/т) [13].

Степень загрязнения донных отложений рек Ярлы-Амры и Чибитка оценена на основании сравнений содержаний элементов с соответствующими референтными значениями ДК-0–ДК-IV (табл. 1) [23], SQG-1-3 [27], а также расчета фактора загрязнения (contamination factor – CF) каждым элементом и суммарной степени загрязнения (degree of contamination – DC) [27, 28].

В качестве фоновой точки были выбраны донные отложения, отобранные на участке 1 р. Чибитка, в части, наиболее близкой к ее истоку (Чб-1, рис. 1), т. е. не подвергающиеся непосредственному техногенному влиянию.

Коэффициент загрязнения (CF) рассчитывался согласно формуле (2) [25, 27, 28]. Для С_{теап} рекомендуется брать среднее содержание элемента по крайней мере из пяти участков отбора проб, которые обеспечивают равномерное покрытие области накопления [27]. В нашей работе коэффициент загрязнения (CF) рассчитывался в каждой из точек опробования. Если CF<1, то осадки имеют низкую степень загрязнения; 1<CF<3 – умеренной степени загрязнение; 3<CF<6 – значительная степень загрязнения; CF>6 – очень высокая степень загрязнения [27, 28].

$$CF = \frac{c_{\text{mean}}}{c_n},\tag{2}$$

где С_{mean} – средняя концентрация элемента; С_n – концентрация элемента в фоновой точке.

Общая степень загрязнения несколькими поллютантами (DC) рассчитана согласно формуле (3) [25, 27, 28]. DC рассчитан для всех проб по всем девяти элементам, следовательно DC<9 – низкая степень загрязнения; 9 < DC < 18 – умеренной степени загрязнение; 18 < DC < 36 – значительная степень загрязнения; DC>36 – очень высокая степень загрязнения. Тогда как для Чб-12 и Чб-15 расчет DC проводился без учета содержаний Cd, Se, Sb (из-за отсутствия данных), следовательно, для оценки качества этих двух проб берется DC<6, 6–12, 12–24 и >24.

$$DC = \sum_{1}^{n} CF, \tag{3}$$

где *п* – количество ПТЭ.

Оценка токсичности донных отложений для живых организмов

Вероятность негативного влияния донных осадков на живые организмы оценивалась на основании референтных показателей ERL/ERM [30], TEL/PEL [32], US EPA [33] (табл. 1) и расчета суммарного показателя по всем элементам M-ERM-Q (среднее значение ERM) [24, 31]. Для Sb, несмотря на его токсичность, такие международные показатели оценки токсичности, как ERL/ERM, TEL/PEL, отсутствуют [26], так же как и для Se [43]. Для оценки токсичности донных отложений по содержаниям Sb и Se был использован норматив US EPA [33].

Коэффициент M-ERM-Q рассчитан согласно формуле (4) для всех проб без учета Se, Sb, а для проб Чб-12 и Чб-15 – без учета Cd, Se, Sb (по причине отсутствия показателя ERM для Se, Sb и содержаний Cd, Se, Sb). Значение M-ERM-Q \leq 0,1 обозначает низкую вероятность возникновения побочных эффектов (9 % вероятность токсичности); 0,11<M-ERM-Q<0,5 – указывают на умеренную вероятность токсичности (21 % вероятность токсичности); 0,51<M-ERM-Q<1,5 – относятся к значительным (49 % вероятность токсичности) и M-ERM-Q>1,51 – высокая вероятность токсичности (76 % вероятность токсичности) [24, 31].

M-ERM-Q =
$$\sum_{1}^{n} \frac{\frac{C_{i}}{ERM_{i}}}{n}$$
, (4)

где C_i – концентрация элемента в точке; ERM_i – критерий ERM для соответствующего элемента; n – количество ПТЭ.

Результаты и обсуждения

Особенности распределения элементов в речной воде

Воды рек Ярлы-Амры и Чибитка слабощелочные/щелочные и ультрапресные/пресные (табл. 2). В воде р. Ярлы-Амры ниже отвалов АГМП увеличиваются содержания Cu, Cd, Hg и Se относительно ее истока. Содержания остальных ПТЭ (Ni, Zn, As, Pb, Sb) в истоке р. Ярлы-Амры выше (табл. 2). Повышенные содержания элементов связаны с близостью месторождений Восточное и Акташское, определяющих локальный фон (рис. 1).

Mech	го отбора pling area	Hомер то Point num	ки ber	pH	Eh, мB/mV	TDS, г/л/g/L	TOC, мг/л mg/L	Ni	Zn	Cu	As	Pb	Hg	Cd	Se	Sb
r- y-	^{2*} АГМП-1	¶ 1/Va	1	8,30	434	0,29	3,3	2,2	20	1,3	4,5	0,77	0,16	0,027	0,16	2,2
arl arl	^{2*} AMME-1	Л-1/ I d-	· (8	8,28,43)	(380461)	(0,180,45)	(2,84,2)	(0,803,5)	(5,149)	(1,21,4)	(0,2113)	(0,541,2)	(0,060,23)	(0,0080,038)	(0,100,22)	(0,265,7)
AM AM Vur	^{2*} АГМП-2	a 7 N.	7	8,29	351	0,21	3,8	0,66	20	1,4	0,78	0,48	0,29	0,029	0,41	0,75
d dr a	^{2*} AMME	л-// та-	(8,	,228,35)	(315387)	(0,160,24)	(2,16,1)	(0,490,82)	(0,45 54)	(1,31,5)	(0,490,93)	(0,190,93)	(0,080,63)	(0,0180,038)	(0,360,45)	(0,421,1)
ca ka	3**** 1 3**** 1	ЧБ-1, 4, 6	-8	8,01	456	0,18	5,1	0,79	49	1,4	0,56	0,38	0,08	0,025	0,30	1,0
ытн bitl	y-1 0-1	Chb-1, 4,	5-8 (7,	,178,38)	(313558)	(0,050,67)	(1,78,1)	(0,582,0)	(3,2445)	(1,12,2)	(0,230,78)	(0,101,2)	(0,010,23)	(0,0100,037)	(0,130,63)	(0,074,3)
Chi Ziv	3*** • 3*** •	ЧБ-9–12, 14	4.15	8.16	412	0.19	3.9	1.05	9.0	1.7	0.70	0.38	0.16	0.020	0.28	0.51
he of I	⁵ y-2 ⁵ U-2	Chb-9-12, 1	4,15 (7	7,48,4)	(304543)	(0,070,28)	(1,76,2)	(0,742,0)	(1,642)	(0,686,4)	(0,31,1)	(0,070,85)	(0,030,5)	(0,0030,043)	(0,040,7)	(0,172,5)
1 1			· · · · ·	() ,)	· /	()))	Л	итературные	анные/Refer	ence	()))	()))	()))	()))	()))	()))
							511	filleput yptible 2		enee						
^{4*} ПДК-1/ ⁴	*MPC-1 [44]		e	6,58,5	_	-	_	10	10	1	50	6	0,01	5	2	-
5*US EPA-	-1 [45]			6,99	-	-	-	52470	120	_	150340	2,565	0,771,4	0,721,8	-	-
^{6*} ПДК-2/ ⁶	*MPC-2 [46, 47]	e	6,58,5	-	1	-	20	1000	1000	10	10	0,5	1	10	5
						^{8*} Не опасно										
^{7*} DOD ^{/7*} WHO (40)		6 5 9 5		1.2.[6]		70	^{8*} Not dan-	2000	10	10	6	2	40	20		
BUS/ W	HO [48]		C	0,38,3	_	1,2 [0]	_	70	gerous[48];	2000	10	10	0	3	40	20
							5000 [49]									
9*US EPA-	-2 [50]		e	6,58,5			-	15	5000	1300	10	15	2	5	50	6
E A	Выше АГМП на	1 км Я*-	-1-4					0.14	0.04	0.0027	0.0016	0.0006	0.025	0.00001		
Tan In I	km up off AMI	ME Ya*	-1-4	-	_	_	_	0,14	0,04	0,0037	0,0016	0,0006	0,035	0,00001	_	_
- P-		₫ * 5	Vo* 5					0.065	0.02	0.005	0.000	0.0001	0.077	0.00001		
arly vei		л -5	14 -5	_				0,005	0,02	0,005	0,007	0,0001	0,077	0,00001	_	_
2.¥ 3. F	Іиже АГМП на	1 км Я*	-6-7	_	_	_	_	0.034	0.022	0.0055	0.0011	0.0006	0.045	0.00001	_	_
$\underline{\bullet}^{-2}$ 1 km down off AMME Ya*-6-7		-6-7					0,054	0,022	0,0055	0,0011	0,0000	0,045	0,00001			
р. Актру/the Aktru river [52] 7,178,27		_	0,050,16	-	-	5,4 21,1	1,37	-	0,54,9	0,005 1,41	0,1	-	-			
Телецкое озеро		_	_	_	0.32	1.12	1 3/	0.34	0.09	_	0.007	0.056	_			
Teletskoe lake [53]					0,52	1.12	1.54	0,54	0,07		0,007	0,050	_			
Фоновые содержания не загрязнённых																
пресных вод планеты			_	_	_	_	0.5	0.1520	1.57	1.72	0.111	0.07	0.010.2	0.02 20	0.041	
Background contents of uncontaminated fresh		fresh					0,0	0,10	1,0111	1,72	0,111	0,01	0,010,2	0,0220	0,01	
waters of planet [54, 55]																
Озеро Бай	ікал			-	_	_	-	0,10,5	0.44.3	0.21	0,30,5	0,030,06	0,00010,0014	0,0010,01	0,030,06	0,030,2
Baikal lake [56]							,,-			,,-	,,	,,.	,,.	,,	,,	

Таблица 2. Валовое содержание элементов в воде (мкг/л) рек Ярлы-Амры и Чибитка в сравнении с литературными данными

Table 2. Elements total content in water $(\mu g/L)$ of the Yarly-Amry and the Chibitka Rivers vs. the Reference

Примечание: прочерк – нет данных; bold – значения, превышающие ПДК-1; в скобках – разброс значений от минимального до максимального; АГМП-1 – выше отвалов АГМП; АГМП-2 – ниже отвалов АГМП; 2* – среднее в точке за три сезона отбора; У-1 – участок 1 на р. Чибитка; У-2 – участок 1 на р. Чибитка; 3* – взято среднее по участку реки за три сезона отбора; 4* – ПДК водных объектов рыбохозяйственного значения (ПДК-1); 5* – Критерий для пресноводной водной флоры США (US EPA); 6* – ПДК водных объектов питьевого, хозяйственно-бытового и рекреационного водопользования (ПДК-2); 7* – Международный показатель питьевых вод ВОЗ; 8* – не представляет опасности для здоровья на уровнях, обнаруженных в питьевой воде; 9* – Максимальная концентрация в питьевых вод США (US EPA-2); 10* – среднее в р. Ярлы-Амры, лето 2006.

Note: dash – no data; bold – values exceeding MPC-1; in brackets – range from minimum to maximum; AMME-1 – up off AMME; AMME-2 – down off AMME; 2* – average at a point for three sampling seasons; U-1 and U-2 – section 1 and 2 on the Chibitka river; 3* – average for the river section for three sampling seasons; U-1 and U-2 – section 1 and 2 on the Chibitka river; 3* – average for the river section for three sampling seasons; 4* – MPC for fishery water bodies (MPC-1); 5* – USA National Recommended Aquatic Life Criteria for freshwater (US EPA); 6* – MPC of water bodies for drinking, household and recreational water use (MPC-2); 7* – WHO International Drinking Water Index; 8* – does not pose a health hazard at levels found in drinking water; 9* – US Maximum Concentration in Drinking Waters (US EPA-2); 10* – average in the Yarly-Amry River, summer 2006.

Речные воды участка 1 р. Чибитка имеют более высокие содержания Zn и Sb, чем на участке 2, где выше содержания Ni, Cu, As, Hg; содержания Cd и Pb на обоих участках близки (табл. 2, У-1). Содержания рассматриваемых элементов в воде р. Чибитка ниже р. Ярлы-Амры (участок 2) не превышают значений, характерных для вод р. Ярлы-Амры, за исключением Cu (табл. 2, У-2).

В обеих реках содержания Zn, Cu и Hg превышают ПДК-1 для водных объектов рыбохозяйственного значения [44] в 4,9, 1,7 и 46 раз соответственно (табл. 2). Согласно критериям Агентства по защите окружающей среды США [45], ПТЭ в воде рек Ярлы-Амры и Чибитка не представляют значительного риска для большинства видов водных организмов (табл. 2). Поскольку возможно использование воды горных рек в качестве питьевой, содержания ПТЭ в реках Ярлы-Амры и Чибитка сопоставлены с российскими (ПДК-2; табл. 2) [46, 47] и зарубежными [48-50] (BO3, US EPA; табл. 2) нормативами питьевых вод. Содержания исследуемых ПТЭ в водах обеих рек не превышают как российских, так и зарубежных нормативов (табл. 2). В 2017 г. ВОЗ увеличены пороговые значения Hg c 1 до 6 мкг/л [48, 49].

В работе [35] оценено общее содержание Нд в водах рек Ярлы-Амры и Чибитка. В водах р. Ярлы-Амры в районе истока содержания в весенний период 2007 г. варьировали от 0,08 до 0,5 мкг/л, в районе АГМП составляли 0,42 мкг/л, на удалении от АГМП – 0,88-1,05 мкг/л; в воде р. Чибитка содержания были намного ниже – 0,06 мкг/л. В этой же работе [35] представлены данные о содержаниях Cd, As, Cu, Ni, Pb, Zn, Hg в летний период 2006 г. в воде р. Ярлы-Амры в районе АГМП (выше и ниже на 1 км от АГМП; табл. 2). Наши исследования (табл. 2) показывают, что содержания Hg в p. Ярлы-Амры в весенний период сильно не изменились, и только на участке 2 р. Чибитка содержания Hg увеличились до 0,16 мкг/л. Однако по сравнению с летними данными за 2006 г. (табл. 2) нами установлены более высокие содержания всех рассматриваемых ПТЭ в водах р. Ярлы-Амры в районе АГМП. В 2010 г. Робертус с соавторами [51] установили, что в водах р. Ярлы-Амры в районе АГМП (0,5–5 км) содержания ПТЭ составляли (мкг/л): Cd – 1–7,4; Cu – 4,9–16,1; Pb – 1–9,6; Zn 3,2– 6,2; Hg 0,14-0,42, что выше, чем в более ранних исследованиях [35]. Наши результаты указывают на то, что содержания Нд в незначительной мере снизились, тогда как содержания Cd, Cu, Pb существенно снизились, а Zn значительно увеличились, в сравнении с данными [51].

В качестве основной причины значительной разницы в содержаниях можно назвать сезонные колебания и разные методы анализа.

Содержания изучаемых ПТЭ в водах рек Ярлы-Амры и Чибитка сопоставлены с содержаниями удаленных от месторождений водотоков и водоёмов (табл. 2). Содержания Zn, Cu, Pb и Hg в р. Ярлы-Амры выше, чем в р. Актру (Кош-Агаченский район, северный склон Северо-Чуйского хребта) [52]. Разница достигает Zn – 3,2 раза, Cu и Pb – 1,2–1,3 раза, Нg – 36–92 раза; максимальная разница установлена вблизи АГМП. Содержания этих элементов в р. Чибитка выше, чем в р. Актру: Zn в – 1,6–9 раз, Cu – 1,3 раза, Hg – 14–32 раза. В Телецком озере [53] содержания Ni, Zn, Cu, As, Pb, Se намного ниже, чем в водах рек Ярлы-Амры и Чибитка (табл. 2). В водах рек Ярлы-Амры и Чибитка содержания Ni, Zn, Hg, Sb выше, чем в большинстве не загрязнённых пресных водах планеты (табл. 2) [54, 55]. По сравнению с водами оз. Байкал, которые считаются эталонными по чистоте [56], воды в р. Ярлы-Амры обогащены Ni в 16,3 раз, Zn – 42 раза, Cu – 7,5 раз, As – 14 раз, Pb – 21,6 раз, Hg – 4600 раз, Cd – 38 раз, Sb – 32 раза, Se – 12 раз.

Мы сравнили общие содержания Нд в речных водах со значениями в других ртутных провинциях мира [7, 11, 12, 57]. По сравнению со значениями в р. Палья (до 1,4 мкг/л; провинция Монте-Амиата, Италия) [7] содержания Hg в воде рек Ярлы-Амры (0,059–1,82 мкг/л) и Чибитка (0,005-0,50 мкг/л) находятся на одном уровне. Рудный район Монте-Амиата является частью так называемого «ртутного пояса» в бассейне Средиземного моря, который включает также провинции Альмаден (Испания), Идрия (Словения) и Меджерда (Тунис). Горнодобывающая деятельность в районе Монте-Амиата осуществлялась до 1980 г., а большая часть шахт располагалась в водосборном бассейне р. Палья (в истоках ее притоков), которая впадает в р. Тибр (крупнейшая река Центральной Италии) [58]. По сравнению со значениями общего содержания Hg в реках Идрия и Соча (0,00076-0,041 мкг/л - в удаленных местах от действия Нд шахт; 0,049-0,71 мкг/л – вблизи; провинция Идрия; горнодобывающая деятельность до 1995 г.) [12, 57] содержания Нд в реках Ярлы-Амры и Чибитка также на близком уровне. Загрязнение рек Идрия и Соча ртутью вызвано сбросом остатков обжига руды и отходов в русло реки, которые затем переносились вниз по течению во время наводнений и загрязняли аллювиальные и морские отложения [57]. Содержание Нд в водах р. Ярлы-Амры и р. Чибитка ниже, чем в р. Вальдеасогес (0,11–20,3 мкг/л; провинция Альмаден), воды которой относятся к слабощелочным. Горнодобывающая деятельность на районе Альмаден прекращена в 2002 г., а низкие концентрации Нд в воде могут объясняться высокой летучестью, ее склонностью к сорбции глинами, гидроксидами Fe и Мп и органическими веществами [11].

Содержания элементов в донных отложениях рек

Содержания Нg в донных отложениях р. Чибитка на участке 1 увеличиваются по мере удаления от истока (рис. 2, табл. 1). В отложениях р. Чибитка ниже устья р. Ярлы-Амры (участок 2) содержание Hg резко увеличивается (в 200 раз) и в среднем составляет 15,8 г/т. По мере удаления от устья р. Ярлы-Амры в отложениях р. Чибитка (участок 2) содержания Hg остаются высокими на протяжении 7 км. На расстоянии 9,7 км от устья р. Ярлы-Амры (рис. 2, Чб-15) содержание Hg снижается до уровня участка 1 (рис. 2). В р. Ярлы-Амры содержания Hg в донных отложениях выше, чем в р. Чибитка, и в среднем составляют 17,2 г/т. В донном осадке истока р. Ярлы-Амры содержание Нg значительное – 0,27 г/т, что вызвано близостью месторождений и рудопроявлений Hg (рис. 2, табл. 1).

Не установлено чётких закономерностей распределения As в донных отложениях участка 1 реки Чибитка (рис. 2, табл. 1), среднее содержание элемента в донных отложениях участка составляет 20,6 г/т. Ниже устья р. Ярлы-Амры, на участке 2, содержания As возрастают в среднем до 36,6 г/т. Содержания сохраняются высокими на расстоянии 7 км от устья р. Ярлы-Амры (рис. 2, Чб-15). Среднее содержание As в отложениях р. Ярлы-Амры (53,6 г/т) значительно выше, чем в р. Чибитка. В р. Ярлы-Амры резко увеличивается содержание As около отходов АГМП (рис. 2, табл. 1).

Закономерности распределения Си подобны Hg и As: на участке 1 р. Чибитка содержания возрастают

от истока (с 19,2 до 34,3 г/т, среднее 23,4 г/т); резко увеличиваются содержания на участке 2 (среднее 34,1 г/т). На протяжении 7,3 км участка 2 содержание Си в донных отложениях сохраняется относительно постоянным, а ниже увеличивается с 40,3 до 77 г/т (рис. 2, Чб-15). В донных отложениях р. Ярлы-Амры в районе истока содержание Си выше, чем в части реки, расположенной ниже АГМП. Среднее содержание Си (52,1 г/т) в донных отложениях выше, чем в р. Чибитка (28,7 г/т).

В донных отложениях участка 1 р. Чибитка Zn распределен равномерно (табл. 1, рис. 2). Близкие содержания установлены на участке 2 на протяжении 7,3 км, а далее содержание увеличивается до 102 г/т. В р. Ярлы-Амры среднее по нашим данным составляет 51,9 г/т, но другими исследователями выявлены содержания >100 г/т (рис. 2).



Рис. 2. Распределение валовых содержаний элементов в донных осадках рек Ярлы-Амры и Чибитка (г/т) в сравнении с международными показателями состояния/качества донных осадков (ДК-0/ДК-IV, SQG-1/SQG-3) и их влияния на живые организмы (US EPA, ERM-ERL, TEL-PEL) на фоне среднего содержания элементов в донных отложениях реки Ярлы-Амры в районе АГМП (точка Я*) по данным [35]; по оси X – точки опробования, которые соответствуют схеме отбора вод, рис. 1; для Hg и Cd – логарифмические шкалы

Fig. 2. Distribution of total contents of elements in bottom sediments of the Yarly-Amry and the Chibitka rivers (ppm) in comparison with international indicators of the state/quality of bottom sediments (DK-0/DK-IV, SQG-1/SQG-3) and their influence on living organisms (US EPA, ERM-ERL, TEL-PEL) against the background of the average content of elements in bottom sediments of the Yarly-Amry river in the area of the AMMP (point «Я»*) according to [35]; the X-axis – sampling points that correspond to the water sampling scheme, Fig. 1; for Hg and Cd – logarithmic scales

В донных отложениях участка 1 р. Чибитка Ni распределён неравномерно, среднее содержание – 34,2 г/т (рис. 2, табл. 1). На участке 2 среднее содержание элемента выше 47 г/т. В донных отложениях р. Ярлы-Амры в среднем содержания Ni выше, чем в отложениях р. Чибитка, – 55,4 г/т (рис. 2).

Содержания Рb в донных осадках двух рек имеют близкие значения и в среднем не превышают 10 г/т.

Его содержания, незначительно превышающие 10 г/т, наблюдаются вначале участка 1 и 2 р. Чибитка (рис. 2, табл. 1). Близкое к равномерному распределение установлено также для Cd (рис. 2, табл. 1).

Содержания Sb в донных отложениях участка 1 р. Чибитка возрастает от истока с 0,68 до 2,4 г/т и резко увеличивается ниже устья р. Ярлы-Амры почти до 6,2 г/т (рис. 2). На участке 2, в 5 км от устья р. Ярлы-Амры, содержания достигают 17 г/т. У истока р. Ярлы-Амры содержания элемента в отложениях низкие, значительно обогащаются Sb от отходов АГМП (табл. 1, рис. 2).

В донных отложениях участка 1 р. Чибитка содержание Se увеличивается с удалением от истока (рис. 2). Отложения участка 2 содержат больше Se в 2,3 раза, чем отложения участка 1 (табл. 1). В донных осадках р. Ярлы-Амры содержания Se в районе истока выше, чем рядом с АГМП (табл. 1).

Значения среднего содержания ПТЭ в отложениях р. Ярлы-Амры в районе АГМП, по данным [34, 35], существенно выше, чем значения, полученные нами (табл. 1, рис. 2). Особенно выделяются высокие концентрации Hg и Cd (рис. 2). Различия заключаются в том, что в ранних исследованиях отложения отбирались в основном вблизи АГМП. Итак, распределение по течению реки очень различается для каждого отдельного элемента.

Геохимические особенности донных отложений

Донные отложения участка 1 р. Чибитка обогащены относительно верхней континентальной коры (UCC) [13] в различной степени (в порядке уменьшения): As>Sb>Se>Ni (рис. 3). Для этих элементов LogKK составляет 0,49–1,4 для As, 0,53–1,08 для Sb, 0,34–0,83 для Se и 0,12–0,35 для Ni. Содержания Cu выше, чем UCC только в 16,7 км от истока (Чб-8, рис. 3), Hg – в 13,9 км от истока (рис. 3, Чб-7). Вероятно влияние на донные отложения близлежащего ртутного рудопроявления Чейбеккельское II (рис. 1).



Рис. 3. Степень обогащения донных отложений рек Горного Алтая потенциально-токсичными элементами относительно верхней континентальной коры (UCC) [13] на фоне среднего содержания элементов в донных отложениях реки Ярлы-Амры в районе АГМП (точка Я*) по данным [35] (обозначены звездочкой); по оси X – точки опробования, которые соответствуют схеме отбора вод, рис. 1

Fig. 3. Degree of enrichment of bottom sediments of the Gorny Altai rivers with potentially toxic elements relative to the upper continental crust (UCC) [13] against the background of the average content of elements in bottom sediments of the Yarly-Amry river in the AMMP area (point «Я»*) according to [35] (marked with an asterisk); the X-axis – sampling points that correspond to the water sampling scheme, Fig. 1

Донные отложения участка 2 р. Чибитка более значительно обогащены элементами относительно UCC, чем участок 1: Hg>Sb>As>Se>Ni>Cu (рис. 3). Обогащение может быть связано с депонированием в осадок взвешенного вещества, переносимого водами р. Ярлы-Амры (отходы АГМП). Во взвеси установлены соединения Hg с S с примесью Ni и Cu [59]. В отложениях участка 2 р. Чибитка, на расстоянии 9,7 км от устья р. Ярлы-Амры, наблюдается резкое снижение содержаний Hg, As, Ni и незначительно увеличивается Cu (рис. 3, Чб-15). Содержания Cd, Pb и Zn в донных отложениях р. Чибитка на обеих исследованных участках ниже, чем в UCC (рис. 3).

В истоке р. Ярлы-Амры донные отложения обогащены Ni, Cu, Hg, Se, Sb, As относительно UCC сильнее, чем отложения в истоке р. Чибитка (рис. 3), что связно с непосредственной близостью ореола ртутной минерализации и месторождений Восточное и Акташское. Степень обогащения донных отложений истока р. Ярлы-Амры относительно UCC снижается в ряду As>Sb>Hg>Cu>Ni>Cd. В результате антропогенного загрязнения от АГМП в донных отложениях р. Ярлы-Амры содержания Hg, As и Cd увеличиваются, на порядки превышая содержания в UCC (рис. 3, Я-7). На нормированных графиках хорошо заметно обогащение донных отложений р. Ярлы-Амры Ni, Cu и даже Zn и Pb (рис. 3). Степень обогащения донных отложений относительно UCC снижается в ряду Hg>As>Sb>Se>Ni>Cu>Zn>Pb. Коэффициент обогащения Hg, Cd, Zn, Pb относительно UCC в донных отложениях реки Ярлы-Амры в районе АГМП (выше и ниже него на 1 км), по данным [35], еще больше выделяется на нормированном графике на фоне данных, полученных нами (рис. 3).

Таким образом, видно, что донные отложения рек Ярлы-Амры и Чибитка в наибольшей степени обогащены Hg относительно UCC. Это обусловлено природным фактором, расположением рек в пределах КРЗ, и усиливается антропогенным влиянием за счет отвалов АГМП. Содержания Hg в донных отложениях р. Ярлы-Амры (0,27–34,1 г/т) и Чибитка (0,01–30,7 г/т) не столь высоки, как в провинции Идрия (0,59–1970 г/т, среднее 254 г/т; Словения) и Альмаден (5,53–1005 г/т вблизи действия; 0,53–0,57 г/т – не подверженные влиянию рудного вещества; Испания), но выше, чем в провинции Монте-Амиата (0,26–15 г/т; Италия) [7, 11, 12, 57]. Для провинции Монте-Амиата (Италия) обогащение ртутью имеет «геогенную» природу [7]. Содержания в донных отложениях рек Ярлы-Амры и Чибитка выше в 2 раза, что также позволяет говорить о «геогенной» Нg для изучаемой части КРЗ.

Оценка состояния донных отложений

На протяжении 13,9 км участка 1 р. Чибитка (рис. 4, Чб-2-Чб-7) донные отложения характеризуются как значительно загрязненные (3<CF<6) ртутью, степень загрязнения отложений увеличивается до сильно загрязненных (CF>6; Чб-8, рис. 4). При этом значение CF в этом месте сопоставимо со значениями в осадке истока р. Ярлы-Амры (Я-1, рис. 4). Донные отложения р. Ярлы-Амры в удалении 5,7 км от АГМП еще сильней загрязнены Hg (Я-7, рис. 4), что приводит к обогащению донного осадка участка 2 р. Чибитка, где CF>6 на всем протяжении реки от устья р. Ярлы-Амры (Чб-9-Чб-15, рис. 4). Согласно российским допустимым концентрациям (ДК-0-ДК-IV; табл. 1, рис. 2) донные осадки участка 1 р. Чибитка и отложения р. Ярлы-Амры в районе ее истока можно рассматривать как чистые (класс ДК-0; рис. 2), тогда как отложения реки Ярлы-Амры на удалении от отвалов АГМП и отложения участка 2 р. Чибитка характеризуются как сильно (класс ДК-III) и опасно загрязненные (класс ДК-IV).

Загрязнение мышьяком донных отложений участка 1 р. Чибитка в основном соответствует умеренно-(1<CF<3) и значительно- (3<CF<6) загрязнённым осадкам (рис. 4), что сопоставляется с критерием >SQG-3 (рис. 2). Содержание As в донном осадке в р. Ярлы-Амры превышает показатели CF>6 и >SQG-3, что отвечает очень сильному и даже опасному загрязнению мышьяком (рис. 2, 5), влияя в свою очередь на уровень загрязнения участка 2 р. Чибитка (CF>6, >SQG-3). Однако возникают противоречия с российским референтным значением допустимых концентраций по As (табл. 1), согласно которому класс загрязнения осадков рек Чибитка и Ярлы-Амры не превышает показатель ДК-II, что отвечает умеренно загрязненным отложениям.

Загрязнение *медью* донных осадков участка 1 р. Чибитка умеренное (1<CF<3, рис. 4) и практически не меняется на всем его протяжении, как и на участке 2 р. Чибитка. Исключение составляет участок нижнего течения р. Чибитка на удалении 9,2 км от устья р. Ярлы-Амры, где осадок считается значительно загрязненным (3<CF<6, Чб-15; рис. 4); с чем это связано пока не установлено. Донные отложения р. Ярлы-Амры имеют CF, отвечающий осадкам от умереннодо сильнозагрязненных. Представленная оценка загрязнения медью донных отложений обеих рек (рис. 4) согласуется с оценкой их состояния согласно показателям допустимых концентраций и SQG-1-3 (рис. 2).



Рис. 4. Коэффициенты загрязнения (CF) для элементов в донных отложениях рек Ярлы-Амры и Чибитка на фоне среднего содержания элементов в донных отложениях реки Ярлы-Амры в районе АГМП (точка Я*) по данным [35]. По оси X – точки опробования, которые соответствуют схеме отбора вод, рис. 1

Fig. 4. Contamination factors (CF) for elements in the bottom sediments of the Yarly-Amry and the Chibitka rivers against the background of the average content of elements in the bottom sediments of the Yarly-Amry river in the AMMP area (point «Я»*) according to [35]; the X axis – sampling points that correspond to Fig. 1

Согласно российским и зарубежным нормативам для Zn, Pb и Cd донные отложения обоих рек характеризуются как незагрязненные отложения (класс ДК-0 и <SQG-1, рис. 2) или отложения с очень низкой степенью загрязнения (CF<1, рис. 4).

Загрязнение никелем донных отложений участка 1 р. Чибитка в основном низкого уровня (CF<1, рис. 4), но наблюдается несколько точек с умеренным уровнем загрязнения (1<CF<3; рис. 4). Осадки участка 2 р. Чибитка и осадки р. Ярлы-Амры характеризуются как умеренно загрязненные (рис. 4). Содержания Ni в отложениях обоих участков р. Чибитка отвечают референтным значениям <SQG-3 (рис. 2), что также характеризует их как умеренно загрязненные; согласно допустимым концентрациям они местами достигают класса ДК-III, что указывает на сильное загрязнение. Отложения р. Ярлы-Амры оцениваются к сильнозагрязненные, т. к. содержание Ni>SQG-3 и ДК-III.

Интенсивность загрязнения Sb и Se в донных отложениях участка 1 р. Чибитка увеличивается с удалением от истока реки (аналогично Hg), изменяясь от умеренной (1<CF<3) до значительной степени загрязнения (3<CF<6). Загрязнение Sb отложений реки Ярлы-Амры меняется от умеренного до очень высокого (CF>6) под влиянием отходов АГМП, а Se снижается со значительного до умеренного уровня (рис. 4). На участке 2 р. Чибитка донные отложения очень сильно загрязнены Sb (CF>6) и значительно Se (3<CF<6). Для данных элементов отсутствуют показатели загрязнения SQG-1-3 и допустимые концентрации (табл. 1).

Таким образом, благодаря достаточно высокому геохимическому фону и антропогенному влиянию (рис. 3), загрязнение токсичными элементами (Hg, As, Se, Sb) донных осадков исследованных водных объектов варьирует от умеренно до очень сильно загрязненных и даже опасных. Загрязнение Ni, Cu, Zn, Pb, Cd донных отложений описывается низкой и умеренной степенью загрязнения. Среди всех элементов выделяется Hg, для которой характерны наибольшие значения CF. Поэтому с большой вероятностью ее содержания вносят определяющий вклад в общую степень загрязнения (DC) донных отложений (рис. 5, *a*). В отложениях р. Ярлы-Амры и участка 2 р. Чибитка общая степень загрязнения высока (DC>24-36). Отложения участка 1 р. Чибитка описываются показателем 12-14<DC<24-36 как значительно загрязненные (рис. 5, *a*).

Коэффициенты загрязнения для Hg, As, Cu, Ni, Cd в донных отложениях реки Ярлы-Амры в районе АГМП (выше и ниже на 1 км), согласно данным [35], имеют наивысшую степень загрязнения по сравнению с нашими данными (рис. 2, 5). Общая степень их загрязнения также определяется в основном Hg (рис. 5, *a*).

Оценка вероятности негативного влияния донных отложений на живые организмы

Донные осадки участка 1 р. Чибитка по большей части элементов (Hg, Zn, Pb, Cd) токсичны с 5–30 % вероятностью для живых организмов (рис. 2). Для Hg увеличивается вероятность негативного влияния до 50 % в 1 км от устья р. Ярлы-Амры (рис. 2, Чб-8). Содержания As и Ni превышают уровень >ERL/TEL, а Си>TEL, но их содержания не выше уровня <ERM/PEL, что отвечает 50 % вероятности (рис. 2). Согласно US EPA существует риск токсичности осадков из-за содержаний As и Ni, а содержание остальных элементов (Hg, Cu, Zn, Pb, Cd, Sb и Se) не выше референтных значений US EPA (рис. 2). Среднее значение вероятности биологического воздействия среднего уровня M-ERM-Q соответствует интервалу 0,11–0,5, что позволяет считать осадки этой части реки токсичными с вероятностью в 21 % (рис. 5, δ).

Вероятность негативного влияния на живые организмы донных отложений участка 2 р. Чибитка от 50 до 100 % и обусловлена содержаниями Hg, Ni, As, Cu (рис. 2), которые превышают референтные значения US EPA. Только содержания Zn, Pb и Cd не превышают уровень <ERL/TEL и нормативов US EPA (как Sb и Se), но вероятность влияния донных осадков на живые организмы составляет 5-30 % (рис. 2). Согласно значениям M-ERM-Q на данном участке реки донные отложения имеют значительную (49 %) и высокую (76 %) вероятность токсического воздействия на живые организмы. В том числе и осадки водотоков вблизи поселка Акташ характеризуются как токсичные (Чб-10-Чб-11, рис. 5, б), только в 9,2 км от устья р. Ярлы-Амры вероятность токсичности донных отложений снижается до умеренной (21 %), согласно M-ERM-Q, значения которого попадают в диапазон 0,11-0,5 (Чб-15, рис. 5, б).

Донные отложения р. Ярлы-Амры в районе истока могут оказывать влияние на живые организмы с вероятностью 50 % из-за превышений содержаний Hg, As и Cu уровня >ERL/TEL, который <ERM/PEL (рис. 2); вероятность влияния Ni в донных отложениях составляет 50-100 % (уровень >ERM/PEL). Наименьшая вероятность влияния на живые организмы (5-30 %) установлена по Zn, Pb и Cd, так как их содержания не превышают уровень <ERL/TEL (рис. 2). Токсичного влияния донных отложений на биоту из-за содержаний Sb и Se, а также Zn, Pb и Cd, согласно референтным значениям US EPA, не установлено, в отличие от других изучаемых элементов (Hg, As, Cu, Ni; рис. 2). Суммарный показатель влияния отложений на биоту в этом районе занимает диапазон 0,11<M-ERM-Q<0,5 (рис. 5, δ), указывая на умеренную вероятность токсичного влияния (21 %).

В донных отложениях реки Ярлы-Амры в районе АГМП (выше и ниже на 1 км), согласно [35], содержания Hg, As, Ni, Cd, Cu превышают уровень> ERM/PEL (рис. 2), указывая на 50–100 % вероятность негативного влияния на живые организмы. Для Zn и Pb существует 5–30 % вероятность влияния. Суммарный показатель влияния на биоту (M-ERM-Q) самый высокий из всех точек, с вероятностью токсичности >76 % (рис. 5, δ).

В донных отложениях на участке р. Ярлы-Амры, в удалении на 5,7 км от отвалов АГМП, вероятность токсичного влияния Hg, As и Ni тоже высока, как и вблизи АГМП, и составляет 50–100 % из-за значительного увеличения их содержаний (уровень > ERM/PEL, рис. 2). Вероятность токсичности осадков, вызываемой влиянием содержаний Cu, Zn, Pb и Cd,

составляет 5–30 % (уровень <ERL/TEL, рис. 2). Согласно US EPA существует риск токсичности осадков для живых организмов из-за содержаний Hg, As и Ni, а содержания остальных элементов (Cu, Zn, Pb, Cd, Sb и Se) не превышают этот норматив (рис. 2). В целом осадки в этой части реки имеют высокую (76 %) вероятность токсичности (M-ERM-Q>1,51, рис. 5, δ), что выше в 21 раз по сравнению с отложениями, отобранными в реке выше АГМП, но в 10,5 раз ниже, чем для отложений вблизи АГМП.



- Рис. 5. Суммарный показатель степени загрязнения (DC) (A) и среднее значение вероятности биологического воздействия среднего уровня M-ERM-Q (Б) для донных отложений рек Ярлы-Амры и Чибитка на фоне среднего содержания элементов в отложениях р. Ярлы-Амры в районе АГМП (точка Я*) по данным [35]: * – DC рассчитан для Чб-12 и Чб-15 без учета содержаний Cd, Se, Sb (согласно данным рис. 4); ** – M-ERM-Q рассчитан для всех проб без учета Se, Sb, а для Чб-12 и Чб-15 – без учета Cd, Se, Sb (согласно данным рис. 2); ось X – точки опробования, согласно схеме (рис. 1)
- Fig. 5. Degree of contamination (A) and average value of the probability of biological impact of average level M-ERM-Q (B) for bottom sediments of the Yarly-Amry and the Chibitka rivers against the background of average content of elements in the bottom sediments of the Yarly-Amry river in the area of the AMMP (point «Я»*) according to [45]: * – DC was calculated for Chb-12 and Chb-15 without taking into account the contents of Cd, Se, Sb (according to Fig. 4); ** – M-ERM-Q was calculated for all samples without taking into account Se, Sb, and for Chb-12 and Chb-15 – without taking into account Cd, Se, Sb (according to the data in Fig. 2); the X axis – sampling points that correspond to Fig. 1

Применение вышеописанных показателей оценки качества состояния донных отложений и их влияния на живые организмы осуществляют преимущественно для морских осадков [25, 27]; в меньшей степени для речных отложений [60, 61]. Работы, где оценивают состояние речных экосистем в пределах ореолов рассеяния месторождений [21] и в пределах крупных природных аномалий, например, ртутных провинций [7], совсем немногочисленны. В контексте проводимой нами работы последние примеры наиболее важны. Для отложений реки Итапикуру-Мирим (Жакобина, Баия, Бразилия), в водосборном бассейне которой расположена золотодобывающая компания с двумя хвостохранилищами, проведена оценка состояния отложений и их влияния на живые организмы [21], и выявлено: донные отложения охарактеризованы от умеренно до серьезно загрязненных Hg и Cu; существуют риски для биоты, вызванные повышенными содержаниями Cr, Ni, Pb и Hg; но только Hg, Cd и Си имели антропогенное происхождение. На примере крупной ртутной провинции Монте-Амиата (Италия) было установлено, что донные осадки р. Палья имеют 50 % уровень вероятности токсичного влияния на организмы, обитающие в этой среде, при среднем содержании Hg 1,06 г/т [7]. Согласно результатам, полученным авторами, содержания Нд в донных отложениях достигают в среднем 34,14 г/т, вероятность влияния на живые организмы в пределах изученной части Курайской ртутной зоны может достигать 100 % вблизи АГМП. Степень загрязнения донных отложений р. Ярлы-Амры и р. Чибитка по таким элементам, как Hg, As, Cu, Ni, Sb, Se, согласно разным значениям (CF, ДК, SQG, DC), соответствует высокому уровню. Можно выделить два источника загрязнений: природный - это повышенный геохимический фон ртутной провинции с сопутствующей рудной минерализацией; техногенный - влияние вещества отходов АГМП.

На примере донных отложений р. Пирасикаба (Сан-Паулу, Бразилия) было сделано заключение, что, во-первых, существующие загрязнения Cd, Cr, Ni, Pb, Sc имеют геогенное происхождение. Во-вторых, интерпретировать такие показатели, как TEL и PEL, нужно осторожно, поскольку они всегда отражают региональный природный геохимический фон и могут переоценивать или недооценивать степень токсичности. Но тесты на токсичность могут предоставить больше информации о биодоступности микроэлементов для бентосных и эпибентосных организмов и, следовательно, указать на потенциальные экологические риски микроэлементов в отложениях [61]. Сопоставление содержаний элементов с разными показателями может различаться между собой интенсивностью токсичности и степенью загрязнения; порой они могут противоречить друг другу. Наличие таких различий, встречающихся и в других исследованиях [60], обусловлено разными методами расчета пороговых показателей в разных странах [26]. В своей работе мы также столкнулись с ситуацией, когда возникают противоречивые интерпретации в ходе сравнения данных с референтными показателями состояния донных отложений и влияния на живые организмы. Это подтверждает необходимость [22] развития своих (российских) показателей оценки состояния донных отложений и их влияния на живые организмы. Для подтверждения токсичности и биодоступности осадков рек Ярлы-Амры и Чибитка в дальнейшем необходимо оценить формы нахождения ПТЭ в отложениях.

Выводы

 За счет близости месторождений Восточное и Акташское речные воды истока р. Ярлы-Амры обогащаются Ni, Zn, As, Pb, Sb, а донные отложения – Cu, Pb, Cd, Se. В части реки, что ниже отвалов АГМП, из-за попадания вещества отвалов в реку в воде увеличивается Cu, Cd, Hg и Se, а в донных отложениях – Hg, As, Sb, Ni.

В воде р. Чибитка ниже устья р. Ярлы-Амры увеличиваются содержания Ni, Cu, As, Hg относительно части реки, что выше устья, где высоки содержания Zn и Sb; содержания Cu выше значений в воде р. Ярлы-Амры. В донных отложениях участка 1 р. Чибитка наблюдается увеличение содержаний Hg, Cu, Ni, Sb, Se по мере удаления от истока реки. На участке 2 р. Чибитка донные осадки обогащаются Hg, As, Cu, Ni, Sb, Se по сравнению с отложениями выше устья р. Ярлы-Амры. В среднем в донных отложениях р. Ярлы-Амры содержания Hg, As, Cu, Ni выше, чем в отложениях р. Чибитка, а содержания Hg, As, Ni выше даже по сравнению с участком 2 р. Чибитка.

Содержания Zn, Cu и Hg в водах обеих рек превышают ПДК водных объектов рыбохозяйственного значения – 4,9 ПДК по Zn; 1,7 ПДК по Cu и 46 ПДК по Hg.

 Загрязнение донных отложений ПТЭ (Hg, As, Se, Sb) рек в изучаемой части КРЗ варьирует от умеренно до очень сильно загрязненных и даже опас-

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Синявский И.В., Князева Т.Г. Тяжелые металлы в системе «почва-растение-человек» в промышленных городах горнолесной зоны Южного Урала // Агропродовольственная политика России. – 2016. – № 4. – С. 59–62. ных (согласно CF). Загрязнение Ni, Cu, Zn, Pb, Cd донных отложений низкое и умеренное. Особенно отличается Hg, для которой характерны наибольшие значения CF. Ее содержания вносят определяющий вклад в DC донных отложений. DC отложений р. Ярлы-Амры и участка 2 р. Чибитка характеризуется как очень высокая, а отложения участка 1 р. Чибитка имеют значительную степень загрязнения.

3. Донные отложения р. Ярлы-Амры, согласно показателям ERL/ERM и TEL/PEL, могут оказывать токсичное влияние на биоту с вероятностью до 100 % под влиянием повышенных содержаний Hg, As и Ni; вероятность влияния Zn, Pb и Cd – 5–30 %; Cu – 5–50 %. В донных отложениях р. Чибитка ниже устья р. Ярлы-Амры наблюдается аналогичная ситуация, за исключением Cu, ее более высокие содержания увеличивают токсичность донных отложений (до 100 %). Согласно критериям US EPA, содержания Sb и Se не оказывают влияния на организмы, несмотря на высокие значения фактора загрязнения данными элементами.

Показатель M-ERM-Q также указывает на то, что донные отложения участка 1 р. Чибитка и истока р. Ярлы-Амры характеризуются умеренной токсичностью (21 % вероятности токсического воздействия). Тогда как токсичность отложений р. Ярлы-Амры, что ниже АГМП, и участка 2 р. Чибитка увеличивается до значительной/высокой (49–76 % вероятности токсического воздействия). В том числе и осадки водотоков вблизи п. Акташ характеризуются как высокотоксичные. Только в 9,2 км от устья р. Ярлы-Амры токсичность донных отложений снижается до умеренной (21 %).

4. Ключевыми факторами обогащения и загрязнения рек Ярлы-Амры и Чибитка являются природная аномалия в виде ртутной зоны с сопутствующей рудной минерализацией и последствия деятельности АГМП. Исследование дает оценку экогеохимического состояния водоемов в пределах района с природной Hg-аномалией. Изменение состояния и качества водоемов избирательно определяется геохимической спецификой района и зависит от содержания Hg и в меньшей степени As, Cu, Ni, Se, Sb.

Выражаем благодарность аналитикам: Жимнит Ошоровне Бадмаевой, Лидии Николаевне Букреевой, Ольге Анатольевне Савиной (ЦКП «Многоэлементных и изотопных исследований», ИГМ СО РАН) и Юрию Петровичу Колмогорову (ЦКП «СЦСТИ» на базе УНУ «Новосибирский ЛСЭ» в ИЯФ СО РАН).

Работа выполнена в рамках госзадания ИГМ СО РАН им. В.С. Соболева. Ртуть в воде и донных отложениях исследована при поддержке РНФ № 18-77-10056.

3. Ecological risk assessment of trace metals in soils affected by mine tailings / A.C. Buch, J.C. Niemeyer, E.D. Marques, E.V. Sil-

Ecotoxicological status and risk assessment of heavy metals in municipal solid wastes dumpsite impacted soil in Nigeria / J.P. Essien, E.D. Inam, D.I. Ikpe, G.E. Udofia, N.U. Benson // Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management. – 2019. – V. 11. – Article 100215.

va-Filho // Journal of Hazardous Materials. – 2021. – V. 403. – Article 123852.

- Ojelede M.E., Annegarn H.J., Kneen M.A. Evaluation of aeolian emissions from gold mine tailings on the Witwatersrand // Aeolian Researslide – 2012. – V. 3 (4). – P. 477–486.
- Measurement and scaling of mercury on soil and air in a historical artisanal gold mining area in Northeastern China / Z. Wang, G. Zhang, X. Chen, Q. Zhao, W. Wang, L. Sheng, H. Bian, Zh. Li, D. Wang // Chinese Geographical Science. – 2019. – V. 29 (2). – P. 245–257.
- Assessment of emissions of trace elements and sulfur gases from sulfide tailings / S.B. Bortnikova, N.V. Yurkevich, N.A. Abrosimova, A.Y. Devyatova, A.V. Edelev, A.L. Makas, M.L. Troshkov // Journal of Geochemical Exploration. – 2018. – V. 186. – P. 256–269.
- Concentration, distribution, and translocation of mercury and methylmercury in mine-waste, sediment, soil, water, and fish collected near the Abbadia San Salvatore mercury mine, Monte Amiata district, Italy / V. Rimondi, J.E. Gray, P. Costagliola, O. Vaselli, P. Lattanzi // Science of the total environment. – 2012. – V. 414. – P. 318–327.
- The impact of natural weathering and mining on heavy metal accumulation in the karst areas of the Pearl River Basin, China / W. Wu, S. Qu, W. Nel, J. Ji // Science of The Total Environment. - 2020. - V. 734. - Article 139480.
- Pollution and ecological risk assessment of heavy metals in the soil-plant system and the sediment-water column around a former Pb/Zn-mining area in NE Morocco / A. El Azhari, A. Rhoujjati, M.L. El Hachimi, J.P. Ambrosi // Ecotoxicology and environmental safety. – 2017. – V. 144. – P. 464–474.
- Environmental and human health risks of arsenic in gold mining areas in the eastern Amazon / H.F. de Souza Neto, W.V. da Silveira Pereira, Y.N. Dias, E.S. de Souza, R.A. Teixeira, M.W. de Lima, S.J. Ramos, C.B. do Amarante, A.R. Fernandes // Environmental Pollution. – 2020. – Article 114969.
- Berzas Nevado J.J., García Bermejo L.F., Rodríguez Martín-Doimeadios R.C. Distribution of mercury in the aquatic environment at Almade'n, Spain // Environmental Pollution. – 2003. – V. 122. – P. 261–271.
- Distribution and partitioning of mercury in a river catchment impacted by former mercury mining activity / D. Kocman, T. Kanduč, N. Ogrinc, M. Horvat // Biogeochemistry. – 2011. – V. 104 (1). – P. 183–201.
- Taylor S.R., McLennan S.M. The geochemical evolution of the continental crust // Reviews of geophysics. – 1995. – V. 33 (2). – P. 241–265.
- Diffuse emission and transport of gaseous elemental mercury (GEM) in the Mapamyum geothermal system, Western Tibet (China) / Y. Sun, Z. Guo, J. Du, W. Zhao // Journal of Volcanology and Geothermal Researslide – 2020. – V. 397. – Article 106825.
- Onshore mud volcanoes as a geological source of mercury: case study from the Kerch Peninsula, Caucasus continental collision zone / S.N. Kokh, E.V. Sokol, M.A. Gustaytis, I.A. Sokol, A.S. Deviatiiarova // Science of The Total Environment. – 2020. – V. 751. – Article 141806.
- Vasiliev O.F., Obolenskiy A.A., Yagolnitser M.A. Mercury as a pollutant in Siberia: sources, fluxes and a regional budget // Science of the total environment. – 1998. – V. 213 (1–3). – P. 73–84.
- Шевырев Л.Т. Закономерности в распределении летучих элементов в поверхностной оболочке Земли: вероятная историкоминерагеническая интерпретация. Статья 1. Ртуть // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. – 2013. – № 2. – С. 106–117.
- Bibliometric overview of research trends on heavy metal health risks and impacts in 1989–2018 / R. Han, B. Zhou, Y. Huang, X. Lu, S. Li, N. Li // Journal of Cleaner Production. – 2020. – V. 276. – Article 123249.
- Котельянец Е.А., Коновалов С.К. Тяжелые металлы в донных отложениях Керченского пролива // Морской гидрофизический журнал. – 2012. – № 4. – С. 50–60.
- How sulfate-rich mine drainage affected aquatic ecosystem degradation in northeastern China, and potential ecological risk / Q. Zhao, F. Guo, Y. Zhang, S. Ma, X. Jia, W. Meng // Science of the Total Environment. – 2017. – V. 609. – P. 1093–1102.
- 21. Geochemical evaluation of potentially toxic elements determined in surface sediment collected in an area under the influence of gold

mining / M.V.S. Santos, J.B. da Silva Júnior, C.E.V. de Carvalho, C. dos Santos Vergílio, G.M. Hadlich, C.O. de Santana, T.B. de Jesus // Marine pollution bulletin. – 2020. – V. 158. – Article 111384.

- 22. Специальные наблюдения за загрязнением тяжелыми металлами донных отложений водных объектов в системе мониторинга / Н.В. Коломийцев, Б.И. Корженевский, Г.Ю. Толкачёв, Н.О. Гетьман // Географический вестник. 2020. Т. 1. № 52. Р. 139–154.
- 23. Нормы и критерии оценки загрязненности донных отложений в водных объектах Санкт-Петербурга. Региональный норматив. Утверждено главным государственным санитарным врачом по Санкт-Петербургу 17.06.1996 г. и Комитетом по охране окружающей среды и природных ресурсов Санкт-Петербурга и Ленинградской области 22.07.1996 г. Разработан ОАО «Ленморниипроект» по заказу Управления по охране окружающей среды мэрии Санкт-Петербурга. – СПб, 1996. – 10 с.
- Marine pollution in the Libyan coastal area: environmental and risk assessment / M. Bonsignore, D.S. Manta, E.A.A.T. Sharif, F. D'Agostino, A. Traina, E.M. Quinci, L. Giaramita, C. Monastero, M. Benothman, M. Sprovieri // Marine pollution bulletin. – 2018. – V. 128. – P. 340–352.
- Tan İ., Aslan E. Metal pollution status and ecological risk assessment in marine sediments of the inner Izmit Bay // Regional Studies in Marine Science. 2020. V. 33. Article 100850.
- Derivation methods of soils, water and sediments toxicity guidelines: A brief review with a focus on antimony / S. Bagherifam, T.C. Brown, C.M. Fellows, R. Naidu // Journal of Geochemical Exploration. – 2019. – V. 205. – Article 106348.
- Ecological risk assessment using trace elements from surface sediments of Izmit Bay (Northeastern Marmara Sea) Turkey / H. Pekey, D. Karakaş, S. Ayberk, L. Tolun, M. Bakoğlu // Marine pollution bulletin. - 2004. - V. 48 (9-10). - P. 946-953.
- Assessment of the contamination level of bottom sediments of Amursky Bay (Sea of Japan) and their potential toxicity / M.A. Vashchenko, P.M. Zhadan, T.N. Almyashova, A.L. Kovalyova, E.N. Slinko // Russian Journal of Marine Biology. – 2010. – V. 36 (5). – P. 359–366.
- Long E.R., Morgan L.G. The potential for biological effects of sediment-sorbed contaminants tested in the National Status and Trends Program. NOAA Technical Memorandum NOS OMA 52. National Oceanic and Atmospheric Administration. – Seattle, Washington, 1990. – 175 p.
- Incidence of adverse biological effects within ranges of chemical concentrations in marine and estuarine sediments / E.R. Long, D.D. MacDonald, S.L. Smith, F.D. Calder // Environmental management. – 1995. – V. 19 (1). – P. 81–97.
- Classifying probabilities of acute toxicity in marine sediments with empirically derived sediment quality guidelines / E.R. Long, D.D. MacDonald, C.G. Severn, C.B. Hong // Environmental Toxicology and Chemistry: an International Journal. – 2000. – V. 19 (10). – P. 2598–2601.
- Development and evaluation of sediment quality guidelines for Florida coastal waters / D.D. MacDonald, R.S. Carr, F.D. Calder, E.R. Long, C.G. Ingersoll // Ecotoxicology. – 1996. – V. 5 (4). – P. 253–278.
- 33. US EPA Region III BTAG Freshwater Sediment Screening Benchmarks 8/2006 // US EPA. 2006. URL: https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-09/documents/r3_ btag_fw_sediment_benchmarks_8-06.pdf (дата обращения 05.06.2021).
- Робертус Ю.В., Любимов Р.В., Сакладов А.С. Новые данные о вещественном составе сырья и отходов Акташского ГМП // Бюлл. Природные ресурсы Горного Алтая. – 2006. – Т. 1. – С. 83–85.
- Архипов И.А., Пузанов А.В. Акташское ртутное месторождение (Юго-Восточный Алтай) как потенциальный источник поступления ртути в объекты окружающей природной среды // Мир науки, культуры, образования. 2007. № 4. С. 23–26.
- Kulikova A.V., Buslov M.M., Travin A.V. Geochronology of the metamorphic rocks in the Kurai accretionary prism (South-Eastern Gorny Altai) // Geodynamics and Tectonophysics. – 2017. – V. 8 (4). – P. 1049–1063.

- Рогожин Е.А., Платонова С.Г. Очаговые зоны сильных землетрясений Горного Алтая в голоцене. – М.: ОИФЗ РАН, 2002. – 130 с.
- Gaskov I.V. Features of magmatim-related metallogeny of Gorny Altai and Rudny Altai (Russia) // Russian Geology and Geophysics. – 2018. – V. 59 (8). – P. 1010–1021.
- Объяснительная записка (м-б 1:200000 лист М-45-XVI первое поколение) / Ю.Б. Алешко, М.Н. Ланда, И.В. Столбина, О.А. Раковец / под ред. И.Ф. Пожарского.-Составитель карты: ВАГТ Серия: Горно-Алтайская. – М.: Госгеолтехиздат, 1962. – 101 с.
- 40. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (третье поколение). Серия Алтае-Саянская. Лист М-45, Горно-Алтайск. Объяснительная записка / С.И. Федак, Ю.А. Туркин, А.И. Гусев, С.П. Шокальский, Г.Г. Русанов, Б.А. Борисов, Г.М. Беляев, Е.М. Леонтьева. – СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2011. – 567 с.
- Научно-технический отчет по госконтракту № 8-КТ-ВО от 08.05.2009 г. по оценке экологического состояния объектов окружающей среды в районе Акташского ГМП и поселка Акташ / Ю.В. Робертус, Р.В. Любимов, И.А. Архипов, Г.А. Шевченко, В.П. Иванова. – Горно-Алтайск: ГНУ РА «АРИ "Экология"», 2009. – 71 с.
- Робертус Ю.В., Пузанов А.В., Любимов Р.В. Особенности ртутного загрязнения окружающей среды в районе Акташского горно-металлургического предприятия (Республика Алтай) // География и природные ресурсы. 2015. № 3. С. 48–55.
- Roach A.C. Assessment of metals in sediments from Lake Macquarie, New South Wales, Australia, using normalisation models and sediment quality guidelines // Marine environmental researslide – 2005. – V. 59 (5). – P. 453–472.
- 44. Приказ № 552 Министерство сельского хозяйства России от 13 декабря 2016. Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения. – М., 2016.
- US EPA National Recommended Aquatic Life Criteria. URL: https://www.epa.gov/wqc/national-recommended-water-qualitycriteria-aquatic-life-criteria-table (дата обращения 05.06.2021).
- Гигиенические нормативы ГН 2.1.5.2280-07. Предельно допустимые концентрации химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования. – М., 2007.
- Санитарные правила и нормы СанПиН 2.1.5.980-00. Гигиенические требования к охране поверхностных вод. Минздрав России. – М., 2000.
- WHO. Guidelines for drinking water quality. 4th ed. with 1st addendum. – Geneva, 2017. – 631 p.
- WHO. Guidelines for drinking-water quality: incorporating 1st and 2nd addenda. V. 1, Recommendations. 3rd ed. Geneva, 2008. 515 p.

- The drinking water standards and health advisories tables, EPA 822-F-18-001. Office of Water U.S. Environmental Protection Agency Washington, DC // US EPA. 2018. URL: https://www.epa.gov/sites/production/files/2018-03/documents/dwtable2018.pdf (дата обращения 05.06.2021).
- Экогеохимия ртути в природных средах и техногенных объектах района Акташского ГМП (Республика Алтай) / Ю.В. Робертус, А.В. Пузанов, Р.В. Любимов, И.А. Архипов // Мир науки, культуры, образования. – 2010. – Т. 2. – № 21. – С. 280–282.
- Savichev O.G., Paromov V.V. Chemical composition of glacial meltwaters and river waters within the Aktru river basin (Gornyi Altai) // Geography and Natural Resources. – 2013. – V. 34 (4). – P. 364–370.
- 53. Паничев А.М., Середкин И.В., Вах Е.А. Новые данные по химическому составу вод Бугузунских источников, Горный Алтай, Россия // Полевые исследования в Алтайском биосферном заповеднике. – 2019. – № 1. – С. 110–117.
- Ярошевский А.А. Кларки геосфер: справочник по геохимическим поискам полезных ископаемых. – М.: Недра, 1990. – С. 7–14.
- Корж В.Д. Геохимия элементного состава гидросферы. М.: Наука, 1991. – 243 с.
- Vetrov V.A., Kuznetsova A.I., Sklyarova O.A. Baseline levels of chemical elements in the water of Lake Baikal // Geography and Natural Resources. – 2013. – V. 34 (3). – P. 228–238.
- Gosar M., Žibret G. Mercury contents in the vertical profiles through alluvial sediments as a reflection of mining in Idrija (Slovenia) // Journal of Geochemical Exploration. – 2011. – V. 110 (2). – P. 81–91.
- Metallogeny, exploitation and environmental impact of the Mt. Amiata mercury ore district (Southern Tuscany, Italy) / V. Rimondi, L. Chiarantini, P. Lattanzi, M. Benvenuti, M. Beutel, A. Colica, P. Costagliola, F. Di Benedetto, G. Gabbani, J.E. Gray, E. Pandeli, G. Pattelli, M. Paolieri, G. Ruggieri // Italian Journal of Geosciences. – 2015. – V. 134 (2). – P. 323–336.
- 59. Особенности форм переноса Нд в реках Ярлы-Амры и Чибитка в зоне влияния Акташского горнометаллургического предприятия (Горный Алтай) / И.Н. Мягкая, Б.Ю. Сарыг-оол, М.А. Густайтис, В.И. Малов, И.С. Кириченко, О.Н. Сурков, Е.В. Лазарева // Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами. – 2020. – С. 250–253.
- Pollution characteristics of mercury (Hg) in surface sediments of major basins, China / B. Gao, L. Han, H. Hao, H. Zhou // Ecological Indicators. - 2016. - V. 67. - P. 577-585.
- Multi-tracer analysis to estimate the historical evolution of pollution in riverbed sediment of subtropical watershed, the lower course of the Piracicaba River, São Paulo, Brazil / F.T. da Conceição, A.M. Fernandes, C. Hissler, C.M. Lupinacci, A.A. Menegário, R.B. Moruzzi // Science of The Total Environment. 2020. V. 743. Article 140730.

Поступила 24.11.2021 г.

Информация об авторах

Мягкая И.Н., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН.

Сарыг-оол Б.Ю., научный сотрудник, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН.

Кириченко И.С., научный сотрудник, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН.

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

Лазарева Е.В., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН.

UDC 504.4.054

ECOGEOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF THE YARLY-AMRY AND THE CHIBITKA RIVERS, LOCATED IN THE DISPERSION TRAIN OF AKTASH MERCURY DEPOSIT AND ITS WASTES (GORNY ALTAI)

Irina N. Myagkaya¹,

i_myagkaya@igm.nsc.ru

Bagai-ool Yu. Saryg-ool¹, sarygool@igm.nsc.ru

Ivan S. Kirichenko¹, iskirichenko@igm.nsc.ru

Mariya A. Gustaytis¹, gustaitis@igm.nsc.ru

Elena V. Lazareva¹,

lazareva@igm.nsc.ru

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

The relevance of the study is caused by the need to develop Russian guidelines for assessing the environmental state of bottom sediments and their impact on living organisms, as well as water bodies in general. The pollution of natural waters by potentially toxic elements is currently important. There are no federal standards regulating the quality of bottom sediments in Russia. Additionally, the study area is located in a popular tourist region of Gorny Altai. The knowledge about environmental state of the aquatic ecosystem in this region is of great importance.

The main aim is to study the potentially toxic elements (Hg, As, Cu, Zn, Ni, Pb, Cd, Sb, Se) distribution in the waters and bottom sediments of the Yarly-Amry and the Chibitka Rivers and assess the environmental state of bottom sediments based on Russian and International guidelines as well as identify their toxicity to living organisms.

Study area. The Chibitka River and its tributary, the Yarly-Amry River (Ulagan District, Aktash village) are located within the Kurai mercury zone and are additionally influenced by the Aktash Mining and Metallurgical Enterprise wastes stored on the Yarly-Amry River bank.

Methods. pH and Eh were measured in waters by potentiometry. The dissolved C_{org} was determined by IR spectroscopy. The anions were studied by capillary electrophoresis. The potentially toxic elements contents in river waters were determined by flame and electrothermal atomic absorption spectrometry, as well as by mass spectrometry with inductively coupled plasma; Hg was determined by «cold vapor» atomic absorption spectrometry. The PTE contents in bottom sediments were determined by SR-XRF, flame and electrothermal atomic absorption spectrometry and «cold vapor» atomic absorption spectrometry. The geochemical features of bottom sediments were identified calculating their enrichment degree relative to the upper continental crust. The pollution degree of bottom sediments and the toxic impact probability on living organisms were estimated based on a comparison of potentially toxic elements content with Russian and International guidelines.

Results. The increase of Cu, Cd, Hg and Se total contents in river water takes place due to the effect of Aktash Mining and Metallurgical Enterprise wastes on the Yarly-Amry River. The contents of Ni. Zn. As, Pb. Sb are higher in the source of Yarly-Amry River than in the part of the river affected by Aktash Mining and Metallurgical Enterprise wastes. The Chibitka River water above the mouth of the Yarly-Amry River (section 1) contains more Zn and Sb than section 2 (below the mouth), where the contents of Ni, Cu, As, Hg increase. The exceedances of the maximum permissible concentration for water bodies of fishery importance for Zn, Cu and Hg are 4.9; 1.7 and 46 times in the waters of both rivers. The bottom sediments of both rivers are significantly enriched by Hg, As, Ni, Sb, Se than the upper continental crust. The contents of Hg, As, Sb, Se in the sediments of the section 1 of the Chibitka River increase with distance from the river source. Hg and Sb sharp increase in in the sediments of the section 2 of the Chibitka River was found. Hg, As, Se and Sb pollution of bottom sediments of both rivers varies from moderate to very strong and even dangerous levels (according to the guidelines of permissible concentrations, contamination factor, degree of contamination and sediment quality index); Ni, Cu, Zn, Pb, Cd pollution is from low to moderate levels. Bottom sediments of the Yarly-Amry River and section 2 of the Chibitka River have the 50-100 % probability of the toxic effect on the microbiota (according to the ERL/ERM and TEL/PEL) due to the effect of Aktash Mining and Metallurgical Enterprise wastes and high contents of Hg, Ni, As, Cu. The probability of bottom sediments toxicity of both rivers is estimated at 5–30 % and it is due to the content of Zn, Pb and Cd. The mean effect range median (M-ERM-Q) shows the total toxicity of bottom sediments of the Chibitka and the Yarly-Amry Rivers, and varies from 21 to 76 % depending on the distance from Aktash Mining and Metallurgical Enterprise wastes. Bottom sediments of the Chibitka River near Aktash village is also highly toxic; the probability of toxicity decreases to moderate (21 %) only 9,2 km from the Yarly-Amry River mouth. The key factor of bottom sediments and river waters pollution is the Kurai mercury zone high natural geochemical background with accompanying ore mineralization and technogenic anomalies formed as a result of the Aktash Mining and Metallurgical Enterprise activity. The change in environmental state and quality of water bodies (mainly bottom sediments) is selectively determined by geochemical specifics of the area and depends on the content of Hg and, to a lesser extent, As, Cu, Ni, Se, Sb. The obtained results are important for assessing the environmental state of the Gorny Altai tourist region. Also, they make it possible to carry out a comparative analysis of environmental conditions with other world mercury zones in order to identify the features of pollution and migration of potentially toxic elements.

Key words:

Kurai mercury zone, Aktash mercury mine, dispersion train, river waters, bottom sediments, pollution, mercury, potentially toxic elements.

The authors thank to the analysts: Zhimnit O. Badmaeva, Lidya N. Bukreeva, Olga A. Savina (the Analytical Center for Multi-Elemental and Isotope Research, the Institute of Geology and Mineralogy SB RAS) and Yuri P. Kolmogorov (the Research Center SSTRC based on the Novosibirsk FEL at BINP SB RAS).

The field and some analytical works were performed on a government assignment to the Institute of Geology and Mineralogy SB RAS. Determination of the Hg content in waters and bottom sediments was carried out with the support of the RSF project no. 18-77-10056.

REFERENCE

- Sinyavsky I.V., Knyazeva T.G. Tyazhelye metally v sisteme «pochva-rastenie-chelovek» v promyshlennykh gorodakh gornolesnoy zony Yuzhnogo Urala [Heavy metals in the soil-plant-man system in industrial cities of the mountain-forest zone of the Southern Urals]. Agri-food policy of Russia, 2016, no. 4, pp. 59–62.
- Essien J.P., Inam E.D., Ikpe D.I., Udofia G.E., Benson N.U. Ecotoxicological status and risk assessment of heavy metals in municipal solid wastes dumpsite impacted soil in Nigeria. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 2019, vol. 11, Article 100215.
- Buch A.C., Niemeyer J.C., Marques E.D., Silva-Filho E.V. Ecological risk assessment of trace metals in soils affected by mine tailings. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, vol. 403, Article 123852.
- Ojelede M.E., Annegarn H.J., Kneen M.A. Evaluation of aeolian emissions from gold mine tailings on the Witwatersrand. *Aeolian Research*, 2012, vol. 3 (4), pp. 477–486.
- Wang Z., Zhang G., Chen X., Zhao Q., Wang W., Sheng L., Bian H., Li Zh., Wang D. Measurement and scaling of mercury on soil and air in a historical artisanal gold mining area in Northeastern China. *Chinese Geographical Science*, 2019, vol. 29 (2), pp. 245–257.
- Bortnikova S.B., Yurkevich N.V., Abrosimova N.A., Devyatova A.Y., Edelev A.V., Makas A.L., Troshkov M.L. Assessment of emissions of trace elements and sulfur gases from sulfide tailings. *Journal of Geochemical Exploration*, 2018, vol. 186, pp. 256–269.
- Rimondi V., Gray J.E., Costagliola P., Vaselli O., Lattanzi P. Concentration, distribution, and translocation of mercury and methylmercury in mine-waste, sediment, soil, water, and fish collected near the Abbadia San Salvatore mercury mine, Monte Amiata district, Italy. *Science of the total environment*, 2012, vol. 414, pp. 318–327.
- Wu W., Qu S., Nel W., Ji J. The impact of natural weathering and mining on heavy metal accumulation in the karst areas of the Pearl River Basin, China. *Science of The Total Environment*, 2020, vol. 734, Article 139480.
- El Azhari A., Rhoujjati A., El Hachimi M.L., Ambrosi J.P. Pollution and ecological risk assessment of heavy metals in the soilplant system and the sediment-water column around a former Pb/Zn-mining area in NE Morocco. *Ecotoxicology and environmental safety*, 2017, vol. 144, pp. 464–474.
- De Souza Neto H.F., Da Silveira Pereira W.V., Dias Y.N., De Souza E.S., Teixeira R.A., De Lima M.W., Ramos S.J., Do Amarante C.B., Fernandes A.R. Environmental and human health risks of arsenic in gold mining areas in the eastern Amazon. *Environmental Pollution*, 2020, Article 114969.
- Berzas Nevado J.J., García Bermejo L.F., Rodríguez Martín-Doimeadios R.C. Distribution of mercury in the aquatic environment at Almade'n, Spain. *Environmental Pollution*, 2003, vol. 122, pp. 261–271.
- Kocman D., Kanduč T., Ogrinc N., Horvat M. Distribution and partitioning of mercury in a river catchment impacted by former mercury mining activity. *Biogeochemistry*, 2011, vol. 104 (1), pp. 183–201.
- Taylor S.R., McLennan S.M. The geochemical evolution of the continental crust. *Reviews of geophysics*, 1995, vol. 33 (2), pp. 241–265.
- Sun Y., Guo Z., Du J., Zhao W. Diffuse emission and transport of gaseous elemental mercury (GEM) in the Mapamyum geothermal system, Western Tibet (China). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2020, vol. 397, Article 106825.
- Kokh S.N., Sokol E.V., Gustaytis M.A., Sokol I.A., Deviatiiarova A.S. Onshore mud volcanoes as a geological source of mercury: case study from the Kerch Peninsula, Caucasus continental collision zone. *Science of The Total Environment*, 2020, vol. 751, Article 141806.

- Vasiliev O.F., Obolenskiy A.A., Yagolnitser M.A. Mercury as a pollutant in Siberia: sources, fluxes and a regional budget. *Science* of the total environment, 1998, vol. 213 (1–3), pp. 73–84.
- 17. Shevyrev L.T. Zakonomernosti v raspredelenii letuchikh elementov v poverkhnostnoy obolochke Zemli: veroyatnaya istorikomineragenicheskaya interpretatsiya. Statya 1. Rtut [Regularities in the distribution of volatile elements in the surface shell of the Earth: a probable historical and mineragenic interpretation. Article 1. Mercury]. Voronezh State University Bulletin. Series: Geology, 2013, no. 2, pp. 106–117.
- Han R., Zhou B., Huang Y., Lu X., Li S., Li N. Bibliometric overview of research trends on heavy metal health risks and impacts in 1989–2018. *Journal of Cleaner Production*, 2020, vol. 276, Article 123249.
- Kotelianets E.A., Konovalov S.K. Tyazhelye metally v donnykh otlozheniyakh Kerchenskogo proliva [Heavy metals in bottom sediments of the Kerch Strait]. *Marine Hydrophysical Journal*, 2012, no. 4, pp. 50–60.
- Zhao Q., Guo F., Zhang Y., Ma S., Jia X., Meng W. How sulfaterich mine drainage affected aquatic ecosystem degradation in northeastern China, and potential ecological risk. *Science of the Total Environment*, 2017, vol. 609, pp. 1093–1102.
- 21. Santos M.V.S., Da Silva Júnior J.B., De Carvalho C.E.V., Dos Santos Vergílio C., Hadlich G.M., De Santana C.O., De Jesus T.B. Geochemical evaluation of potentially toxic elements determined in surface sediment collected in an area under the influence of gold mining. *Marine pollution bulletin*, 2020, vol. 158, Article 111384.
- Kolomiytsev N.V., Korzhenevsky B.I., Tolkachev G.Yu., Getman N.O. Special monitoring of heavy metal pollution in the bottom sediments of water objects. *Geographic Bulletin*, 2020, vol. 1, no. 52, pp. 139–154. In Rus.
- 23. Normy i kriterii otsenki zagryaznennosti donnykh otlozheniy v vodnykh obyektakh Sankt-Peterburga. Regionalny normativ. Utverzhdeno glavnym gosudarstvennym sanitarnym vrachom po Sankt-Peterburgu 17.06.1996 g. i Komitetom po okhrane okruzhayushchey sredy i prirodnykh resursov Sankt-Peterburga i Leningradskov oblasti 22.07.1996 g. Razrabotan OA0 «Lenmorniiproyekt» po zakazu Upravleniya po okhrane okruzhayushchey sredy merii Sankt-Peterburga [Norms and criteria for assessing the pollution of bottom sediments in water bodies of St. Petersburg. Regional standard. Approved by the Chief State Sanitary Doctor for St. Petersburg on June 17, 1996 and the Committee for the Protection of the Environment and Natural Resources of St. Petersburg and the Leningrad Region on July 22, 1996. Developed by Lenmorniiproekt OJSC by order of the Environmental Protection Department of the St. Petersburg City Hall]. St. Petersburg, 1996. 10 p.
- Bonsignore M., Manta D.S., Sharif E.A.A.T., D'Agostino F., Traina A., Quinci E.M., Giaramita L., Monastero C., Benothman M., Sprovieri M. Marine pollution in the Libyan coastal area: environmental and risk assessment. *Marine pollution bulletin*, 2018, vol. 128, pp. 340–352.
- Tan İ., Aslan E. Metal pollution status and ecological risk assessment in marine sediments of the inner Izmit Bay. *Regional Studies in Marine Science*, 2020, vol. 33, Article 100850.
- Bagherifam S., Brown T.C., Fellows C.M., Naidu R. Derivation methods of soils, water and sediments toxicity guidelines: a brief review with a focus on antimony. *Journal of Geochemical Exploration*, 2019, vol. 205, Article 106348.
- Pekey H., Karakaş D., Ayberk S., Tolun L., Bakoğlu M. Ecological risk assessment using trace elements from surface sediments of Izmit Bay (Northeastern Marmara Sea) Turkey. *Marine pollution bulletin*, 2004, vol. 48 (9–10), pp. 946–953.
- Vashchenko M.A., Zhadan P.M., Almyashova T.N., Kovalyova A.L., Slinko E.N. Assessment of the contamination level of bottom sediments of Amursky Bay (Sea of Japan) and their potential toxicity. *Russian Journal of Marine Biology*, 2010, vol. 36, no. 5, pp. 359–366.

- Long E.R., Morgan L.G. The potential for biological effects of sediment-sorbed contaminants tested in the National Status and Trends Program. NOAA Technical Memorandum NOS OMA 52. National Oceanic and Atmospheric Administration. Seattle, Washington, 1990. 175 p.
- Long E.R., MacDonald D.D., Smith S.L., Calder F.D. Incidence of adverse biological effects within ranges of chemical concentrations in marine and estuarine sediments. *Environmental management*, 1995, vol. 19, no. 1, pp. 81–97.
- Long E.R., MacDonald D.D., Severn C.G., Hong C.B. Classifying probabilities of acute toxicity in marine sediments with empirically derived sediment quality guidelines. *Environmental Toxicology* and Chemistry: an International Journal, 2000, vol. 19, no. 10, pp. 2598–2601.
- MacDonald D.D., Carr R.S., Calder F.D., Long E.R., Ingersoll C.G. Development and evaluation of sediment quality guidelines for Florida coastal waters. *Ecotoxicology*, 1996, vol. 5, no. 4, pp. 253–278.
- US EPA Region III BTAG Freshwater Sediment Screening Benchmarks 8/2006. US EPA. 2006. Available from: https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-09/documents/r3_btag_fw_sediment_benchmarks_8-06.pdf (accessed 5 June 2021).
- 34. Robertus Yu.V., Lyubimov R.V., Sakladov A.S. Novye dannye o veshchestvennom sostave syrya i otkhodov Aktashskogo GMP [New data on the material composition of raw materials and waste of the Aktash MME]. *Bulletin Natural resources of Gorny Altai*, 2006, vol. 1, pp. 83–85.
- 35. Arkhipov I.A., Puzanov A.V. Aktash mercury deposit (South-East Altai) as a potential source of mercury input into the environment. *The world of science, culture, education*, 2007, no. 4, pp. 23–26. In Rus.
- Kulikova A.V., Buslov M.M., Travin A.V. Geochronology of the metamorphic rocks in the Kurai accretionary prism (South-Eastern Gorny Altai). *Geodynamics and Tectonophysics*, 2017, vol. 8, no. 4, pp. 1049–1063.
- Rogozhin E.A., Platonova S.G. Ochagovye zony silnykh zemletryaseniy Gornogo Altaya v golotsene [Focal zones of strong earthquakes in Gorny Altai in the Holocene]. Moscow, OIFZ RAN publ., 2002. 130 p.
- Gaskov I.V. Features of magmatim-related metallogeny of Gorny Altai and Rudny Altai (Russia). *Russian Geology and Geophysics*, 2018, vol. 59, no. 8, pp. 1010–1021.
- Aleshko Yu.B., Landa M.N., Stolbina I.V., Rakovets O.A. Obyasnitelnaya zapiska (m-b 1:200000 list M-45-XVI pervoe pokolenie) [Explanatory note (1:200000 sheet M-45-XVI first generation)]. Ed. by I.F. Pozharsky. Moscow, Gosgeoltekhizdat Map compiler, 1962. 101 p.
- 40. Fedak S.I., Turkin Yu.A., Gusev A.I., Shokalsky S.P., Rusanov G.G., Borisov B.A., Belyaev G.M., Leontyeva E.M. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii. Masshtab 1:1000000 (tretye pokolenie). Seriya Altae-Sayanskaya. List M-45, Gorno-Altaysk. Obyasnitel'naya zapiska [State geological map of the Russian Federation. Scale 1:1000000 (third generation). Altai-Sayan series. Sheet M-45, Gorno-Altaysk. Explanatory letter]. St-Petersburg, Cartographic factory VSEGEI Publ., 2011. 567 p.
- 41. Robertus Yu.V., Lyubimov R.V., Arkhipov I.A., Shevchenko G.A., Ivanova V.P. Nauchno-tekhnicheskiy otchet po goskontraktu № 8-KT-VO ot 08.05.2009 g. po otsenke ekologicheskogo sostoyaniya obyektov okruzhayushchey sredy v rayone Aktashskogo GMP i poselka Aktash [Scientific and technical report on the state contract No. 8-KT-VO dated 05.08.2009 on the assessment of the ecological state of environmental objects in the area of Aktash GMP and the village of Aktash]. Gorno-Altaysk, GNU RA «ARI" Ecology "» Publ., 2009. 71 p.
- Robertus Yu.V., Puzanov A.V., Lyubimov R.V. Features of mercury pollution of the environment in the area of the Aktash mining and metallurgical enterprise (Altai Republic). *Geography and Natural Resources*, 2015, no. 3, pp. 48–55. In Rus.
- Roach A.C. Assessment of metals in sediments from Lake Macquarie, New South Wales, Australia, using normalisation models and sediment quality guidelines. *Marine environmental research*, 2005, vol. 59, no. 5, pp. 453–472.
- Prikaz № 552 Ministerstvo selskogo khozyaystva Rossii ot 13 dekabrya 2016. Ob utverzhdenii normativov kachestva vody vodnykh

obyektov rybokhozyaystvennogo znacheniya, v tom chisle normativov predelno dopustimykh kontsentratsiy vrednykh veshchestv v vodakh vodnykh obyektov rybokhozyaystvennogo znacheniya [Order no. 552 Ministry of Agriculture of Russia dated December 13, 2016. On approval of water quality standards for water bodies of fishery significance, including standards for maximum permissible concentrations of harmful substances in waters of water bodies of fishery significance]. Moscow, 2016.

- US EPA National Recommended Aquatic Life Criteria. Available at: https://www.epa.gov/wqc/national-recommended-water-qualitycriteria-aquatic-life-criteria-table (accessed 5 June 2021).
- 46. Gigienicheskie normativy GN 2.1.5.2280-07. Predelno dopustimye kontsentratsii khimicheskikh veshchestv v vode vodnykh obyektov khozyaystvenno-pitevogo i kulturno-bytovogo vodopolzovaniya [Hygienic standards GN 2.1.5.2280-07. Maximum permissible concentration of chemical substances in water of water bodies of household, drinking and cultural and household water use]. Moscow, 2007.
- 47. Sanitarnye pravila i normy SanPiN 2.1.5.980-00. Gigienicheskie trebovaniya k okhrane poverkhnostnykh vod. Minzdrav Rossii [Sanitary rules and norms SanPiN 2.1.5.980-00. Hygienic requirements for the protection of surface waters. Ministry of Health of Russia]. Moscow, 2000.
- WHO. Guidelines for drinking water quality. 4th ed. with 1^st addendum. Geneva, 2017. 631 p.
- WHO. Guidelines for drinking-water quality: incorporating 1st and 2nd addenda. Vol. 1, Recommendations. 3rd ed. Geneva, 2008. 515 p.
- 50. The drinking water standards and health advisories tables. EPA 822-F-18-001. Office of Water U.S. Environmental Protection Agency Washington, DC. US EPA. 2018. Available at: https://www.epa.gov/sites/production/files/2018-03/documents/dwtable2018.pdf (accessed 5 June 2021).
- Robertus Yu.V., Puzanov A.V., Lyubimov R.V., Arkhipov I.A. Ecogeochemistry of mercury in natural environments and manmade objects of the Aktash MME (Altai Republic). World of science, culture, education, 2010, vol. 2, no. 21, pp. 280–282. In Rus.
- Savichev O.G., Paromov V.V. Chemical composition of glacial meltwaters and river waters within the Aktru river basin (Gornyi Altai). *Geography and Natural Resources*, 2013, vol. 34, no. 4, pp. 364–370.
- Panichev A.M., Seredkin I.V., Vakh E.A. New data on the chemical composition of the Buguzun Springs, Gorny Altai, Russia. *Field research in the Altai Biosphere Reserve*, 2019, no. 1, pp. 110–117. In Rus.
- Yaroshevsky A.A. Klarki geosfer: spravochnik po geokhimicheskim poiskam poleznykh iskopayemykh [Clarke of the geospheres: a handbook of geochemical mineral prospecting]. Moscow, Nedra Publ., 1990. pp. 7–14.
- Korzh V.D. Geokhimiya elementnogo sostava gidrosfery [Geochemistry of the elemental composition of the hydrosphere]. Moscow, Nauka Publ., 1991. 243 p.
- Vetrov V.A., Kuznetsova A.I., Sklyarova O.A. Baseline levels of chemical elements in the water of Lake Baikal. *Geography and Natural Resources*, 2013, vol. 34, no. 3, pp. 228–238.
- Gosar M., Žibret G. Mercury contents in the vertical profiles through alluvial sediments as a reflection of mining in Idrija (Slovenia). *Journal of Geochemical Exploration*, 2011, vol. 110, no. 2, pp. 81–91.
- Rimondi V., Chiarantini L., Lattanzi P., Benvenuti M., Beutel M., Colica A., Costagliola P., Di Benedetto F., Gabbani G., Gray J.E., Pandeli E., Pattelli G., Paolieri M., Ruggieri G. Metallogeny, exploitation and environmental impact of the Mt. Amiata mercury ore district (Southern Tuscany, Italy). *Italian Journal of Geosciences*, 2015, vol. 134, no. 2, pp. 323–336.
- 59. Myagkaya I.N., Saryg-ool B.Yu., Gustaitis M.A., Malov V.I., Kirichenko I.S., Surkov O.N., Lazareva E.V. Peculiarities of Hg transport forms in the Yarly-Amry and Chibitka rivers in the zone of influence of the Aktash mining and metallurgical enterprise (Gorny Altai). *Geological evolution of the interaction of water* with rocks, 2020, pp. 250–253.
- Gao B., Han L., Hao H., Zhou H. Pollution characteristics of mercury (Hg) in surface sediments of major basins, China. *Ecological Indicators*, 2016, vol. 67, pp. 577–585.

61. Da Conceição F.T., Fernandes A.M., Hissler C., Lupinacci C.M., Menegário A.A., Moruzzi R.B. Multi-tracer analysis to estimate the historical evolution of pollution in riverbed sediment of subtropical watershed, the lower course of the Piracicaba River, São Paulo, Brazil. Science of The Total Environment, 2020, vol. 743, Article 140730.

Received: 24 November 2021.

Information about the authors

Irina N. Myagkaya, Cand. Sc., senior researcher, Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS.
Bagai-ool Yu. Saryg-ool, researcher, Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS.
Ivan S. Kirichenko, researcher, Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS.
Mariya A. Gustaytis, Cand. Sc., senior researcher, Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS.
Elena V. Lazareva, Cand. Sc., senior researcher, Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS.

УДК 546.831.4

РАЗРАБОТКА СПОСОБА НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОБЕСКРЕМНИВАНИЯ АКТИВИРОВАННОГО ЦИРКОНОВОГО КОНЦЕНТРАТА РАСТВОРОМ NH4HF2

Смороков Андрей Аркадьевич¹,

wolfraum@yandex.ru

Кантаев Александр Сергеевич1,

akantaev@tpu.ru

Брянкин Даниил Валерьевич¹,

dvb43@tpu.ru

Миклашевич Анна Андреевна¹,

nura.miklaa@gmail.com

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

Актуальность. Исследование обосновано целесообразностью разработки технологии переработки активированных цирконовых концентратов с получением бадделеитового концентрата, используемого для изготовления высокотемпературной керамики, и с возможностью регенерации основного реагента. При этом получаемый диоксид кремния в качестве побочного продукта может быть использован для изготовления изделий из силикатной керамики.

Цель: определить максимальную степень обескремнивания активированного цирконового концентрата водным раствором гидродифторида аммония с получением бадделеитового концентрата; предложить схему переработки активированного цирконового концентрата с получением бадделеитового концентрата и диоксида кремния.

Объекты: раствор гидродифторида аммония, термоактивированный цирконовый концентрат, водный раствор аммиака.

Методы: экспериментальные исследования, рентгенофлюорисцентный анализ, рентгенофазовый анализ, атомноэмиссионная спектроскопия, инфракрасная спектроскопия.

Результаты. Определены условия селективного удаления кремния из активированного цирконового концентрата с получением бадделеитового концентрата в качестве целевого продукта и диоксида кремния в качестве попутного продукта. Влияние концентрации гидродифторида аммония в выщелачивающем растворе на степень обескремнивания активированного цирконового концентрата незначительно. Оптимальные условия проведения выщелачивания следующие: концентрация раствора NH₄HF₂ – 30 %, продолжительность – 60 минут, температура – 90 °C; соотношение твердого к жидкому – 1:5. При данных условиях более 97 % кремния переходит в раствор. В процессе выщелачивания диоксид циркония частично реагирует с выщелачивающим реагентом с образованием гептафтороцирконата аммония, характеризуемого более низкой растворимостью в растворе в сравнении с фторидами аммония и гексафторосиликатом аммония. Последующий обжиг позволяет перевести гептафтороцирконат обратно в диоксид циркония. Получаемый раствор гексафторосиликата аммония используется для получения аморфного диоксида кремния и раствора фторида аммония, служащего сырьем в процессе регенерации выщелачивающего раствора с повторным его использованием для переработки новой партии сырья. По результатам работ предложена технологическая схема получения бадделеитового концентрата. Схема характеризуется отсутствием отходов.

Ключевые слова:

Гидродифторид аммония, активированный цирконовый концентрат, бадделеитовый концентрат, низкотемпературное обескремнивание.

Введение

Согласно Стратегии развития минеральносырьевой базы Российской Федерации до 2035 года, определенной Правительством РФ от 22.12.2018 № 2914-р, цирконий относится к группе дефицитных полезных ископаемых, внутреннее потребление которых в значительной степени обеспечивается вынужденным импортом. Кроме того, цирконий относится к одному из видов стратегического минерального сырья, перечень которых утвержден распоряжением Правительства РФ от 16.01.1996 № 50-р.

Россия располагает крупной сырьевой базой, достаточной для обеспечения внутренних потребностей страны в циркониевом сырье. Отечественные месторождения циркония являются в основном комплексными, что осложняет процесс переработки руд и отрицательно сказывается на рентабельности проектов – не вся потенциальная продукция в полном объеме может быть реализована на внутреннем или на внешних рынках. Выпускаемый в стране бадделеитовый концентрат (ZrO₂) является уникальным высококачественным циркониевым сырьем и практически полностью экспортируется. Бадделеитовый концентрат производится только в России; остальные страны (Австралия, ЮАР, США, Мозамбик, Сенегал, Индонезия и др.) выпускают преимущественно цирконовые концентраты (ZrSiO₄).

Отечественные предприятия используют импортный цирконовый концентрат для производства металлического циркония (в т. ч. ядерной чистоты), его сплавов и изделий из них. По выпуску циркониевого проката страна является одним из мировых лидеров, обеспечивая около пятой части рынка. Металлический цирконий и сплавы на его основе, а также диоксид циркония являются наиболее востребованными цирконийсодержащими продуктами на мировом рынке. Так, согласно [1], за период с 2010 по 2020 гг. стоимость премиальных австралийских цирконовых концентратов выросла почти в 1,5 раза (с 965 до 1385 \$ за тонну), при этом стоимость бадделеитового концентрата выросла почти в 2,5 раза (с 2262 до 5491 \$ за тонну), что свидетельствует о росте потребностей в высококачественном циркониевом сырье.

В связи с обозначенными экономическими тенденциями вопрос разработки безотходного способа получения бадделеитовых концентратов из цирконовых концентратов становится актуальным.

Диоксид циркония имеет температуру плавления около 2700 °С, характеризуется рядом свойств (например, высокая термическая стойкость), которые делают данный материал востребованным в производстве керамических изделий. При температуре 1000–1100 °С диоксид циркония претерпевает обратимое изменение кристаллической структуры, сопровождающееся изменением в объеме на 3–4 %, что приводит к разрушению изделий из него. Для предотвращения перекристаллизации в диоксид циркония вводят стабилизирующие добавки (оксиды кальция, РЗЭ и др.) [2].

Исходным минералом, используемым для промышленного получения диоксида циркония, является циркон (ZrSiO₄). Одна из его особенностей заключается в его диссоциации при нагревании до высоких температур (около 1800 °C), при этом процесс носит обратимый характер [3].

$ZrSiO_4 \leftrightarrows ZrO_2 + SiO_2$.

С учетом перечисленных выше процессов замещение бадделеита цирконом невозможно, в связи с чем становится актуальным вопрос получения бадделеитовых концентратов путем максимального удаления диоксида кремния.

В промышленности внедрен метод обескремнивания активированного цирконового концентрата путем его обработки 50 % раствором щелочи при 120 °С с получением соответствующего силиката. Получаемый остаток диоксида циркония отфильтровывают на центрифуге из-за вязкости раствора, а силикат щелочного металла утилизируется как побочный товарный продукт [4]. Недостаток приведенного способа состоит в необходимости реализации силиката натрия на рынке и необходимости перманентной закупки новых партий щелочи или организации дополнительного химического производства с постоянной закупкой сырья. Данный вопрос может быть решен путем внедрения безотходного способа обескремнивания с регенерацией основного реагента и его повторным использованием в основном процессе.

Обзор литературных данных показал, что фториды аммония могут быть рассмотрены в качестве решения поставленной задачи ввиду их высокой реакционной способности по отношению к диоксиду кремния. На примерах как минералов (танталит [5], латерит [6], монацит [7], сподумен [8], тринитит [9, 10], циркон [11–15], ильменит [16, 17], титаномагнетит [18, 19] и др.), так и чистых оксидов (диоксид плутония [20], диоксид тория [21] и др.) установлена возможность применения расплава фторидов аммония как реагента для переработки наиболее химически стойких кислородсодержащих соединений элементов. Данные расплавы характеризуются высокой химической активностью и, в сочетании с одновременным измельчением реакционной смеси [22], позволяют достигать высокой степени конверсии элементов.

Наряду с этим стоит отметить возможность применения водных растворов фторидов аммония, так как эти растворы обладают более низкой вязкостью и вследствие этого способствуют более высокой диффузии ионов в сравнении с расплавом. Одновременно с этим водные растворы можно использовать при более низких температурах (менее 100 °C). Также за счет различной растворимости фтораммонийных комплексных соединений можно добиться одновременного разделения определенных элементов. В связи с этим была предложена апробация водного обескремнивания активированного цирконового концентрата с целью минимизации содержания в нем кремния.

Методика эксперимента

Для проведения исследований был использован цирконовый концентрат, полученный в результате термической активации, включающей в себя обработку в воздушной высокочастотной индукционной плазме. Условия обработки представлены в публикации [23].

Выщелачивание примесей из активированного цирконового концентрата осуществлялось следующим образом: 25 г активированного в плазме цирконового концентрата смешивали с раствором гидродифторида аммония в массовом соотношении Т:Ж=1:5. В ходе экспериментов при постоянном нагревании (температура находилась в диапазоне 80– 90 °C) и перемешивании определялась зависимость степени обескремнивания от концентрации гидродифторида аммония в растворе и от времени.

В ходе процесса происходит реакция образования гексафторосиликата аммония, переходящего в раствор. Последующей фильтрацией проводилось отделение твердого остатка от раствора фтораммонийных комплексных соединений примесных элементов. Определение степени удаления примесей состояло в вычислении содержания элемента в образцах до и после соответствующего эксперимента. Расчет проводился по следующей формуле:

$$\begin{split} \alpha &= \left(\frac{m_{\text{Hav}.}^{3n} - m_{\text{KOHev}.}^{3n}}{m_{\text{Hav}.}^{3n}} \right) \cdot 100 \ \% = \\ &= \left(\frac{c_{\text{Hav}.}^{3n} \cdot m_{\text{Hav}.}^{66\mu} - c_{\text{KOHev}.}^{3n} \cdot m_{\text{KOHev}.}^{66\mu}}{c_{\text{Hav}.}^{3n} \cdot m_{\text{Hav}.}^{66\mu}} \right) \cdot 100 \ \%, \end{split}$$

где α – степень удаления элемента, %; $m_{\text{конеч.}}^{3,n}$ – масса элемента в образце после эксперимента; $m_{\text{нач.}}^{3,n}$ – масса элемента в образце до эксперимента; $C_{\text{нач.}}^{3,n}$ – концентрация элемента в пробе до эксперимента; $C_{\text{конеч.}}^{3,n}$ – концентрация элемента в пробе после эксперимента; $m_{\text{конеч.}}^{\text{общ.}}$ – масса образца после эксперимента; $m_{\text{нач.}}^{\text{общ.}}$ – масса образца до эксперимента. Масса образцов определялась на аналитических весах (весы аналитические AND GR-200).

Концентрация элементов определялась с использованием рентгенофлуоресцентного (рентгенофлуоресцентный энергодисперсионный спектрометр ARL Quant'X) и атомно-эмиссионного анализа (атомноэмиссионный спектрометр с индуктивно связанной плазмой iCAP 6000 Series). Для атомно-эмиссионного анализа пробы предварительно переводились в растворимую форму в тефлоновых автоклавах с использованием микроволновой системы разложения проб (MARS 6).

Расчет содержания оксидов элементов в образцах проводился по следующей формуле:

$$\omega_{\mathrm{okcum}} = \Big(\frac{\omega_{\mathrm{jnement}} \cdot \mathrm{M}_{\mathrm{okcum}}}{n \cdot \mathrm{M}_{\mathrm{jnement}}} \Big),$$

где $\omega_{\text{оксид}}$ – доля оксида элемента в образце, %; $\omega_{\text{элемент}}$ – доля элемента в образце, определенная в ходе элементного анализа, %; $M_{\text{оксид}}$ – молярная масса оксида элемента, а.е.м.; $M_{\text{элемент}}$ – атомная масса элемента, а.е.м.; n – количество атомов элемента в оксиде.

Кристаллическую структуру образцов исследовали методом рентгеновской дифракции (Shimadzu XRD-7000S) в конфигурации Брэгга–Брентано с использованием Си-Кα1-излучения при 40 кВ и 30 мА. Фазовый состав образцов определяли с помощью программы PDF-2.

Определение качественного состава исходного сырья и продуктов проводилось методом инфракрасной спектроскопии с помощью Фурье-спектрометра NICOLET 6700 Thermo Electron Corporation. Для измерений в области 4000–400 см⁻¹ образцы были приготовлены прессованием смеси исследуемого образца и бромида калия в таблетки. Соотношение между образцом и КВг составляло 1:300.

Результаты и их обсуждение

Элементный состав активированного циркона и состав в пересчете на оксиды представлены в табл. 1, 2 соответственно. Стоит отметить, что в прочие попутные примеси входят соединения различных элементов, в том числе редких и редкоземельных (иттрий и др.).

Таблица 1. Состав активированного цирконового концентрата

Table 1.	Composition of the zircon concentrate after ac-
	ivation

Компонент/Component	Zr	Si	Al	Hf
Содержание/Content, %	54,60	9,18	2,58	1,06

Таблица 2. Состав активированного цирконового концентрата в пересчете на оксиды

 Table 2.
 Composition of the zircon concentrate after activation in terms of oxides

Компонент Component	ZrO ₂	SiO ₂	Al_2O_3	HfO ₂	Прочие примеси Other impurities
Содержание Content, %	73,80	19,67	4,87	1,25	0,41

По результатам рентгенофазового анализа (рис. 1) установлено, что после термической активации в плазме кристаллическая составляющая цирконового концентрата представляет собой бадделеит с небольшими примесями циркона, который не разложился на составляющие оксиды в процессе высокотемпературной активации в воздушной высокочастотной плазме. Кремниевая составляющая на рентгенограмме не отмечена, что согласуется с описанным в [2] фактом об аморфности диоксида кремния (кремнезёма), образующегося при термической диссоциации циркона.

Соединения алюминия и других компонентов не идентифицированы.



Рис. 1. Рентгенограмма исходного активированного цирконового концентрата: $1 - ZrO_2$ (бадделеит); $2 - ZrSiO_4$ (циркон)

Fig. 1. XRD of the initial zircon concentrate after activation: $1 - ZrO_2$ (baddeleyite); $2 - ZrSiO_4$ (zircon)

На ИК-спектре исходного активированного циркона (рис. 2) стоит выделить характерные полосы

1120, 798 и 469 см⁻¹, которые также представлены на спектре чистого аморфного SiO₂ (рис. 3).



Puc. 2. ИК-спектр исходного активированного цирконового концентрата *Fig. 2.* IR spectrum of the initial zircon concentrate after activation



Puc. 3. ИК-спектр диоксида кремния **Fig. 3.** IR spectrum of silicon dioxide

По результатам экспериментов установлено (рис. 4), что оптимальный результат по выщелачиванию кремния достигается при использовании 30 % раствора гидродифторида аммония (ГДФА) и продолжительности процесса 1 ч. При увеличении концентрации ГДФА и продолжительности процесса степень обескремнивания снижается. Данный эффект связан с испарением воды и, следовательно, пересыщением раствора, и переходом гексафторосиликата аммония из жидкой фазы в твердую. Использование растворов ГДФА с концентрацией 10 и 20 % позволяет достичь определенной степени обескремнивания, при этом с увеличением продолжительности процесса степень перехода кремния в раствор остается на прежнем уровне.



Puc. 4. Зависимость степени обескремнивания от продолжительности процесса **Fig. 4.** Dependence of the desiliconization degree on the duration of the process



Рис. 5. Рентгенограмма обескремненного цирконового концентрата: $1 - ZrO_2$ (бадделеит); $2 - (NH_4)_3 ZrF_7$ **Fig. 5.** XRD of the zircon concentrate after desiliconization: $1 - ZrO_2$ (baddeleyite); $2 - (NH_4)_3 ZrF_7$

Рентгенофазовый анализ продукта выщелачивания (рис. 5) показал, что диоксид циркония частично прореагировал с образованием гептафторцирконата аммония. Наряду с этим стоит отметить отсутствие кристаллической фазы гексафторосиликата аммония. Последующая термогравиметрия обескремненнного активированного концентрата в токе воздуха (рис. 6) зафиксировала убыль массы в 20,32 %, что связано с разложением гептафтороцирконата аммония до диоксида циркония, образование которого связано с взаимодействием фторсодержащих соединений циркония с парами воды воздуха. (NH₄)₃ZrF₇→(NH₄)₂ZrF₆→NH₄ZrF₅→ZrF₄→ZrO₂. Данная операция приводит к снижению доли фторидов в системе. Одновременно с этим удается осуществить более полную регенерацию раствора гидродифторида аммония. Из полученных результатов следует, что в процессе выщелачивания кремния в реакцию также вступает не менее 30 % диоксида циркония с образованием гептафороцирконата аммония ((NH_4)₃ZrF₇), который не переходит в раствор, что связано с низкой растворимостью данного соединения в условиях процесса в сравнении с гексафторосиликатом аммония и гидродифторидом аммония.



Рис. 6. Термограмма обескремненного цирконового концентрата

Fig. 6. Thermogravimetric curve of the zircon concentrate after desiliconization

Элементный состав продукта и состав в пересчете на оксиды представлены в табл. 3, 4 соответственно.

Таблица 4. Состав бадделеитового концентрата в пересчете на оксиды

Composition of the baddeleyite concentrate in

Table 4.

 Таблица 3. Состав бадделеитового концентрата

 Table 3.
 Composition of the baddeleyite concentrate

I I I I I I I I I I I I I I I I I I I				
Компонент/Component	Zr	Si	Al	HfO ₂
Содержание/Content, %	66,24	0,26	2,51	1,25

Компонент
ComponentZrO2SiO2Al2O3HfO2Прочие примеси
Other impuritiesСодержание
Content, %89,530,564,741,483,69

terms of oxides

Основной кристаллической структурой в полученном продукте является диоксид циркония в форме бадделеита (рис. 7).

Стоит отметить, что состав данного продукта соответствует составу сырья (как по макро-, так и по микрокомпонентам), которое применяется в производстве керамических изделий из диоксида циркония.

На представленном ИК-спектре полученного бадделеитового концентрата после прокаливания при 700 °С (рис. 8), в сравнении со спектрами исходного

активированного цирконового концентрата и диоксида кремния (рис. 2, 3, соответственно), стоит отметить отсутствие линий на 1120, 798 и 469 см⁻¹, характерных для SiO₂. Данный факт согласуется с результатами элементного анализа и свидетельствует о получении обескремненного продукта.

По результатам работ предложена технологическая схема получения бадделеитового концентрата, основанная на обескремнивании термически активированного цирконового концентрата (рис. 9).



Рис. 7. Рентгенограмма бадделеитового концентрата: $1 - ZrO_2$ (бадделеит); $2 - ZrSiO_4$ (циркон) **Fig. 7.** XRD of the baddeleyite concentrate: $1 - ZrO_2$ (baddeleyite); $2 - ZrSiO_4$ (zircon)



Puc. 8. ИК-спектр бадделеитового концентрата после прокаливания при 700 °C **Fig. 8.** IR spectrum of the baddeleyite concentrate after calcination at 700 °C



Puc. 9. Схема получения бадделеитового концентрата **Fig. 9.** Scheme of the baddeleyite concentrate production

Заключение

По результатам работ удалось достичь высокой степени обескремнивания цирконового концентрата (более 97 %). При этом отмечено реагирование диоксида циркона с образованием гептафтороцирконата аммония, переход которого в раствор минимален ввиду его низкой растворимости в приведенном растворе. Последующий обжиг твердого остатка позволяет повысить концентрацию компонентов сырья за счет разложения фтораммонийных комплексных соединений и выделения фторида аммония. Получен-

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2018 году» / под ред. Е.А. Киселева. – М.: ВИМС, 2019. – 426 с.
- Балкевич В.Л. Техническая керамика. М.: Стройиздат, 1984. – 256 с.
- Гузман И.Я. Химическая технология керамики. М.: ООО РИФ «Стройматериалы», 2003. – 496 с.
- Металлургия циркония и гафния / Н.В. Барышников, В.Э. Гегер, Н.Д. Денисова, А.А. Казайн, В.А. Кожемякин и др. – М.: Металлургия, 1979. – 208 с.
- Kabangu M.J., Crouse P.L. Separation of niobium and tantalum from Mozambican tantalite by ammonium bifluoride digestion and octanol solvent extraction // Hydrometallurgy. – 2012. – V. 129–130. – P. 151–155.
- Extraction of cobalt from laterite ores by citric acid in presence of ammonium bifluoride / G.-H. Li, M.-J. Rao, Q. Li, Z.-W. Peng, T. Jiang // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. – 2010. – V. 20. – Iss. 8. – P. 1517–1520.
- Kemp D., Cilliers A.C. Fluorination of rare earth, thorium, and uranium oxides and phosphates from monazite: a theoretical approach // Advanced Material Researslide – 2014. – V. 1019. – P. 439–445.
- Thermal and structural analysis of the reaction pathways of αspodumene with NH4HF2 / A.C. Resentera, G.D. Rosales, M.R. Esquivel, M.H. Rodriguez // Thermochimica Acta. – 2020. – V. 689. – P. 1–10.
- Development of ammonium bifluoride fusion method for rapid dissolution of trinitite samples and analysis by ICP-MS / N. Hubley, J.W.N. Brown, J. Guthrie, J.D. Robertson, J.D. Brockman // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. – 2016. – V. 307. – P. 1777–1780.
- Hubley N., Brockman J.D., Robertson J.D. Evaluation of ammonium bifluoride fusion for rapid dissolution in postdetonation nuclear forensic analysis // Radiochimica Acta. – 2017. – V. 105. – № 8. – P. 629–635.

ный же после выщелачивания раствор направляется на осаждение кремния и других компонентов, перешедших в раствор. В результате процесса образуется раствор фторида аммония, который направляется на регенерацию раствора гидродифторида аммония, тем самым обеспечивается регенерация исходного реагента, позволяя организовать безотходную схему получения бадделеитового концентрата, используемого для производства металлического циркония и сплавов на его основе, а также керамических изделий на основе диоксида циркония.

- Effect of the value of x in NH4F·xHF on the digestion of plasmadissociated zircon / W. du Plessis, A.D. Pienaar, C.J. Postma, P.L. Crouse // International Journal of Mineral Processing. – 2016. – V. 147. – P. 43–47.
- Reaction kinetics of the microwave enhanced digestion of zircon with ammonium acid fluoride / J.T. Nel, W. du Plessis, T.N. Nhlabathi, C.J. Pretorius, A.A. Jansen, P.L. Crouse // Journal of Fluorine Chemistry. – 2011. – V. 132. – Iss. 4. – P. 258–262.
- Microwave digestion of zircon with ammonium acid fluoride: derivation of kinetic parameters from non-isothermal reaction data / T.N. Nhlabathi, J.T. Nel, G.J. Puts, P.L. Crouse // International Journal of Mineral Processing. – 2012. – V. 114–117. – P. 35–39.
- Смороков А.А., Крайденко Р.И. Получение диоксида циркония с использованием фторидов аммония // Ползуновский вестник. – 2017. – № 3. – С. 126–131.
- Laptash N., Maslennikova I. Hydrofluoride decomposition of natural materials including zirconium-containing minerals // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – V. 112. – Article 012024.
- Андреев А.А., Дьяченко А.Н., Крайденко Р.И. Фтороаммонийный способ переработки ильменита // Химическая промышленность сегодня. – 2007. – № 9. – С. 13–17.
- Андреев А.А., Дьяченко А.Н., Крайденко Р.И. Галогенаммонийное разделение минеральной оксидной смеси на индивидуальные компоненты // Химическая промышленность сегодня. – 2007. – № 3. – С. 6–11.
- Smorokov A.A., Kantaev A.S., Borisov V.A. Research of titanomagnetite concentrate decomposition by means of ammonium fluoride and ammonium hydrogen fluoride // AIP Conference Proceedings. – 2019. – V. 2143. – Article 020022.
- Hydrometallurgical processing technology of titanomagnetite ores / V.I. Sachkov, R.A. Nefedov, V.V. Orlov, R.O. Medvedev, A.S. Sachkova // Minerals. – 2018. – V. 8. – № 1. – Article 2.
- On the fluorination of plutonium dioxide by ammonium hydrogen fluoride / B. Claux, O. Beneš, E. Capelli, P. Souček, R. Meier // Journal of Fluorine Chemistry. – 2016. – V. 183. – P. 10–13.

- Mukherjee A., Awasthi A. Fluorination of thorium oxide by ammonium bifluoride and its reduction to metal // Thorium Energy Conference. – Mumbai, India, 2015. – P. 225–232.
- Фарнасов Г.А., Лисафин А.Б. Диссоциация циркона после обработки в воздушной высокочастотной индукционной плазме // Физика и химия обработки материалов. – 2015. – № 2 – С. 29–34.

Поступила 25.03.2022 г.

22. Фтораммонийный способ переработки титановых шлаков. / А.Н. Дмитриев, А.А. Смороков, А.С. Кантаев, Д.С. Никитин, Г.Ю. Витькина // Известия высших учебных заведений. Черная Металлургия. – 2021. – Т. 64. – № 3. – С. 178–183.

Информация об авторах

Смороков А.А., ассистент отделения ядерно-топливного цикла Инженерной школы ядерных технологий, Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Кантаев А.С., кандидат технических наук, доцент_отделения ядерно-топливного цикла Инженерной школы ядерных технологий, Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Брянкин Д.В., студент_отделения ядерно-топливного цикла Инженерной школы ядерных технологий, Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Миклашевич А.А., студент отделения ядерно-топливного цикла Инженерной школы ядерных технологий, Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 546.831.4

DEVELOPMENT OF A LOW-TEMPERATURE DESILICONIZATION METHOD FOR ZIRCON CONCENTRATE AFTER ACTIVATION WITH NH₄HF₂

Andrey A. Smorokov¹, wolfraum@yandex.ru

Alexander S. Kantaev¹, akantaev@tpu.ru

Daniil V. Bryankin¹, dvb43@tpu.ru

Anna A. Miklashevich¹,

nura.miklaa@gmail.com

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

The relevance of the research is caused by the expediency of developing a technology for processing zircon concentrates to obtain a concentrate of baddeleyite, which is used for the production of high-temperature ceramics with the possibility of regenerating the main reagent. In this case, the resulting silicon dioxide as a by-product can be used for the manufacture of products from silicate ceramics. **The main aim** of the research is to determine the maximum degree of desiliconization of the activated zircon concentrate with an aqueous

solution of ammonium hydrofluoride to obtain a baddeleyite concentrate; propose a scheme for processing activated zircon concentrate to produce baddeleyite concentrate and silicon dioxide.

Objects: ammonium hydrogen fluoride solution, zircon concentrate after thermoactivation, water solution of ammonia.

Methods: experimental research, X-ray fluorescence, X-ray crystallography, atomic emission spectroscopy, infrared spectroscopy.

Results. The conditions for silicon selective removal from activated zircon concentrate with the production of baddeleyite concentrate as a target product and silicon dioxide as a by-product are determined. The influence of ammonium hydrofluoride concentration in the leaching solution on the degree of desiliconization of the activated zircon concentrate is insignificant. The optimal conditions for leaching are as follows: concentration of NH₄HF₂ solution – 30 %, duration – 60 minutes, temperature – 90 °C; the ratio of solid to liquid is 1:5. Under these conditions, more than 97 % of silicon goes into solution. While the leaching zirconium dioxide partially reacts with the leaching agent to form ammonium heptafluorozirconate, which is less soluble in water than ammonium fluorides and ammonium hexafluorosilicate. Subsequent calcination converts ammonium heptafluorozirconate back into zirconium dioxide. The produced solution of ammonium hexafluorosilicate is used to obtain amorphous silicon dioxide and ammonium fluoride solution, which serves as a raw material in regeneration of the leaching solution with its reuse for processing a new batch of raw materials. Based on the results of the work, a technological scheme for the production of baddeleyite concentrate is proposed. The scheme is characterized by the absence of waste.

Key words:

Ammonium hydrogen fluoride, activated zircon concentrate, baddeleyite concentrate, low-temperature desiliconization.

REFERENCES

- Kiselev E.A. Gosudarsvenny doklad «O sostoyanii i ispolzovanii mineralno-syrievykh resursov Rossiyskoy Federatsii v 2018 godu» [State report «On the state and use of mineral resources of the Russian Federation in 2018»]. Moscow, VIMS Publ., 2019. 426 p.
- Balkevich V.L. *Technitcheskaya keramika* [Technical ceramics]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1984. 256 p.
- Guzman I.Ya. *Khimitcheskaya tekhnologiya keramiki* [Chemical technology of ceramics]. Moscow, OOO RIF Stroymaterialy Publ., 2003. 496 p.
- Baryshnikov N.V., Geger V.E., Denisova N.D., Kazayn A.A., Kozhemyakin V.A. *Metallurgiya tsirkoniya i gafniya* [Metallurgy of zirconium and hafnium]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1979. 208 p.
- Kabangu M.J., Crouse P.L. Separation of niobium and tantalum from Mozambican tantalite by ammonium bifluoride digestion and octanol solvent extraction. *Hydrometallurgy*, 2012, vol. 129–130, pp. 151–155.
- Li G.-H., Rao M.-J., Li Q., Peng Z.-W., Jiang T. Extraction of cobalt from laterite ores by citric acid in presence of ammonium bifluoride. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2010, vol. 20, Iss. 8, pp. 1517–1520.
- Kemp D., Cilliers A.C. Fluorination of rare earth, thorium, and uranium oxides and phosphates from monazite: a theoretical approaslide *Advanced Material Research*, 2014, vol. 1019, pp. 439–445.
- 8. A Resentera.C., Rosales G.D., Esquivel M.R., Rodriguez M.H. Thermal and structural analysis of the reaction pathways of

α-spodumene with NH₄HF₂. *Thermochimica Acta*, 2020, vol. 689, pp. 1–10.

- Hubley N., Brown J.W.N., Guthrie J., Robertson J.D., Brockman J.D. Development of ammonium bifluoride fusion method for rapid dissolution of trinitite samples and analysis by ICP-MS. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2016, vol. 307, pp. 1777–1780.
- Hubley N., Brockman J.D., Robertson J.D. Evaluation of ammonium bifluoride fusion for rapid dissolution in post-detonation nuclear forensic analysis. *Radiochimica Acta*, 2017, vol. 105, no. 8, pp. 629–635.
- Du Plessis W., Pienaar A.D., Postma C.J., Crouse P.L. Effect of the value of x in NH₄F·xHF on the digestion of plasma-dissociated zircon. *International Journal of Mineral Processing*, 2016, vol. 147, pp. 43–47.
- Nel J.T., Du Plessis W., Nhlabathi T.N., Pretorius C.J., Jansen A.A., Crouse P.L. Reaction kinetics of the microwave enhanced digestion of zircon with ammonium acid fluoride. *Journal of Fluorine Chemistry*, 2011, vol. 132, Iss. 4, pp. 258–262.
- Nhlabathi T.N., Nel J.T., Puts G.J., Crouse P.L. Microwave digestion of zircon with ammonium acid fluoride: derivation of kinetic parameters from non-isothermal reaction data. *International Journal of Mineral Processing*, 2012, vol. 114–117, pp. 35–39.
- Smorokov A.A., Kraidenko R.I. Polutchenie dioksida tsirkoniya s ispolzovaniem ftoridov ammoniya [Obtaining zirconium dioxide using ammonium fluorides]. *Polzunovskii vestnik*, 2017, no. 3, pp. 126–131. In Rus.

- Laptash N., Maslennikova I. Hydrofluoride decomposition of natural materials including zirconium-containing minerals. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 112, Article 012024.
- Andreev A.A., Dyachenko A.N., Kraidenko R.I. Ftoroammoniyny sposob pererabotki ilmenita [Fluoroammonium method of ilmenite processing]. *Khimicheskaya promyshlennost segodnya*, 2007, no. 9, pp. 13–17.
- Andreev A.A., D'yachenko A.N., Kraidenko R.I. Galogenammoniynoe razdelenie mineralnoy oksidnoy smesi naindividualnye komponenty [Halogenammonium separation of a mineral oxide mixture into individual components]. *Khimicheskaya promyshlennost segodnya*, 2007, no. 3, pp. 6–11.
- Smorokov A.A., Kantaev A.S., Borisov V.A. Research of titanomagnetite concentrate decomposition by means of ammonium fluoride and ammonium hydrogen fluoride. *AIP Conference Proceedings*, 2019, vol. 2143, Article 020022.
- Sachkov V.I., Nefedov R.A., Orlov V.V., Medvedev R.O., Sachkova A.S. Hydrometallurgical processing technology of titanomagnetite ores. *Minerals*, 2018, vol. 8, no. 1, Article 2.

- Claux B., Beneš O., Capelli E., Souček P., Meier R. On the fluorination of plutonium dioxide by ammonium hydrogen fluoride. *Journal of Fluorine Chemistry*, 2016, vol. 183, pp. 10–13.
- Mukherjee A., Awasthi A. Fluorination of thorium oxide by ammonium bifluoride and its reduction to metal. *Thorium Energy Conference*. Mumbai, India, 2015. pp. 225–232.
- Dmitriev A.N., Smorokov A.A., Kantaev A.S., Nikitin D.S., Vitkina G.Yu. Fluorammonium method of titanium slag processing. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*, 2021, vol. 64, no. 3, pp. 178–183. In Rus.
- Farnasov G.A., Lisafin A.B. Dissotsiatsiya tsirkona posle obrabotki v vozdushnoy vysokochastotnoy induktsionnoy plazme [Dissociation of zircon under the treatment in air RF inductive plasma]. *Physics and Chemistry of Materials Treatment*, 2015, no. 2, pp. 29–34.

Received: 25 March 2022.

Information about the authors

Andrey A. Smorokov, assistant, National Research Tomsk Polytechnic University.
 Alexander S. Kantaev, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.
 Daniil V. Bryankin, student, National Research Tomsk Polytechnic University.
 Anna A. Miklashevich, student, National Research Tomsk Polytechnic University.
УДК 553.98:551.763:550.836

КАРТА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА КРОВЛИ ФУНДАМЕНТА ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ

Исаев Валерий Иванович1,

isaevvi@tpu.ru

Лобова Галина², lobovaga@tpu.ru

Меренкова Анна Сергеевна¹, a.merenckowa@yandex.ru

Осипова Елизавета Николаевна¹, osipovaen@tpu.ru

Кузьменков Станислав Григорьевич³, ksg.1948@yandex.ru

Фомин Александр Николаевич⁴,

FominAN@ipgg.sbras.ru

- ¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.
- ² Независимый эксперт в области нефтегазовой геологии и геофизики, Литва, 31102, г. Висагинас, ул. Висагино, 25-25.
- ³ Югорский государственный университет, Россия, 628012, г. Ханты-Мансийск, ул. Чехова, 16.
- ⁴ ИНГГ им. А.А. Трофимука СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3.

Актуальность изучения востока Томской области, его нераспределенного фонда недр определяется перспективностью и недоизученностью правобережья реки Оби. Недропользователь не желает там рисковать, государство тоже. Когда добыча на нефтепромыслах левобережья упадет до критического уровня рентабельности, нефтяные компании вынуждены будут осваивать восточные районы. Уже сейчас на правобережье выявлен ряд перспективных участков для поискового бурения. **Целью** исследований геологов и геофизиков нефтяной отрасли Западной Сибири, и в частности Томской области, становится существенный прирост запасов и, соответственно, предотвращение снижения добычи нефти. В этом заключается цель и настоящей работы.

Объектом исследования являются трудноизвлекаемые запасы углеводородов, для чего требуется решение научной проблемы теоретического и экспериментального изучения термодинамики и вещественного состава палеозоя Западной Сибири. Ключевым геодинамическим параметром, определяющим геотемпературы и время воздействия их на очаги генерации углеводородов, является тепловой поток кровли фундамента. Он служит основой для бассейнового моделирования при поисках и разведке. Для исследований в «одном ключе» перспектив нефтегазоносности слабоизученной Бакчарской мезовпадины и участков предварительного прогноза Восточно-Пайдугинской мегавпадины выполнены построения и общий анализ карты плотности теплового потока кровли фундамента востока Томской области.

Методы. Для выполнения моделирования применялось оригинальное ПО «TeploDialog». Этот программный комплекс реализует специально сформулированные прямые и обратные задачи геотермии в условиях седиментации. Определение величины плотности теплового потока из кровли фундамента осложняется учетом множества процессов, происходящих как в недрах, так и на поверхности Земли. Поэтому при расчетах применен интегральный подход, позволяющий учитывать эти процессы с помощью сопряженных структурно-тектонических реконструкций. Исходными данными для модели являются измеренные при опробованиях скважин пластовые температуры, а также снятые с диаграмм температурного градиента. Значения отражательной способности витринита и теплофизических свойств горных пород систематически пополняют базу данных ИНГГ им. А.А. Трофимука СО РАН аналитическими исследованиями под руководством А.Н. Фомина и А.Д. Дучкова.

Результаты. На северо-восточную часть территории Томской области впервые, на базе расчетов 59 параметрических, опорных и поисково-разведочных скважин, подготовлена карта (в изолиниях через 2 мВт/м²) плотности теплового потока из основания осадочного разреза. Значения теплового потока получены по единой хорошо апробированной методике, основанной на решении обратной задачи геотермии. По части постановки задачи выполненной научной работы решена известная доля научной проблемы теоретического и экспериментального изучения термодинамики верхней части палеозоя. Полученное дискретное распределение (по скважинам) и карта значений теплового потока из доюрского фундамента могут служить «каркасной основой» корректного бассейнового моделирования участка Бакчарского района исследований и слабоизученного крупного района Восточно-Пайдугинской мегавпадины. Этот район, учитывая низкие значения современного теплового потока, не перспективен по осадочному чехлу. Однако определения показателя отражения витринита палеозойского разреза могут существенно расширить перспективы нефтегазоносности коры выветривания и верхних горизонтов палеозоя. **Выводы.** Важным результатом будет построенная на следующем этапе единая карта плотности теплового потока кровли фундамента Томской области, на территории которой получили развитие три грабен-рифта: Колтогорско-Уренгойский, Усть-Тымский и Чузикский. Этот факт представляет особый интерес и требует отдельного тщательного рассмотрения.

Ключевые слова:

Прирост запасов УВ на землях востока Томской области, карта плотности теплового потока из кровли фундамента, теоретическое и экспериментальное изучение термодинамики и вещественного состава палеозоя.

Введение

Западная Сибирь остается основной базой нефтедобычи России. Но прирост запасов не превышает объемы их извлечения. Для поддержания существующего уровня добычи до 2035 г. нужно прирастить запасы не менее чем на 10 млрд т. Пока Россия в 10 раз быстрее «проедает» запасы, чем успевает их восполнить. По газу темп истощения запасов за последние три года ускорился вдвое [1]. Актуальным направлением нефтедобывающей отрасли Западной Сибири, и в частности Томской области, становится существенный прирост запасов и, соответственно, предотвращение снижения добычи нефти. Обсуждаются и реализуются два направления решения этой проблемы – и «в глубь», и «в ширь».

Объекты «в глубь» интересны тем, что они расположены в старых районах нефтедобычи с развитой инфраструктурой (рис. 1). Это земли распространения ачимовских клиноформ Нюрольской мегавпадины, резервуаров сланцевых баженовской и тогурской формаций Нюрольской мегавпадины и Колтогорского мезопрогиба. К таким объектам по обустройству инфраструктуры можно отнести слабоизученные нижнеюрские свиты и доюрский нефтегазоносный комплекс Усть-Тымской мегавпадины и Бакчарской мезовпадины, центральной части и юго-востока Томской области.



- Рис. 1. Положение Колтогорского, Нюрольского, Усть-Тымского, Бакчарского и Восточно-Пайдугинского районов исследований на территории Томской области и размещение месторождений углеводородов (проекция Гаусса-Крюгера эллипсоид Красовского): 1 – административная граница Томской области; 2 – населенный пункт; 3 – речная сеть; 4 – месторождение. Районы авторских исследований ачимовских клиноформ (Нюрольский), резервуаров сланцевых баженовской и тогурской формаций (Нюрольский, Колтогорский), слабоизученных нижнеюрских свит и доюрского НГК (Усть-Тымский, Бакчарский), схематического картирования очагов генерации тогурской нефти (Бакчарский), предварительного прогноза нефтеносности коры выветривания (Бакчарский и Восточно-Пайдугинский)
- Fig. 1. Location of the Koltogor, Nyurol, Ust-Tym, Bakchar and East-Paidugin research regions in the Tomsk region and the location of hydrocarbon deposits (Gauss-Kruger projection Krasovsky ellipsoid): 1 administrative border of the Tomsk region; 2 settlement; 3 river network; 4 oil and gas field. Areas of author's studies of Achimov clinoforms (Nyurol), reservoirs of shale Bazhenov and Togur formations (Nyurol, Koltogor), poorly studied Lower Jurassic suites and pre-Jurassic oil and gas complex (Ust-Tym, Bakchar), schematic mapping of Togur oil generation centers (Bakchar), preliminary forecast of oil content of the weathering crust (Bakchar and East Paidugin)

Клиноформы неокома по-прежнему привлекательны, т. к. дифференцируются по характеру насыщения. Для решения этой задачи проведены и проводятся значительные научные исследования [2].

По проблеме сланцевой нефти, под руководством акад. А.Э. Конторовича, получены и опубликованы экспериментальные материалы, свидетельствующие об уникальных текстурно-структурных преобразованиях пород баженовской свиты при температурах глубин главной зоны нефтеобразования. Показано, что геотемпературы являются основным фактором не только интенсивности и объемов генерации УВ, но и образования вторичного пустотного пространства («органической пористости» [3]) – «сланцевого» резервуара.

Общеизвестно, что баженовская свита имеет повсеместное распространение в Западной Сибири [4]. Начальные суммарные геологические ресурсы баженовско-абалакского нефтегазоносного комплекса только в Югре оцениваются в 11 млрд т и, следовательно, подлежат приоритетному хозяйственному освоению. Если прогнозно-поисковые разработки проекта «Бажен» становятся в какой-то мере открытыми для научной общественности, то результаты экспериментального бурения и промысловых работ на полигоне «Бажен», расположенном в XMAO, не вынесены на широкую научную дискуссию.

В последнее время значительное внимание обращается на доюрский НГК. В 2017 г. при поддержке администрации Томской области был заявлен первый проект от ООО «Газпромнефть-Восток» по разработке технологий поисков трудноизвлекаемых запасов (ТрИЗ) углеводородного сырья из доюрских отложений Томской области [5, 6]. Некоторые итоги исследовательских работ отражены в материалах Всероссийской научной конференции. В подсекции 2 «Поиски и разведка нефти и газа» приведен только один доклад, в котором установлены и рекомендованы геофизические и петрофизические характеристики юрского разреза как прогностические показатели для поисковой оценки нефтегазоносности доюрского (палеозойского) разреза [7]. Серьезный отзыв этому докладу дан академиком. А.Э. Конторовичем: «методика требует проверки». Следует заметить, что результаты, озвученные в этом докладе, были получены инициативными исследованиями.

Вероятно, будет к месту упомянуть оценки участников конференции, в связи с так называемой «декарбонизацией». На пленарном заседании д. г.-м. н. А.М. Брехунцов высказал озабоченность своевременным расселением работников нефтегазового комплекса Сургута и Нижневартовска в связи с предстоящим сокращением и ликвидацией Западно-Сибирского нефтяного центра. В свою очередь, академик А.Э. Конторович дал прогноз последствий «декарбонизации», последствий, которые соизмеримы с горбачевской перестройкой. Позиция ученых и геологов Республики Татарстан сводится к интенсивному развитию карбоновых полигонов «Карбон-Поволжье» как центра сбора данных, которые в дальнейшем могут быть интегрированы в общую модель эмиссии и стоков парниковых газов [8]. В то же время ставится стратегическая задача на ближайшие 20–30 лет обеспечить страну конкурентными на мировом рынке углеводородами, которые необходимо добывать экономично, экологично, с низким углеродным «следом».

Тем не менее необходимо активно вовлекать в разработку ТрИЗ нефти, в частности, потенциально богатые залежи в доюрском комплексе, к которому приурочены скопления с начальными геологическими запасами нефти всех категорий порядка 0,5–1,0 млрд т. Полагается, что для юго-востока Западной Сибири (Томская область) освоением доюрского НГК ежегодно можно добывать, начиная с 2025 г., до 1,3 млн т нефти. Ожидается, что в перспективе палеозойские залежи обеспечат до половины всей областной нефтедобычи [1].

Ко второму направлению («в ширь» – новые нефтегазоносные районы) относится арктический шельф, освоение которого, в силу комплекса причин, откладывается на неопределенное время. В этом же ряду стоит проблема повышения коэффициента нефтеотдачи – КИН [9]. Но здесь та же ситуация, что и с освоением шельфа. И с этими эффективными методами та же проблема – под санкции попало импортное оборудование для вскрытия [10–20].

Левобережье реки Оби хорошо изучено и представляет собой распределенный фонд, а «*ширь*» – это нераспределенный фонд, недоизученное правобережье. Недропользователь не желает там рисковать своими деньгами, государство тоже на этом экономит. Но рано или поздно (когда добыча упадет до критического уровня рентабельности) нефтяные компании вынуждены будут осваивать новые территории, если их не опередит государство [21]. Уже сейчас на правобережье выявлен ряд перспективных участков для поискового бурения.

Ключевым геодинамическим параметром, определяющим геотемпературы и время воздействия их на очаги генерации углеводородов, является тепловой поток кровли фундамента. Он служит основой для бассейнового моделирования при поисках и разведке. Вместе с тем известно, что корректно восстановить плотность глубинного теплового потока Земли, особенно на границе фундамента и осадочного чехла (кровли фундамента) – один из непростых, проблемных этапов моделирования [22–25].

В связи с этим на юго-востоке Западной Сибири, в пределах крупной зоны нефтенакопления (порядка 120 тыс. кв. км), выполнено картирование распределения плотности теплового потока кровли фундамента [26]. Карта с сечением изолиний 2 мВт/м² получена интерполяцией расчетных значений для разрезов 200 глубоких скважин (рис. 2, *a*).

Для исследований в «одном ключе» перспектив нефтегазоносности слабоизученной Бакчарской мезовпадины и участков предварительного прогноза Восточно-Пайдугинской мегавпадины далее выполнено построение и общий анализ карты плотности теплового потока кровли фундамента востока Томской области. Здесь в качестве подложки (рис. 3) для контуров районов исследований использована одна из последних карт, построенная в 1992 г. А.Д. Дучковым с коллегами, в изолиниях, с сечением 10 мВт/м². При построении этой карты анализировались пластовые температуры, полученные в глубоких скважинах.

Здесь нужно сказать, что для района Бакчарской мезовпадины и прилегающих к ней структур ранее выполнен предварительный прогноз нефтегазоносно-

сти доюрской коры выветривания. Осуществляются аналогичные корректно-уточняющие работы и на северо-востоке Томской области, приуроченные к Восточно-Пайдугинской мегавпадине и структурам ее обрамления, где прослеживается значительное увеличение мощности нижнеюрских отложений [27].



Рис. 2. Западная часть Томской области. Фрагмент схематической карты теплового потока кровли фундамента (a) в сопоставлении с положительными тектоническими элементами осадочного чехла (б): 1 – месторождения УВ; 2 – изолинии плотности теплового потока, мВт/м²; 3 – представительная скважина, использованная для палеотемпературного моделирования

Fig. 2. Western part of the Tomsk region. The fragment of the heat flow schematic map of the foundation roof (a) in comparison with the positive tectonic elements of the sedimentary cover (b): 1 – hydrocarbon deposits; 2 – isolines of heat flow density, mW/m²; 3 – representative well used for paleotemperature modeling



- Рис. 3. Схема теплового потока Западно-Сибирской плиты (по [28]). Показаны районы исследования запада и востока Томской области: 1 – изолинии плотности теплового потока, мВт/м²; 2 – граница Западно-Сибирской плиты; 3 – гидросеть. Западная часть Томской области [26] – в границах красного прямоугольника, восточная часть Томской области, настоящая работа – в границах синего прямоугольника
- Fig. 3. Heat flow scheme of the West Siberian Plate (according to [28]). The study areas of the west and east of the Tomsk region are shown: 1 – isolines of heat flow density, mW/m²; 2 – boundary of the West Siberian plate; 3 – river network. The western part of the Tomsk region [26] is within the boundaries of the red rectangle, the eastern part of the Tomsk region of this work is within the boundaries of the blue rectangle

Краткая характеристика района исследования

В структурах осадочного чехла [29] по кровле баженовской свиты в восточной части Томской области выделяются пять положительных (V – Александровский свод, II – Пайдугинский и I – Пыль-Караминский мегавалы, III – Владимировский и IV –Парабельский мегавыступы) и две отрицательные (II – Усть-Тымская и I – Восточно-Пайдугинская мегавпадины) структуры 1-го порядка, локализованные на северовостоке Томской области (рис. 4).



- Рис. 4. Восточная часть Томской области. Обзорная схема нефтегазоносности (на основе [29]): 1 месторождение VB и его название; 2 – глубокая скважина с признаками VB за пределами месторождений; 3, 4 – структуры осадочного чехла: 3 – положительная структура I-го порядка и ее условный номер: 1 – Пыль-Караминский мегавал; II – Пайдугинский мегавал; III – Владимировский мегавыступ; IV – Парабельский мегавыступ; V – Александровский свод; 4 – отрицательная структура I-го порядка и ее условный номер: 1 – Восточно-Пайдугинская мегавпадина; II – Усть-Тымская мегавпадина; 5 – отрицательная структура II-го порядка и ее условный номер: 1 – Бакчарская мезовпадина; 6 – прямые признаки нефтегазоносности в скважинах за пределами месторождений в юрском и доюрском НГК: непромышленный приток нефти (а), газа (b); запах нефти в керне (c); 7 – фрагменты зон Чузикского и Усть-Тымского грабен-рифтов раннемезозойского возраста
- Fig. 4. Eastern part of the Tomsk region. Overview scheme of oil and gas potential (based on [29]): 1 hydrocarbon deposit and its name; 2 deep well with signs of hydrocarbons outside the fields; 3, 4 structures of the sedimentary cover: 3 positive structure of the 1st order and its conditional number: I Pyl-Karamin megaswell; II Paidugin megaswell; III Vladimirov megaprotrusion; IV Parabel megaprotrusion; V Alexander swell; 4 negative structure of the I order and its conditional number: I East Paidugin megadepression; II Ust-Tym megadepression; 5 negative structure of the II order and its conditional number: 1 Bakchar mezodepression; 6 direct signs of oil and gas content in wells outside the fields in the Jurassic and pre-Jurassic oil and gas complex: non-commercial inflow of oil (a), gas (b); smell of oil in the core (c); 7 fragments of the Chuzik and Ust-Tym graben rifts zones of Early Mesozoic age

Условно район исследований можно разделить на две части: юго-восточную, приуроченную к структуре 2-го порядка – к Бакчарской мезовпадине и ее обрамлению, а также северо-восточную, в центре которой расположена Восточно-Пайдугинская мегавпадина, являющаяся в рельефе баженовского горизонта наиболее крупной и контрастной на востоке Томской области.

На тектонической карте фундамента востока Томской области [30] глубинные региональные разломы ограничивают крупные герцинские структуры. Весь район изучения условно можно разделить на четыре крупные зоны северо-западного простирания (с востока на запад): Алипский прогиб и Улуюльско-Среднечулымский, Тибинакский выступы салаирской складчатости, Пыль-Караминский мегаантиклинорий и Нарымско-Колпашевская внутренняя впадина раннегерцинской области. В исследуемом районе фиксируются фрагменты Усть-Тымского и Чузикского грабен-рифтов раннемезозойского возраста, имеющих северо-восточное направление. Фундамент локально прорван интрузивными образованиями преимущественно кислого и среднего состава.

Перед началом формирования осадочного чехла крупные блоки были разбиты массой разноориентированных разломов различной амплитуды. Дизъюнктивные дислокации закартированы на поверхности сейсмического горизонта Φ_2 (подошва юрских отложений).

По сравнению с промысловыми западными землями Томской области район исследований крайне неравномерно охвачен геофизическими работами, в том числе сейсморазведочными, с плотностью профилей метода общей глубинной точки (МОГТ) в восточной части, достигающей 0,4 км/км². Изученность района глубоким бурением также неравномерна и, соответственно, уменьшается с запада в восточном направлении. Стоит отметить, что наиболее погруженные участки Усть-Тымской мегавпадины изучены бурением слабо. Здесь пробурены три глубоких скважины на Толпаровской площади и две скважины на Вертолетной. В центральной части Восточно-Пайдугинской мегавпадины пробурена параметрическая скважина, расположенная в приподнятой части между понижениями рельефа.

Доюрский фундамент сложен геосинклинальными сланцевыми формациями, включая кремнистые, глинистые, карбонатно-глинистые и аспидные, возраст пород – от ордовика до перми. Промежуточный этаж сложен ранне-мезозойскими триасовыми вулканогенными породам основного состава, заполняющими грабен-рифты.

В осадочном чехле установлены юрская и меловая системы мезозоя, перекрытые кайнозойскими толщами. Юра представлена урманской, тогурской, салатской, тюменской, васюганской (наунакской), георгиевской и баженовской свитами. Наиболее полные разрезы вскрыты в пределах впадин. Особый интерес вызывает рассмотрение нижнеюрских горизонтов с пластами Ю₁₆₋₁₇ урманской свиты (*J*₁*ur*). На положительных структурах наблюдается выклинивание нижнеюрских свит, что значительно сокращает мощность осадочного чехла и его перспективы в отношении нефтегазоносности.

Считается, что основной нефтематеринской толщей для залежей в нижнеюрских базальных горизонтах осадочного чехла является нижнетоарская тогурская свита (J_1tg). На территории восточной части Томской области эти отложения имеют широкое распространение в наиболее погруженных участках.

Верхнеюрская баженовская свита (J_3bg) является нефтематеринской для отложений меловых и верхнеюрских коллекторов и распространена практически повсеместно в западной части района исследований. С запада на восток битуминозные глинистокремнистые породы свиты замещаются ее континентальными аналогами – марьяновской и максимоярской свитами – с низким содержанием орагнического вещества (OB).

Меловые отложения представлены нижнемеловыми куломзинской (K_1klm), тарской (K_1tr), киялинской (K_1kls), алымской (K_1a_{1-2}), покурской ($K_{1-2}pk$) и верхнемеловыми кузнецовской (K_2kz), ипатовской (K_2ip), славгородской (K_2sl) и ганькинской (K_2gn) свитами. Общая мощность стратиграфического уровня составляет порядка 2000 м.

Кайнозой представлен талицкой (Pg_1tl) , люлинворской (Pg_2ll) и чеганской $(Pg_{2-3}hg)$ свитами и перекрывающей их некрасовской серией (Pg_3nk) .

Месторождения нефти и газа открыты главным образом в западной части района исследования и приурочены к различным стратиграфическим уровням. Так, например, на Верхнекомбарском месторождении продуктивны палеозойские отложения, на Киев-Еганском залежи нефти широко приурочены к меловым пластам, а на Усть-Сильгинском и Линейном месторождениях промышленные скопления УВ выявлены в верхнеюрском НГК.

Притоки УВ отмечены в ряде скважин, не приуроченных к месторождениям (рис. 4). В скважине Куржинская 235 приток нефти получен при испытании киялинской свиты *неокомского нефтегазоносного комплекса*. Нефтепроявления в *отложениях верхней юры* выявлены в скважинах Линейная 2 и 5. Выявлены признаки нефти в керне в скважинах Парбигская 3 и Колпашевская 7. Непромышленный приток нефти получен при совместном опробовании *нижнеюрских и кровли палеозойских отложений* в скважине Крыловская 1.

Методика расчета плотности теплового потока

Таким образом, необходимым условием успешного освоения ТрИЗ является решение научной проблемы теоретического и экспериментального изучения термодинамики и вещественного состава палеозоя Западной Сибири. На решение этой проблемы и направлена настоящая работа. Ставится следующая задача: на базе палеотемпературного моделирования осадочного разреза 59 глубоких скважин определить распределение плотности глубинного теплового потока кровли фундамена. Для выполнения моделирования применялось ПО «ТерloDialog» [31, 32]. Исходными данными для модели (табл. 1) являются измеренные при опробованиях скважин пластовые температуры, а также снятые с диаграмм температурного градиента. Значения отражательной способности витринита и теплофизических свойств горных пород систематически пополняют базу данных ИНГТ им. А.А. Трофимука СО РАН аналитическими исследованиями под руководством А.Н. Фомина, А.Д. Дучкова [33]. Параметризация осадочного разреза определяется литолого-стратиграфическим разрезом скважины.

По итогам сопоставления показано [34], что «ТерloDialog» не уступает отечественным и зарубежным аналогам [35–40].

Определение величины плотности теплового потока из кровли фундамента осложняется учетом множества процессов, происходящих как в недрах, так и на поверхности Земли. Поэтому при расчетах применен интегральный подход, позволяющий учитывать эти процессы с помощью сопряженных структурнотектонических реконструкций [41–43].

Время и скорость осадконакопления вычисляются по возрасту пород, слагающих осадочный разрез, и временных диапазонов геохронологической шкалы им соответствующих. На основе этого создается литостратиграфическая разбивка с указанием седиментационных данных и теплофизических параметров свит. Эти параметры принимаются по известным результатам анализа керна и каротажным геофизическим материалам. Скорость осадконакопления может быть нулевой или отрицательной, что свидетельствует о возможности перерыва в осадконакоплении или денудации слоя.

Таблица 1. Пример сопоставления измеренных и расчетных температур в модели скважины Береговая параметрическая 1 (Б1п, рис. 5)

 Table 1.
 Example of measured and calculated temperatures comparison in the model of the well Beregovaya parametric 1 (*B*1n, Fig. 5)

		Тем	ъ			
Глубина, м Depth, m	Пластовая Formation	OCB ($R^{0}_{,w}$, %) Reflectivity of vitrinite	OFT General geothermal gradient	Модельная (расчетная) Model (calculated)	Pазница расчётной и измеренной Difference in calculated and measured	Тепловой поток, мВт/м ² /мощност осадочного разреза, м Неаt flow, mW/m ² /sedimentary section thickness, m
2415	83	-	-	80	-3	
2330	78	-		77	-1	
2500	-	-	81	82	+1	
2390	Ι	99(0,64)	-	96	-3	
2405	-	99(0,64)		96	-3	40/2576
2410	-	99(0,64)	-	97	-2	49/23/0
2449	-	99(0,64)	-	98	-1	
2560	_	103(0,68)	_	101	+2	
2573	2573 – 100(0,65)		-	102	+2	
«Невязка»/«True error», °С					±2	

Такая относительно простая модель вполне корректна для моделирования субгоризонтальнослоистого осадочного разреза Западной Сибири. Выбранный для проведения моделирования район приурочен к устойчивой территории Западно-Сибирской тектонической плиты, присутствие конвективной составляющей также влияет на расчет эффективного значения плотности теплового потока.

Для оценки достоверности результатов проведенного моделирования определяется «невязка» (величина согласованности) температур, определенных по ОСВ, и максимума расчетных геотемператур, полученных в результате моделирования. Аналогично вычисляется величина «невязки» пластовых и температур, определенных по ОГГ с максимальными расчетными значениями.

«Невязку» принято считать оптимальной, если среднеквадратическое отклонение расчетных и наблюденных геотемператур эквивалентно погрешности наблюдения. В данной работе статистически установленная погрешность наблюдений составляет порядка ± 2 °C и ей оптимально соответствуют «невязки» геотемператур (табл. 2).

В результате решения обратной задачи при совместном использовании температур, рассчитанных по ОСВ, и современных геотемператур выявлено, что для ряда скважин в северо-восточной части района «невязки» принимают значения выше оптимальной величины, поэтому тепловой поток кровли фундамента был определен дважды – отдельно с каждым типом температур. На карту по этим скважинам вынесены средние значения. Однако этот вопрос требует отдельной проработки, так как, вероятно, здесь имеет место проявление неизвестных перерывов осадконакопления и эрозии. Конечно, в дальнейшем необходимо изучить эту непростую проблему и решение о параметрах денудационных процессов учитывать в структуре модели [43–46].

Распределение плотности теплового потока кровли фундамента

Результаты дискретного цифрового моделирования в районе исследования представлены рассчитанными по принятой методике значениями теплового потока из кровли фундамента в 59 глубоких скважинах (табл. 2, рис. 5).

Методом интерполяции построена карта восточных районов (рис. 6) с перекрытием карты западной части Томской области из работы [26].

На карте наблюдаются следующие аномальные особенности: 2 крупные ярко-выраженные «положительные аномалии» и 1 относительно небольшая, 2 крупные «отрицательные» аномальные зоны с низкими значениями теплового потока кровли фундамента, а также «градиентные зоны», окаймляющие крупные аномалии.

На северо-западе локализована достаточно крупная положительная аномалия, приуроченная к Линейному (скв. Лин1) и Киев-Еганскому (скв. КЕЗ50) нефтяным месторождениям с максимальным значением плотности потока, равным 56 мВт/м².

Таблица 2. Восток Томской области. Фрагмент полного каталога, включающего 59 представительных скважин палеотемпературного моделирования

 Table 2.
 East of the Tomsk region. Fragment of the full catalog including 59 representative wells of paleotemperature modeling

№ п/п	Площадь (месторождение) и номер скважины Area (field) and well number	Условный индекс скважины (на рис. 5) Well conditional in- dex (in Fig. 5)	Мощность осадочного чехла, м Sedimentary cover thickness, m	«Невязка» расчетных и измеренных геотемператур, °С «True error» of calculated and measured geotemperatures, °С	Расчетный тепловой поток, мВт/м ² Estimated heat flow, mW/m ²
45	Соломбальская 2 Solombalskaya 2	Сол2**	3079	±2	52
46	Толпаровская 1 Tolparovskaya 1	To1	3237	±3	45
47	Тростниковая 281 Trostnikovaya 281	Tpc281	2815	±3	49
48	Тымская 1 опорная Tymskaya 1 key	Tlo	2921	±1	43
49	Усть-Сильгинская 30 Ust-Silginskaya 30	УС30	2429	±1	51
50	Усть-Сильгинская 31 Ust-Silginskaya 31	УС31	2413	0	53
51	Усть-Тымская 1 Ust-Tymskaya 1	УT1	2965	±2	49
52	Чимулякская 1 Chimulyakskaya 1	Чим1	2494	± 0	46
53	Чарусная 190 Charusnaya 190	Чар190	2997*	± 0	43
54	Чинжарская 1 Chinzharskaya 1	Чи1	2396	±3	58
55	Чинжарская 2 Chinzharskaya 2	Чи2	2467	±1	50
56	Чунжельская 1 Chunzhelskaya 1	Чун1	2917	0	45
57	Эмторская 303 Emtorskaya 303	Эм303	2605*	±3	53
58	Южно-Пыжинская пара- метрическая 1 Yuzhno-Pyzhinskaya parametric 1	ЮПы1п	3127	±2	56
59	Ярская 1 параметрическая Yarskaya 1 parametric	Яр1п	2528	±2	42

*вскрытая мощность осадочного чехла; **скважина расположена за пределами контура построенной карты распределения теплового потока кровли фундамента.

*discovered thickness of the sedimentary cover; **the well is located outside the contour of the constructed heat flow distribution map of the foundation roof.

В юго-западной части, в зоне аномально высоких значений теплового потока, расположены Парбигское (скважины Пар1, Пар2), Верхнекомбарское, Сатпаевское, Восточно-Верхнекомбарское (скважины ВК290, ГЯ5) и Селимхановское (скважина Сел5) месторождения – плотность теплового потока до 61–62 мВт/м². Аномальная зона простирается к центральной части территории исследования до Колпашевской структуры, где величина теплового потока изменяется от 48 до 52 мВт/м² (скважины К3, К7, К10п).

Пониженные значения теплового потока кровли фундамента преимущественно локализованы в северо-восточной части территории исследования. Минимальные значения в 33–36 мВт/м² фиксируются в скважинах Зап1 и Вез3п. Западная и восточная зоны пониженных значений теплового потока связаны с своеобразной «перемычкой», фиксируемой группой скважин (Па3, Нар2, То1, ВЗ60 и ВЗ62) со значениями плотности потока 47–48 мВт/м².

Ранее отмечалось [47], что на Западно-Сибирской плите в пределах положительных структур наблюдается повышение величин плотности теплового потока на 5-20 %, по сравнению с зонами отрицательных структур, тем большее, чем больше размеры этих структур. Как на западе Томской области, так и на востоке эта закономерность проявляется, но не всегда. По результатам исследования на востоке эта тенденция прослеживается значительно слабее. Действительно, при совместном анализе распределения плотности теплового потока и структурных элементов осадочного чехла в пределах Пайдугинского мегавала имеет место повышение величины плотности теплового потока. Однако совершенно отсутствует локали-Владимировского мегавыступа и Пыльзация Караминского мегавала (рис. 7).

При сопоставлении карт распределения значений теплового потока кровли фундамента запада и востока Томской области наблюдается хорошая согласованность в области перекрытия. При этом северная часть западного района, ранее охарактеризованная высокими значениями теплового потока, подтверждена значениями, полученными в ранее не учтенных в расчете скважинах (Лин1, Лин3, Эм330). Имеет место очень хорошая перспектива для построения карты плотности теплового потока кровли фундамента в целом Томской области на основе единой базы дискретных значений.

Важно отметить очень хорошую согласованность в области перекрытия карт западного и восточного районов Томской области (рис. 8).



Рис. 5. Восток Томской области: 1 – скважина палеотемпературного моделирования: в числителе – условный индекс скважины, в знаменателе – плотность теплового потока у подошвы осадочного чехла, мВт/м²

Fig. 5. East of the Tomsk region: 1 - well of paleotemperature modeling: in the numerator – the conditional index of the well, in the denominator – the heat flow density at the bottom of the sedimentary cover, mW/m²



Рис. 6. Восточная часть Томской области: 1 – месторождения УВ; 2 – скважина палеотемпературного моделирования; 3 – изолинии теплового потока кровли фундамента, мВт/м²

Fig. 6. Eastern part of the Tomsk region: 1 - hydrocarbon deposits; 2 - well of paleotemperature modeling; $3 - heat flow isolines of the foundation roof, mW/m^2$



Рис. 7. Восточная часть Томской области. Распределение плотности теплового потока кровли фундамента (а) в сопоставлении с тектоническими элементами осадочного чехла (б)

Fig. 7. Eastern part of the Tomsk region. Distribution of heat flow density of the foundation roof (a) in comparison with tectonic elements of the sedimentary cover (b)



Рис. 8. Согласованность карт распределения плотности теплового потока кровли фундамента западной и восточной частей Томской области; положения южного сектора Колтогорско-Уренгойского палеорифта (А), область распространения Усть-Тымского (Б) и фрагмент Чузикского (В) раннемезозойских грабен-рифтов

Fig. 8. Consistency of distribution maps of the heat flow density of the foundation roof of the Tomsk region western and eastern parts; positions of the Koltogor-Urengoy paleorift southern sector (A), distribution area of the Ust-Tym (Б) and fragment of the Chuzik (B) early Mesozoic graben rifts

Заключение

На северо-восточную часть перспективной территории Томской области, на базе расчетов 59 глубоких скважин, построена карта распределения плотности теплового потока кровли фундамента с сечением изолиний 2 мВт/м². Значения теплового потока получены по единой хорошо апробированной методике, основанной на решении обратной задачи геотермии.

По части постановки задачи выполненной научной работы решена известная доля научной проблемы теоретического и экспериментального изучения термодинамики верхней части палеозоя. Полученное дискретное распределение (по скважинам) и карта значений теплового потока из доюрского фундамента могут служить «каркасной основой» корректного бассейнового моделирования Бакчарского района исследований и слабоизученного крупного района Восточно-Пайдугинской мегавпадины.

Несомненный интерес будет представлять построенная на следующем этапе единая карта плотности теплового потока Томской области. Восточно-Пайдугинский район, учитывая низкие значения современного теплового потока, вероятно, мало перспективен по осадочному чехлу. Однако исследования витринита палеозойского разреза могут существенно расширить перспективы нефтегазоносности коры выветривания и верхних горизонтов палеозоя.

На исследуемой территории Томской области к кровле доюрского основания приурочены три грабенрифта. Этот факт представляет особый интерес. Повидимому, этот вопрос требует отдельного тщательного рассмотрения с выполнением совместного анализа тектоники и сводной кары теплого потока Томской области.

Не меньший теоретический и практический интерес представляет последующая оценка природы аномалий плотности теплового потока кровли фундамента осадочного чехла – дифференцированная оценка возможного влияния тектоники, вещественного состава и нефтегазоносности образований фундамента.

Авторы благодарят Ольгу Степановну Исаеву за предоставление открытых геолого-геофизических данных по глубоким скважинам и месторождениям.

Работа выполнена при поддержке проекта ФНИ № FWZZ-2022-0011.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Надежды в тумане. Перспективы стабилизации нефтяной отрасли оценивают осторожнее, чем раньше // Недра и ТЭКплюс Сибири. – 2021. – № 7. – С. 11–13.
- Мельник И.А. Причины образования нефтенасыщенных низкоомных коллекторов // Геология нефти и газа. – 2018. – № 6. – С. 129–136.
- Морозов Н.В., Беленькая И.Ю., Жуков В.В. 3D моделирование углеводородных систем баженовской свиты: детализация прогноза физико-химических свойств углеводородов // PROHEФТЬ. – 2016. – Вып. 1. – С. 38–45.
- Jarvie D.M. Shale resource systems for oil and gas. P. 2. Shale-oil resource systems // Shale reservoirs – giant resources for the 21st century: AAPG Memoir 97. – 2012. – P. 89–119.
- Проектная революция. Интервью с генеральным директором ПАО «Газпром нефть» М.М. Хасановым // Газпром. – 2018. – № 3. – С. 20–26.
- Карташов И. Палеозой может стать брендом области // Недра и ТЭКплюс Сибири. – 2021. – № 7. – С. 14–16.
- Алеева А.О., Исаев В.И., Лобова Г.А. Сравнительная геофизическая и петрофизическая характеристика юрских отложений как прогнозно-поисковый признак доюрских залежей углеводородов (Томская область) // Новые вызовы фундаментальной и прикладной геологии нефти и газа – ХХІ век: Материалы Всерос. науч. конф. с участием иностранных ученых, посв. 150-летию акад. АН СССР И.М. Губкина и 110-летию акад. АН СССР и РАН А.А. Трофимука. – Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2021. – С. 144–147.
- Некоторые вызовы и возможности для России и регионов в плане глобального тренда декарбонизации / Д.К. Нургалиев, С.Ю. Селивановская, М.В. Кожевникова, П.Ю. Галицкая // Георесурсы. – 2021. – № 23 (3). – С. 8–16.
- Методы увеличения нефтеотдачи на месторождениях Югры / С.Г. Кузьменков, Р.Ш. Аюпов, М.В. Новиков, В.И. Исаев, Г.А. Лобова, П.А. Стулов, В.С. Бутин, Е.О. Астапенко // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 4. – С. 96–106.
- Application of foam for gas and water shut-off: review of field experience / S.A. Zhdanov, A.V. Miyan, L.M. Surguchev, L.M. Castanier, J.E. Hanssen // European Petroleum Congress. – Milan, Italy: Society of Petroleum Engineers, 1996. – P. 377–388.
- 11. Romero-Zeron L. Chemical Enhanced Oil Recovery (cEOR). Practical Overview. –Fredericton: IntechOpen, 2016. – 200 p.
- Hascakir B. Introduction to thermal Enhanced Oil Recovery (EOR) // Journal of Petroleum Science and Engineering, special issue. – 2017. – V. 154. – P. 438–441.
- Standnes D.C., Skjevrak I. Literature review of implemented polymer field projects // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2014. – V. 122. – P. 761–775.
- Delamaide E. Comparison of steam and polymer injection for the recovery of heavy oil // SPE Western Regional Meeting. – Bakersfield, California, USA, 2017. – Paper SPE 185728.
- Саунин В.И., Шаламов М.А., Ягафаров А.К. Эффективность строительства и эксплуатации горизонтальных скважин на Самотлорском месторождении (пласт АВ 1/1-2 «рябчик») // Нефтепромысловое дело. – 2007. – № 11. – С. 59–62.
- Методика проектирования боковых стволов скважин на месторождениях Западной Сибири с учетом поздней стадии их разработки / Р.Р. Исхаков, С.А. Воронов, А.И. Ермолаев, В.В. Воронова // Нефтяное хозяйство. – 2012. – № 1. – С. 38–41.
- Ngozi Akangbou H., Burby M., Nasr Gh. Effectively optimizing production of horizontal wells in homogeneous oil reservoirs // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2017. – V. 150. – P. 128–136.
- Near-wellbore modeling of a horizontal well with Computational Fluid Dynamics / M.L. Szanyi, C.S. Hemmingsen, Wei Yan, J.H. Walther, S.L. Glimberg // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2018. – V. 160. – P. 119–128.
- Economides M., Oligney R., Valkó P. Unified fracture design: bridging the gap between theory and practice. – Alvin, Texas: Orsa Press, 2002. – 25 p.
- Fracability evaluation in shale reservoirs an integrated petrophysics and geomechanics approach / X. Jin, S.N. Shah, J. Roegiers, B. Zang // SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference. – Woodlands, TX, USA, 2014. – Paper SPE 168589.

- Зимин В. Легенда возвращается. «Кладовую» природных ресурсов России пополнит крупный федеральный проект // Недра и ТЭКплюс Сибири. – 2021. – № 10. – С. 6–8.
- 22. Горнов П.Ю., Гильманова Г.З. Тепловое поле и геотермические модели литосферы области перехода континент-океан Северо-Востока Евразии // Геология и геофизика. – 2018. – Т. 59. – № 8. – С. 1292–1303.
- Галушкин Ю.И. Моделирование осадочных бассейнов и оценка их нефтегазоносности. – М.: Научный Мир, 2007. – 456 с.
- 24. Hantschel T., Kauerauf A.I. Fundamentals of basin and petroleum systems modeling. Heidelberg: Springer, 2009. 476 p.
- Kutas R.I., Poort J. Regional and local geothermal conditions in the northern Black Sea // International Journal of Earth Sciences. – 2008. – V. 97. – № 2. – Р. 353–363.
 Крутенко Д.С., Исаев В.И., Кузьменков С.Г. Тепловой поток,
- Крутенко Д.С., Исаев В.И., Кузьменков С.Г. Тепловой поток, триасовая рифтовая система и мезозойско-кайнозойские разломы (юго-восток Западной Сибири) // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2021. – Т. 16. – № 2. – С. 1–24. URL: http://www.ngtp.ru/upload/iblock/db1/19_2021.pdf (дата обращения 15.12.2021).
- Тепловой поток и нефтегазоносность северо-восточной части Томской области / Г.А. Лобова, А.С. Меренкова, В.И. Исаев, С.Г. Кузьменков // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов – 2021. – Т. 332. – № 7. – С. 114–123.
- Западная Сибирь // Геология и полезные ископаемые России. В шести томах. Т. 2 / под ред. А.Э. Конторовича, В.С. Суркова. – СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2000. – 477 с.
- Конторович В.А. Тектоника и нефтегазоносность мезозойскокайнозойских отложений юго-восточных районов Западной Сибири. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. – 253 с.
- Сурков В.С., Жеро О.Г. Фундамент и развитие платформенного чехла Западно-Сибирской плиты. – М.: Недра, 1981. – 143 с.
- Обобщение стационарной задачи геотермии Рэлея-Тихонова для горизонтального слоя / В.И. Старостенко, Р.И. Кутас, В.Н. Шуман, О.В. Легостаева // Физика Земли. – 2006. – № 12. – С. 84–91.
- 32. Мезозойско-кайнозойский климат и неотектонические события как факторы реконструкции термической истории нефтематеринской баженовской свиты арктического региона Западной Сибири (на примере п-ва Ямал) / В.И. Исаев, А.А. Искоркина, Г.А. Лобова, В.И. Старостенко, С.А. Тихоцкий, А.Н. Фомин // Физика Земли. 2018. № 2. С. 124–144.
- 93. РИД «База данных тепловых свойств горных пород Сибирского региона РФ»: Регистрационное свидетельство № 2017621489 от 15.12.2017 г.
- 34. Прохорова П.Н., Развозжаева Е.П., Исаев В.И. Геотермия и оценка нефтегазового потенциала Буреинского бассейна (Дальний Восток России) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 1. –С. 65–76.
- Galushkin Y.I. Numerical reconstructions of thermal evolution of sedimentary cover and underlying lithosphere in western part of the South Caspian basin // Marine and Petroleum Geology. – 2017. – V. 88. – P. 1094–1108.
- 36. Геотермия арктических морей / М.Д. Хуторской, В.Р. Ахмежзянов, А.В. Ермаков, Ю.Г. Леонов, Л.В. Подгорных, В.Г. Поляк, Е.А. Сухих, Л.А. Цыбуля. – М.: ГЕОС, 2013. – 321 с.
- Глубинное строение и нефтегазоносность северо-восточной части Баренцевоморского шельфа / Д.С. Никитин, М.Д. Хуторской, Д.А. Иванов, П.П. Горских. – М.: ГЕОС, 2020. – 1147 с.
- Reconstruction of burial history, temperature, source rock maturity and hydrocarbon generation in the northwestern Dutch offshore / R.A. Fattah, J.M. Verweij, N Witmans., J.H. ten Veen // Netherlands Journal of Geosciences. – 2012. – V. 91. – № 4. – P. 535–554. DOI: https://doi.org/10.1017/S0016774600000378
- Heat flow evolution, subsidence and erosion in Upper Silesian Coal Basin, Czech Republic / E. Geršlová, M. Goldbach, M. Geršl, P. Skupien // International Journal of Coal Geology. – 15 January 2016. – V. 154–155. – P. 30–42.
- Yalcin M.N., Littke R., Sachsenhofer R.F. Thermal history of sedimentary basins. – Berlin: Springer Verlag, 1997. – 167 p.
- 41. Tissot B.P. Preliminary data on the mechanisms and kinetics of the formation of petroleum in sediments. Computer simulation of a reaction flowsheet // Oil & Gas Science and Technology – Rev.

IFP. – 2003. – V. 58. – No 2. – P. 183–202. DOI: https://doi.org/10.2516/ogst:2003013

- Handhal A.M., Al-Shahwan M.F., Chafeet H.A. Interpretation of hydrocarbon generation, migration and thermal history of Mesopotamian basin Southern Iraq based 1D Petromod software // Iraqi Geological Journal. – 2020. – V. 53. – № 1B. – P. 29–56.
- Исаев В.И., Волкова Н.А., Ним Т.В. Решение прямой и обратной задачи в условиях седиментации // Тихоокеанская геология. – 1995. – № 3. – С. 73–80.
- 44. A new geodynamical-thermal model of rift evolution, with application to the Dnieper-Donets Basin, Ukraine / V.I. Starostenko, V.A. Danilenko, D.B. Vengrovitch, R.I. Kutas, S.M. Stovba, R.A. Stephenson, O.M. Kharitonov // Tectonophysics. 1999. V. 313. № 1–2. P. 29–40.
- 45. Galushkin Yu. Non-standard problems in basin modelling. Switzerland: Springer, 2016. 274 p.
- 46. Towards stratigraphic-thermo-mechanical numerical modelling: Integrated analysis of asymmetric extensional basins / A. Balázs, L. Maţenco, D. Granjeon, K. Alms, T. François, O. Sztanó // Global and Planetary Change. – 2021. – V. 196. – Р. 1–21. URL: https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2020.103386 (дата обращения 15.12.2021).
- 47. Ермаков В.И., Скоробогатов В.А. Тепловое поле и нефтегазоносность молодых плит СССР. – М.: Недра, 1986. – 222 с.

Поступила 31.03.2022 г.

Информация об авторах

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

Лобова Г., доктор геолого-минералогических наук, независимый эксперт в области нефтегазовой геологии и геофизики.

Меренкова А.С., аспирант отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Осипова Е.Н., кандидат геолого-минералогических наук, старший преподаватель отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Кузьменков С.Г., доктор геолого-минералогических наук, профессор Института нефти и газа Югорского государственного университета.

Фомин А.Н., доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник ИНГГ им. А.А. Трофимука СО РАН.

UDC 553.98:551.763:550.836

HEAT FLOW DENSITY DISTRIBUTION MAP OF THE FOUNDATION ROOF IN THE EASTERN PART OF THE TOMSK REGION

Valery I. Isaev¹, isaevvi@tpu.ru

Galina Lobova², lobovaga@tpu.ru

Anna S. Merenkova¹, a.merenckowa@yandex.ru

Elizaveta N. Osipova¹, osipovaen@tpu.ru

Stanislav G. Kuzmenkov³, ksg.1948@yandex.ru

Alexander N. Fomin⁴,

FominAN@ipgg.sbras.ru

- ¹ National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.
- ² Independent expert in the field of oil and gas geology and geophysics, 25-25, Visagino street, Visaginas, 31102, Lithuania.
- ³ Yugra State University,
 16, Chekhov street, Khanty-Mansiysk, 628012, Russia.
- ⁴ Institute of Petroleum Geology and Geophysics named after A.A. Trofimuk SB RAS, 3, Ac. Koptyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

The relevance of studying the unallocated subsoil fund of the east of the Tomsk region is determined by the prospects and underexplored right bank of the Ob River. The subsoil user does not want to take risks there, the same about the State. However, oil companies will be forced to develop the eastern regions when production at the oil fields on the left bank drops to a critical level of profitability. A number of promising areas for exploratory drilling have already been identified on the right bank.

The main aim of the research of geologists and geophysicists in the oil industry in Western Siberia and in particular the Tomsk region is a significant increase in reserves and accordingly prevention of decline in oil production. This is the aim of the present work.

The objects of the study are hard-to-recover reserves which requires the solution of the scientific problem of theoretical and experimental study of thermodynamics and material composition of the Western Siberia Paleozoic. The key geodynamic parameter that determines geotemperatures and the time of its impact on the centers of hydrocarbon generation is the heat flow of the foundation roof. It serves as the basis for basin modeling in prospecting and exploration. The construction and general analysis of the heat flow density map of the foundation roof of the Tomsk region east were carried out for a joint study of the prospects for the oil and gas potential of the poorly studied Bakchar mezodepression and the areas of the preliminary forecast of the East Paidugin megadepression.

Methods. The original software «TeploDialog» was used to perform the simulation. This software package implements specially formulated direct and inverse geothermal problems under sedimentation conditions. Determining the value of the heat flow density from the roof of the foundation is complicated by taking into account many processes occurring both in the bowels and on the surface of the Earth. Therefore, an integral approach was used in the calculations, allowing these processes to be taken into account with the help of conjugated structural-tectonic reconstructions. The initial data for the model are reservoir temperatures measured during well testing, as well as taken from temperature gradient diagrams. The values of the reflectivity of vitrinite and the thermophysical properties of rocks systematically replenish the database of the IPGG named after A.A. Trofimuk SB RAS by analytical studies under the supervision of A.N. Fornin and A.D. Duchkov.

The result. The heat flow density map (in isolines through 2 mW/m²) from the base of the sedimentary section for the northeastern part of the Tomsk region was prepared on the basis of calculations of 59 parametric, reference and exploration wells. The heat flow values were obtained using a single well-tested method based on solving the inverse geothermal problem. In terms of setting the task of the completed scientific work, a certain part of the scientific problem of theoretical and experimental study of the upper part of the Paleozoic thermody-namics was solved. The resulting discrete distribution (by wells) and the map of heat flow values from the pre-Jurassic basement can serve as a base for correct basin modeling of the Bakchar study area and the poorly studied large area of the East Paidugin megadepression. This region is not promising in terms of the sedimentary cover taking into account the low values of the modern heat flow. However, the determination of the vitrinite reflectance index of the Paleozoic section can significantly expand the prospects for the oil and gas potential of the weathering crust and the upper horizons of the Paleozoic.

Conclusions. A unified map of the heat flow density of the foundation roof of the Tomsk region constructed at the next stage on the territory of which three graben rifts: Koltogor-Urengoy, Ust-Tym and Chuzik, were developed, will be the important result. This fact is of particular interest and requires separate careful consideration.

Key words:

Increase in hydrocarbon reserves on the lands of the east of the Tomsk region, heat flow density map from the basement roof, theoretical and experimental study of the Paleozoic thermodynamics and material composition.

The authors thank to Olga S. Isaeva for open geological and geophysical data on deep wells and deposits.

The research was supported by the FSR project no. FWZZ-2022-0011.

REFERENCES

- Nadezhdy v tumane. Perspektivy stabilizatsii neftyanoy otrasli otsenivayut ostorozhnee, chem ranshe [Hope is in the fog. The prospects for stabilizing the oil industry are being assessed more cautiously than before]. *Nedra i TEK^{plyus} Sibiri*, 2021, no. 7, pp. 11–13.
- Melnik I.A. Reasons for formation of low-resistivity oil saturated reservoirs. *Russian Oil and Gas Geology*, 2018, no. 6, pp. 129–136. In Rus.
- Morozov N.V., Belenkaya I.Yu., Zhukov V.V. 3D modeling of Bazhenov fm. hydrocarbon system: details of physicochemical properties of hydrocarbons prognosis. *PRONEFT*, 2016, no. 1, pp. 38–45. In Rus.
- Jarvie D.M. Shale resource systems for oil and gas. P. 2. Shale-oil resource systems. *Shale reservoirs – giant resources for the 21st century*: AAPG Memoir 97, 2012. pp. 89–119.
- Proektnaya revolyutsiya. Intervyu s generalnym direktorom PAO «Gazprom neft» M.M. Khasanovym [Design revolution. Interview with General Director of Gazprom Neft PJSC M.M. Khasanov]. *Gazprom*, 2018, no. 3, pp. 20–26.
- Kartashov I. Paleozoy mozhet stat brendom oblasti [Paleozoic can become a brand of the region]. *Nedra i TEK^{plyus} Sibiri*, 2021, no. 7, pp. 14–16.
- Aleeva A.O., Isaev V.I., Lobova G.A. Sravnitelnaya geofizi-7. cheskaya i petrofizicheskaya kharakteristika yurskikh otlozheniy kak prognozno-poiskovy priznak doyurskikh zalezhey uglevodorodov (Tomskaya oblast) [Comparison geophysical and petrophysical characteristics of Jurassic sediments as a predictive search feature of pre-Jurassic hydrocarbon deposits (Tomsk region)]. Novye vyzovy fundamentalnoy i prikladnoy geologii nefti i gaza – XXI vek. Materialy Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii s uchastiem inostrannykh uchenykh, posvyashchennoy 150-letiyu akademika AN SSSR I.M. Gubkins i 110-latiyu akademika AN SSSR i RAN A.A. Trofimuka [New Challenges in Fundamental and Applied Geology of Oil and Gas. XXI Century. Proc. of the All-Russian Scientific Conference with the Participation of Foreign Scientists, Dedicated to the 150th Anniversary of Acad. AS USSR I.M. Gubkin and the 110th anniversary of Acad. AS USSR and RAS A.A. Trofimuka]. Novosibirsk, CPI NSU Publ., 2021. pp. 144-147.
- Nurgaliev D.K., Selivanivskaya S.Yu., Kozhevnikova M.V., Galitskaya P.Yu. Some challenges and opportunities for Russia and regions in terms of the global decarbonization trend. *Geore*sursy, 2021, vol. 23 (3), pp. 8–16. In Rus.
- Kuzmenkov S.G., Ayupov R.Sh., Novikov M.V., Isaev V.I., Lobova G.A., Stulov P.A., Butin V.S., Astapenko E.O. Enhanced oil recovery nethods at fields of Yugra. *Bulletin of the Tomsk Politechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 4, pp. 96–106. In Rus.
- Zhdanov S.A., Miyan A.V., Surguchev L.M., Castanier L.M., Hanssen J.E. Application of foam for gas and water shut-off: review of field experience. *European Petroleum Congress*. Milan, Italy, Society of Petroleum Engineers, 1996. pp. 377–388.
- Romero-Zeron L. Chemical Enhanced Oil Recovery (cEOR). Practical Overview. Fredericton, IntechOpen, 2016. 200 p.
- Hascakir B. Introduction to thermal Enhanced Oil Recovery (EOR). Journal of Petroleum Science and Engineering, 2017, special issue, vol. 154, pp. 438–441.
- Standnes D.C., Skjevrak I. Literature review of implemented polymer field projects. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2014, vol. 122, pp. 761–775.
- Delamaide E. Comparison of steam and polymer injection for the recovery of heavy oil. SPE Western Regional Meeting. Bakersfield, California, USA, 2017. Paper SPE 185728.
- Saunin V.I., Shalamov M.A., Yagafarov A.K. Effektivnost stroitelstva i ekspluatatsii gorizontalnykh skvazhin na

Samotlorskom mestorozhdenii (plast AV 1/1-2 «ryabchik») [Efficiency of construction and operation of horizontal wells at the Samotlor field (formation AV 1/1-2 "grouse")]. *Oilfield Engineering*, 2007, no. 11, pp. 59–62.

- Iskhakov R.R., Voronov C.A., Ermolaev A.I., Voronova V.V. Methodical approaches of second wellbore designing at the last stage of Western Siberian fields development. *Neftyanoe Khozyaystvo – Oil Industry*, 2012, no. 1, pp. 38–41. In Rus.
- Ngozi Akangbou H., Burby M., Nasr Gh. Effectively optimizing production of horizontal wells in homogeneous oil reservoirs. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2017, vol. 150, pp. 128–136.
- Szanyi M.L., Hemmingsen C.S., Wei Yan, Walther J.H., Glimberg S.L. Near-wellbore modeling of a horizontal well with Computational Fluid Dynamics. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, vol. 160, pp. 119–128.
- Economides M., Oligney R., Valkó P. Unified fracture design: bridging the gap between theory and practice. Alvin, Texas, Orsa Press, 2002. 25 p.
- Jin X., Shah S.N., Roegiers J., Zang B. Fracability evaluation in shale reservoirs – an integrated petrophysics and geomechanics approaslide SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference. Woodlands, TX, USA, 2014. Paper SPE 168589.
- Zimin V. Legenda vozvrashchaetsya. «Kladovuyu» prirodnykh resursov Rossii popolnit krupny federalny proekt [The legend is back. Russia's «pantry» of natural resources will be replenished by a major federal project]. *Nedra i TEK^{plyus} Sibiri*, 2021, no. 10, pp. 6–8.
- Gornov P.Yu., Gilmanova G.Z. Thermal field and geothermal models of the lithosphere in the continent-ocean transition zone of northeastern Eurasia. *Russian Geology and Geophysics*, 2018, vol. 59, no. 8, pp. 1292–1303. In Rus.
- Galushkin Yu.I. Modelirovanie osadochnykh basseynov i otsenka ikh neftegazonosnosti [Modeling of sedimentary basins and assessment of its oil and gas potential]. Moscow, Nauchny Mir Publ., 2007. 456 p.
- 24. Hantschel T., Kauerauf A.I. Fundamentals of basin and petroleum systems modeling. Heidelberg, Springer, 2009. 476 p.
- Kutas R.I., Poort J. Regional and local geothermal conditions in the northern Black Sea. *International Journal of Earth Sciences*, 2008, vol. 97, no. 2, pp. 353–363.
- Krutenko D.S., Isaev V.I., Kuzmenkov S.G. Het flow, Triassic rift system and Mesozoic-Cenozoic faults (South-East of western Siberia). *Neftegazovaya Geologiya. Teoriya i Praktika*, 2021, vol. 16, no. 2. In Rus. Available at: http://www.ngtp.ru/rub/2021/ 19_2021.html (accessed 15 December 2021).
- Lobova G.A., Merenkova A.S., Isaev V.I., Kuzmenkov S.G. Heat flow and oil and gas presence of the Tomsk region north-eastern part. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets En*gineering, 2021, vol. 332, no. 7, pp. 114–123. In Rus.
- Zapadnaya Sibir [Western Siberia]. Geologiya i poleznye iskopaemye Rossii [Geology and minerals of Russia]. Eds. A.E. Kontorovich, V.S. Surkov. St. Petersburg, VSEGEI Publ. House, 2000. Vol. 2, 477 p.
- Kontorovich V.A. Tektonika i neftegazonosnost mezozoyskokaynozoyskikh otlozheniy yugo-vostochnykh rayonov Zapadnoy Sibiri [Tectonics and oil and gas potential of the Mesozoic-Cenozoic sediments of the Western Siberia southeastern regions]. Novosibirsk, SB RAS Publ., 2002. 253 p.
- Surkov V.S., Zhero O.G. Fundament i razvitie platformennogo chekhla Zapadno-Sibirskoy plity [Foundation and development of the platform cover of the West Siberian plate]. Moscow, Nedra Publ., 1981. 143 p.
- 31. Starostenko V.I., Kutas R.I., Shuman V.N., Legostaeva O.V. Generalization of the Rayleigh-Tikhonov stationary geothermal prob-

lem for a horizontal layer. Izvestiya. Physics of the Solid Earth, 2006, vol. 42, no. 12, pp. 1044–1050. In Rus.

- 32. Isaev V.I., Iskorkina A.A, Lobova G.A., Starostenko V.I., Tikhotskii S.A., Fomin A.N. Mesozoic-Cenozoic climate and Neotectonic events as factors in reconstructing the thermal history of the source-rock Bazhenov formation, Arctic region, West Siberia, by the Example of the Yamal Peninsula. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2018, vol. 54, no. 2, pp. 310–329. In Rus.
- Duchkov A.D., Sokolova L.S., Ayunov D.E. Baza dannykh teplovykh svoystv gornykh porod Sibirskogo regiona RF [Database of thermal properties of rocks of the Siberian region of the Russian Federation: The result of intellectual activity (RIA)]. Registration certificate RF no. 2017621489, 2017.
- 34. Prokhorova P.N., Razvozzhaeva E.P., Isaev V.I. Geothermy and estimation of hydrocarbon potential of the Bureya basin (Russian Far East). Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering, 2019, vol. 330, no. 1, pp. 65–76. In Rus.
- Galushkin Y.I. Numerical reconstructions of thermal evolution of sedimentary cover and underlying lithosphere in western part of the South Caspian basin. *Marine and Petroleum Geology*, 2017, vol. 88, pp. 1094–1108.
- Khutorskoy M.D., Akhmezhzyanov V.R., Ermakov A.V., Leonov Yu.G., Podgornykh L.V., Polyak V.G., Sukhikh E.A., Tsybulya L.A. *Geotermiya arkticheskikh morey* [Geothermy of the Arctic Seas]. Moscow, GEOS Publ., 2013. 321 p.
- Nikitin D.S., Khutorskoy D.A., Ivanov D.A., Gorskikh P.P. Glubinnoe stroenie i neftegazonosnost severo-vostochnoy chasti Barentsevomorskogo shelfa [Deep structure and oil and gas potential of the Barents Sea shelf north-eastern part]. Moscow, GEOS Publ., 2020. 1147 p.
- Fattah R.A., Verweij J.M., Witmans N., ten Veen J.H. Reconstruction of burial history, temperature, source rock maturity and hydrocarbon generation in the northwestern Dutch offshore. *Netherlands Journal of Geosciences*, 2012, vol. 91, no. 4, pp. 535–554. DOI: https://doi.org/10.1017/S0016774600000378

- Geršlová E., Goldbach M., Geršl M., Skupien P. Heat flow evolution, subsidence and erosion in Upper Silesian Coal Basin, Czech Republic. *International Journal of Coal Geology*, 2016, vol. 154–155, pp. 30–42. DOI: https://doi.org/10.1016/j.coal.2015.12.007
- Yalcin M.N., Littke R., Sachsenhofer R.F. Thermal history of sedimentary basins. Berlin, Springer Verlag, 1997. 167 p.
- Tissot B.P. Preliminary data on the mechanisms and kinetics of the formation of petroleum in sediments. Computer simulation of a reaction flowsheet. *Oil & Gas Science and Technology* Rev. IFP, 2003, vol. 58, no. 2, pp. 183–202. DOI: https://doi.org/10.2516/ ogst:2003013
- Handhal A.M., Al-Shahwan M.F., Chafeet H.A. Interpretation of hydrocarbon generation, migration and thermal history of Mesopotamian basin Southern Iraq based 1D Petromod software. *Iraqi Geological Journal*, 2020, vol. 53, no. 1B, pp. 29–56.
- 43. Isaev V.I., Volkova N.A., Nim T.V. Solution of direct and inverse sedimentation heat-flow problems. *Geology of the Pacific Ocean*, 1996, vol. 12, no. 3, pp. 523-536. In Rus.
- 44. Starostenko V.I., Danilenko V.A., Vengrovitch D.B., Kutas R.I., Stovba S.M., Stephenson R.A., Kharitonov O.M. A new geodynamical-thermal model of rift evolution, with application to the Dnieper-Donets Basin, Ukraine. *Tectonophysics*, 1999, vol. 313, no. 1–2, pp. 29–40.
- 45. Galushkin Yu. Non-standard problems in basin modelling. Switzerland, Springer, 2016. 274 p.
- 46. Balázs A., Maţenco L., Granjeon D., Alms K., François T., Sztanó O. Towards stratigraphic-thermo-mechanical numerical modelling: Integrated analysis of asymmetric extensional basins. *Global and Planetary Change*, 2021, vol. 196, pp. 1–21. Available at: https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2020.103386 (accessed 15 December 2021).
- Ermakov V.I., Skorobogatov V.A. *Teplovoe pole i neftegazonosnost molodykh plit SSSR* [Thermal field and oil and gas content of young plates of the USSR]. Moscow, Nedra Publ., 1986. 222 p.

Received: 31 March 2022.

Information about the authors

Valery I. Isaev, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Galina Lobova, Dr. Sc., independent expert in the field of oil and gas geology and geophysics.

Anna S. Merenkova, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

Elizaveta N. Osipova, Cand. Sc., senior lecturer, National Research Tomsk Polytechnic University.

Stanislav G. Kuzmenkov, Dr. Sc., professor, Yugra State University.

Alexander N. Fomin, Dr. Sc., senior researcher, Institute of Petroleum Geology and Geophysics named after A.A. Trofimuk SB RAS.

УДК 553.2:549.283 (571.56)

МИНЕРАЛОГИЯ РУД СОХАТИНОГО ЗОЛОТОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (СЕВЕРО-ВОСТОК АЗИИ, РОССИЯ)

Тимкин Тимофей Васильевич1,

timkin@tpu.ru

Ворошилов Валерий Гаврилович¹,

v_g_v@tpu.ru

Юркова Мария Викторовна¹, mvy5@tpu.ru

Mansour Ziaii²,

m.ziaii47@gmail.com

- ¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.
- ² Шахрудский технологический университет, Иран, 3619995161, Болвар Данешка, Шахруд.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью расширения минерально-сырьевой базы действующих золотодобывающих предприятий Восточной Якутии и Магаданской области.

Цель: изучение минералогии руд Сохатиного золоторудного месторождения и установление последовательности минералообразования.

Методы: топоминералогическое картирование руд и метасоматитов; изучение прозрачных, прозрачно-полированных и полированных шлифов (Carl Zeiss Axio Imager.A2m.); сканирующая электронная микроскопия с локальным энергодисперсионным анализом (TESCAN VEGA 3 SBU с ЭДС OXFORD X-Max 50); рентгенодифракционный анализ (Rigaku Ultima IV), массспектрометрический с индуктивно связанной плазмой анализ, геофизические (каппаметрия).

Результаты. Установлено, что гипогенная золоторудная минерализация на месторождении Сохатиное представлена жильно-прожилковыми телами кварц-карбонат-сульфидного состава, приуроченными к зонам мезотермальных метасоматитов пропилит-березитового ряда. Минерализация развивается на сопряжении пологопадающих надвиговых зон и крутопадающих поперечных разрывов. Вмещающая среда представлена метаморфитами фации зеленых сланцев: амфибол-биотитполевошпатовыми и мусковит-кварцевыми спанцами, подвергшимися процессам пропилитизации. В результате проведенных исследований изучен минералогический состав руд и метасоматитов, определена последовательность рудоотложения; проведено морфологическое описание самородного золота; выявлены новые минералы (аркубисит, селеноаркубисит, висмутин, сервеллеит, матильдит, шапбахит, науманнит, клаусталит, гессит), не описанные на Сохатином месторождении ранее. Отложение рудных минералов шло в три ступени, которым соответствуют следующие минеральные ассоциации: 1) кварцкарбонат-барит-пиритовая; 2) золото-полиметаллическая; 3) золото-висмут-теллуридная. Концентрация золота возрастает от ранних парагенезисов к поздним. В гипергенных условиях вдоль рудных зон сформировались линейные коры выветривания глинистого состава с максимальными концентрациями золота. Золото в окисленных рудах более высокопробное, в значительной степени очищенное от примесей серебра и других элементов.

Ключевые слова:

Золото, месторождение Сохатиное, минералогия руд, метасоматиты, линейные коры выветривания.

Введение

За последние десятилетия орогенные, или так называемые «мезотермальные», месторождения золота в метаморфических поясах привлекли значительный интерес из-за их широкого геологического распространения и существенного вклада в структуру запасов и прогнозных ресурсов золота [1–6]. Все эти месторождения относятся к золото-кварцевой и золоторедкометальной формациям согласно региональным классификациям [7]. На территории России одной из перспективных для поисков и разработки коренных месторождений золота является Верхояно-Колымская провинция, где сосредоточены многочисленные месторождения золота [8]. Это объясняется тем, что геодинамическая обстановка орогенеза является наиболее продуктивной в плане формирования уникальных рудных объектов (Бендиго, Калгурли, Колар, Сухой Лог, Мурунтау, Аляска-Джуно, Джеймстаун, Наталка и др.) [1, 4, 9]. Верхояно-Колымский ороген пережил сложную историю субдукции, аккреции и столкновений, неоднократные импульсы магматизма и метаморфизма и формирование крупных месторождений золота (Базовское, Бадран, Дражное, Мало-Тарынское, Хангаласское, Наталка, Павлик, Родионовское) [10]. В целом на объектах Приколымского террейна, как и на других мезотермальных месторождениях золота северо-востока Азии, оруденение золота является гидротермальным, с обязательным структурным рудоконтролирующим фактором пересечения зон надвигов и секущих структур, и широко проявленными поздними золото-висмут-теллуридными минеральными ассоциациями [11].

Типичным представителем таких объектов является Сохатиное золоторудное месторождение. Оно располагается на границе республики Саха (Якутия) и Магаданской области (рис. 1), в пределах Верхне-Индигирского горнопромышленного района, что является благоприятным фактором для освоения месторождения. Геолого-поисковыми работами в период 1990–1995 гг. на территории Сохатиного рудного поля были выявлены промышленные месторождения (Сохатиное, Восточное), связанные с околорудными метасоматитами пропилит-березитового ряда, а также ряд мелких проявлений и точек минерализации золота. Большинство золоторудных месторождений Восточной Якутии и Магаданской области, приуроченных к зонам сопряжения надвигов и секущих рудоконтролирующих структур, являются потенциальными объектами промышленного освоения [11-14]. Однако на многих из них, включая месторождение Сохатиное, условия локализации и вещественный состав руд изучены недостаточно, что сдерживает их освоение и определяет актуальность выполненных исследований.

Целью данной работы является изучение минералогии гидротермально-метасоматических образований Сохатиного месторождения и установление последовательности отложения золотоносных минеральных ассоциаций для уточнения вопросов генезиса и оптимизации технологии переработки руд.

Геологическое строение

В регионально-геологическом плане Сохатиное рудное поле приурочено к Шаманихо-Столбовскому рудно-россыпному золотоносному району, который в минерагеническом отношении входит в состав синаккреционного Яно-Колымского мегапояса [15, 16]. В геотектоническом отношении район исследования принадлежит Приколымскому поднятию (террейну) пассивной континентальной окраины, сложенному терригенно-карбонатными и вулканогенными толщами, накопленными в интервале от раннего протерозоя до позднего мела [16].

Месторождение Сохатиное расположено в центральной части одноименного рудного поля (рис. 1). В строении месторождения принимают участие метаморфические сланцы сохатинской толщи раннепротерозойского возраста (PR₁sh) мусковит-кварцевого и амфибол-биотит-полевошпатового состава, подвергшиеся на территории рудного поля интенсивному воздействию гидротермальных процессов пропилитберезитового ряда. Магматические образования представлены силлами метатрахириодацит-трахириолитпорфиров зурнинского комплекса (тλξPR1zr) и дайками микродолеритов грязнинского комплекса (vJ₃gr) [16, 17]. Структурная обстановка месторождения обусловлена интенсивным развитием разрывных нарушений в сочетании с крупными пликативными структурами. Складчатые структуры толщ кристаллических сланцев имеют сложные формы, для них характерны крупные размеры и в основном пологие углы залегания. Разрывная тектоника мезозойского возраста повсеместно развита на территории месторождения Наиболее ранние дизъюнктивы северовосточного и северо-западного простираний относятся, соответственно, к сдвиговому и сбросовому кинетическим типам.



Рис. 1. Схема геологического строения Сохатиного месторождения (a) и карта магнитного поля (b): 1 – кварцмусковитовые сланцы (PR₁sh₄); 2 – эпидот-амфибол-полевошпатовые и эпидот-хлорит-полевошпаткварцевые сланцы (PR₁sh₂); 3 – силлы метатрахириодацит-трахириолит-порфиров (τλζPR₁zr); 4 – дайки долеритов (vJ₃gr); 5 – области распространения метасоматитов пропилит-березитового типа; 6 – первичный ореол золота (>0,1 г/т); 7 – геологические границы; 8 – разрывные нарушения; 9 – пологопадающие надвиги; 10 – линия разреза на рис. 3

Fig. 1. Geological scheme (a) and magnetic field map (b) of the Sokhatiny deposit: 1 – quartz-muscovite schist (PR₁sh₄); 2 – epidote-amphibole-feldspar and epidote-chlorite-feldspar-quartz schists (PR₁sh₂); 3 – rhyodacitis and rhyolite sills (τλζPR₁zr); 4 – dikes of dolerites (vJ₃gr); 5 – propylitic and sericitic (phyllic) alteration; 6 – primary gold halo (>0,1 ppm); 7 – geological boundaries; 8 – faults; 9 – gently dipping thrust faults; 10 – section line in Fig. 3

Более молодые субширотные разрывы пересекают их, формируя сбросы и надвиги [11, 18]. Зоны надвигов состоят из серии пологих разломов с общим падением плоскостей смещения на север. К ним приурочены гидротермально-метасоматические образования, вмещающие золоторудную минерализацию в участках сопряжения надвигов с сериями крутопадающих разрывов северо-западного и субширотного простираний (рис. 1, 3).

На месторождении широко развиты гипергенные процессы, которые проявились в образовании линейных кор выветривания вдоль зон тектонических нарушений [19, 20].

Лицензией на геологическое изучение и разведку золота в Сохатином рудном поле владеет ООО «Дюамель» (учредитель – «Золотой Актив», г. Москва). В 2018 г. компанией были завершены геологоразведочные работы на участке Сохатиный, и в 2019 г. начата опытно-промышленная эксплуатация месторождения.

В ходе геологоразведочных работ на Сохатином месторождении были выявлены три рудных тела. Пространственно они соотносятся с областями развития метасоматитов. Рудные тела приурочены к сопряжению крутопадающих трещин с благоприятными в структурном отношении пологими надвиговыми структурами.

Для руд месторождения характерна следующая геохимическая специализация: Au-Ag-Pb-Bi-Cu-As-Zn-Te-Cd.

Фактический материал и методы исследования

Минералогия руд и метасоматитов изучалась по образцам из разведочных канав и керна поисковооценочных скважин. Петрографические описания пород и руд проводилась методом оптической микроскопии на тонких срезах образцов горных пород, выполненных в лаборатории отделения геологии НИ ТПУ (г. Томск) с использованием микроскопа Carl Zeiss Axio Imager.A2m. Химический состав минералов определялся методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) с использованием микроскопа Tescan Vega 3 SBU (Чехия, TESCAN), оснащенного рентгеновским энергодисперсионным детектором Oxford X-Max 50 (EDX) с Si/Li кристаллическим детектором. Ускоряющее напряжение для СЭМ съемки и анализа составляло 20 кВ с интенсивностью тока зонда в пределах 4...11,5 нА. Локальный рентгеноспектральный анализ выполнялся с предварительной калибровкой интенсивности зонда (11,4...11,5 нА) по кобальтовому стандарту при рабочем (фокусном) расстоянии 15 мм. СЭМ фотографии накапливались для двух основных детекторов: вторичных электронов (SE – secondary electrons) и обратно-рассеянных электронов (BSE – backscattered electrons) в лаборатории отделения геологии (НИ ТПУ, г. Томск, аналитик Т.Ю. Якич). Объемный минералогический состав образцов определялся В Томском научноисследовательском и проектном институте нефти и газа с помощью рентгеновского дифрактометра Rigaku Ultima IV, оснащённого источником излучения Cu-Ka при токе 30 мА и напряжении рентгеновской трубки 40 кВ. Предварительно подготовленные препараты сканировались в интервале углов 20 3...65° с шагом 0,02° и скоростью сканирования 1°/мин. Содержания микроэлементов в подготовленных пробах получены методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (химико-аналитический центр «Плазма», г. Томск, аналитики – Т.А. Филипас, А.Н. Маковенко). Магнитная восприимчивость (MS) измерялась с помощью каппометра КТ-10 фирмы ТеггаPlus, позволяющего проводить замеры с чувствительностью $1 \cdot 10^{-6}$ единиц СИ с хранением данных и последующей загрузкой на ПК. Для точных измерений определения проводились на плоских спилах керна скважин.

Результаты и обсуждения

Гидротермально-метасоматический этап

В пределах месторождения рудовмещающие породы представлены хлорит-кварцевыми, хлоритэпидот-кварцевыми и мусковит-серицит-кварцевыми сланцами, являющимися продуктами воздействия гидротермальных растворов на исходные кристаллические сланцы амфибол-биотит-полевошпатмусковит-кварцевого состава. Относительно слабо измененные породы с сохранившимися первичными темноцветами и полевыми шпатами встречаются только на значительном удалении от рудных зон. Более устойчивый в условиях кислотного выщелачивания мусковит частично сохраняется вплоть до внутренних зон березитов, где он в итоге тоже может полностью заместиться серицитом.

Наиболее ранними гидротермальными процессами являются изменения пропилитового типа, выражающиеся в эпидотизации и хлоритизиции вмещающих пород. К метасоматитам данного типа тяготеет магнетитовая минерализация и рассеянная сульфидная вкрапленность, по-видимому, завершавшая этот процесс. В целом пропилиты фиксируют достаточно обширную область гидротермальной проработки пород, внутри которой локализуются околорудные березиты и золотое оруденение [14, 21, 22]. Околорудные метасоматиты представлены кварц-серицитовыми березитами, которые приурочены к тектоническим нарушениям и содержат в себе большое число кварцевожильных образований. Мощность березитовых зон может достигать первых десятков метров.

Состав березитов и количественные соотношения новообразованных минералов в существенной степени определяются не только интенсивностью процесса, но и характером вмещающих пород. В той или иной мере новообразованные хлорит, карбонат и серицит могут присутствовать в разных зонах метасоматической колонки березитов, тем не менее в ее строении можно уверенно выделить три зоны – внутреннюю, промежуточную и внешнюю. Во внешних зонах березитов происходит избирательная переработка породы с замещением основных породообразующих минералов хлоритом, который в промежуточной зоне интенсивно замещается анкеритом (рис. 2, *a*, *b*).



Рис. 2. Зоны колонки березитов (фото в проходящем свете): а – внешняя хлоритовая, b – промежуточная карбонатная, с – внутренняя кварц-серицитовая; Ank – анкерит, Chl – хлорит, Ser – серицит, Qz – кварц

Fig. 2. Zones of the beresite column (photo in reflected light): a - outer chlorite, b - intermediate carbonate, c - inner quartz-sericite; Ank is ankerite, Chl is chlorite, Ser is sericite, Qz is quartz

По мере приближения к внутренней зоне колонки, насыщенной кварцевыми прожилками, в метасоматитах исчезают хлорит и карбонат, при этом увеличивается количество серицита и кварца. Во внутренних зонах структура и текстура первичных пород сменяется типичной лепидогранобластовой структурой метасоматитов, породы приобретают массивное строение, светло-серую окраску и нередко сложены только кварц-серицитовым агрегатом (рис. 2, *c*).

Первичные руды представляют собой системы сопряженных пологопадающих и крутопадающих жильно-прожилковых тел карбонат-кварцевого состава с неравномерно распределенной сульфидной минерализацией в пределах зон березитизации.

Вкрапленность раннего, практически не золотоносного, пирита широко развита далеко за пределами березитовых тел и связана, по нашему мнению, с завершением пропилитизации. Это явление чрезвычайно важно в качестве поисковой предпосылки для оконтуривания возможных золоторудных зон по данным магниторазведки.

Для оценки воздействия метасоматических процессов на магнитные свойства пород нами измерена магнитная восприимчивость образцов керна поисково-оценочных скважин [23, 24].

Результаты измерений показали, что магнитность пород в целом отражает их основность: породы, содержащие биотит, хлорит и эпидот, более магнитны, чем кварцево-гидрослюдистые породы. По скважинам отмечается сопряженность между аномальными концентрациями P, V, Fe, Mn, Zn, Co, Ni и участками повышенной магнитной восприимчивости. Однако количественная взаимосвязь данных параметров не является прямо-пропорциональной. Участки наиболее интенсивной пропилитизации сопровождаются сульфидной вкрапленностью и обладают низкой магнитной восприимчивостью.



Рис. 3. Принципиальная схема распределения метасоматитов и руд (a) и магнитная восприимчивость пород (b) в разрезе по линии скважин 6–3–1–2 Сохатиного месторождения: 1 – пропилитизация; 2 – околорудные березиты с золото-сульфидно-кварцевой минерализацией; 3 – области аномального накопления золота, включая рудные тела; 4 – граница основных надвиговых перемещений; 5 – крутопадающие рудоконтролирующие нарушения

Fig. 3. Schematic diagram of the distribution of metasomatites and ores (a) and magnetic susceptibility in the section along the line of holes 6–3–1–2 of the Sokhatiny deposit: 1 – propylitic; 2 – sericitic (phyllic) alteration with gold-sulfidequartz mineralization; 3 – areas of development of gold-bismuth-telluride mineralization; 4 – boundary of major thrust movements; 5 – steeply falling ore-controlling faulting

Максимально магнитными являются породы на фронте пропилитизации, в которых процесс замещения амфиболов и биотита эпидотом и хлоритом, сопровождающийся вкрапленностью новообразованного магнетита, еще не завершился. С возрастанием интенсивности процесса магнетит замещается пиритом. Магнитная восприимчивость пород при этом резко снижается, а концентрация золота в метасоматитах постепенно возрастает. Таким образом, в масштабах месторождений периферия зон пропилитизации характеризуется повышенной магнитностью, а в центральных частях, где развиты золотоносные березиты, породы практически немагнитны (рис. 3, *b*). На карте магнитного поля минерализованные зоны и рудоконтролирующие разломы также отчетливо фиксируются интенсивными знакопеременными аномалиями на фоне достаточно спокойного поля неизмененных пород (рис. 1, *b*). Данный факт может служить критерием для поисков золоторудных месторождений и оценки их масштабов. Отсутствие внутриминерализационных даек, приуроченность разновременных рудных минералов к одним и тем же структурам, единство околорудного метасоматоза березитового типа при наличии одной волны эволюции кислотности-щелочности растворов – все это не позволяет разделять березит-сульфидную минерализацию на стадии в понимании этого термина Д.С. Коржинским и его последователями [25]. Выделенные рудные ассоциации мы параллелизуем со ступенями минерального равновесия в пределах единой березит-сульфидной стадии рудоотложения.

Этап Stages	Гидротермально-метасоматический Hydrotermal-metasomatic						Гиперген- ный	
Стадии Substages	Пропи Pro	ілитовая pylitic	Березит-сульфидная Sericitic (phyllic)-sulhide					alteration
Ассоциации Mineral Minerals Acconutation	I	II	ш	IV	v	VI	Пострудная Post-ore	
Кварц / Quartz						1		
Эпидот / Epidote						1		
Серицит / Sericite		1		4		ļ		
Хлорит / Chlorite						1		
Карбонаты / Carbonates			• • • • • • • • • • • • • • • • • • •					
Магнетит / Magnetite		+						
Гематит / Hematite			-	l		1		
Барит / Barite		1			-			
Пирит / Pyrite		1				I		
Арсенопирит / Arsenopyrite		1		1		1		
Сфалерит / Sphalerite		1		Ì		i		
Пирротин / Pyrrhotite		1			—			
Халькопирит / Chalcopyrite		i		Ì		i		
Галенит / Galena		1						
Золото / Native gold		1		i		i —		
Виттихенит / Wittchenite		1						
Айкинит / Aikinite		1		i		i —		
Михараит / Miharaite		1						
Аркубисит / Arcubisite		1		Ì		i —		
Se-аркубисит / Se-arcubisite								
Гессит / Hessite		1		l.		i —		
Висмутин / Bismuthinite		1		1		—		
Матильдит / Matildit		1		I		i —		
Шапбахит / Schabachite		1				_		
Науманнит / Naumannite		1		i		i —		
Сервеллит / Cervelleite		1		I				
Борнит / Bornite	·	1				1		-
Ковеллин / Covellite		1		1		1		
Халькозин / Chalcocite		1		I		1		
Малахит / Malachite		1		1		l		2.
Азурит / Azurite		1		l		i I		
Ярозит / Jarosite		1		[1		
Лимонит / Limonite		1		Ì		1		-
Монтмориллонит /		1		1		1		
Functionite		1		1		1		
Каолинит / Kaolinite		1				1		
Тектонические подвижки /		A	^				•	

Рис. 4. Схема последовательности минералообразования Сохатиного месторождения. Минеральные ассоциации: I – эпидот-хлоритовая; II – кварц-кальцитовая; III – кварц-карбонат-серицитовая (березитовая); IV – кварцкарбонат-барит-пиритовая; V – золото-полиметаллическая (1-я продуктивная); VI – золото-висмуттеллуридная (2-я продуктивная). Толщина линии указывает на относительную распространенность минералов

Fig. 4. Sequence of mineral formation in Sokhatiny deposit. Mineral associations: I – epidote-chlorite; II – quartz-calcite; III – quartz-carbonate-sericitic (phyllic); IV – quartz-carbonate-barite-pyrite; V – gold-polymetallic; VI – goldbismuth-telluride. The line thickness marks the relative abundance of minerals



- Рис. 5. Минеральные ассоциации Сохатиного месторождения (изображения в обратно рассеянных электронах): а) микровключения барита (Brt) в анкерит (Ank)-кварцевом (Qz) прожилке, вместе с пиритом (Py); b, c) включение пирротина (Po) в пирите (Py), обрастающее золотом (Au1); d) включения и прожилки галенита-1 (Gn1) вместе с арсенопиритом (Apy), сфалеритом (Sp) и кварцем (Qz) в пирите (Py); e) кварц (Qz)-анкерит (Ank)-галенит (Gn1)халькопиритовый (Ccp-1) агрегат, цементирующий раздробленные зерна пирита (Py); f) галенит-2 (Gn2) с гесситом (Hs) замещают зерно халькопирита-1 (Ccp-1); g) галенит-2 (Gn2) и аркубисит (Arc) в зальбандах анкеритовых (Ank) прожилков, секущих халькопирит-1 (Ccp-1); h) галенит-2 (Gn-2) в ассоциации с виттихенитом (Wit) и михараитом (Mh), цементирующие пирит (Py) и халькопирит-1 (Ccp-1); i) вкрапления шапбахита (Sch), виттихенита (Wit) и айкинита (Aik) в ассоциации с поздними халькопиритом-2 (Ccp2) и галенитом-2 (Gn2) в анкерит (Ank)-кварцевом(Qz) прожилке; j) галенит (Gn2)-гесситовые (Hs) прожилки в халькопирите-1 (Ccp-1); k) пересечение и замещение халькопирита-1 (Ccp-1) агрегатом зерен галенита-2 (Gn2), виттихенита (Wit) и науманнита (Nm); l) выделения сервеллеита (Crv) среди вкрапленников галенита-2 (Gn2), замещающего пирит (Py)
- Fig. 5. Mineral assemblages of the Sokhatiny deposit (backscattered electron images): a) microinclusions of barite (Brt) in ankerite (Ank)-quartz (Qz) veinlet, together with pyrite (Py); b, c) inclusion of pyrrhotite (Po) in pyrite (Py) overgrown with gold (Au1); d) inclusions and veinlets of galena-1 (Gn1) together with arsenopyrite (Apy), sphalerite (Sp) and quartz (Qz) in pyrite (Py); e) quartz (Qz)-ankerite (Ank)-galena (Gn1)-chalcopyrite (Ccp-1) aggregate cementing crushed pyrite (Py) grains; f) galena-2 (Gn2) with hessite (Hs) replace the grain of chalcopyrite-1 (Ccp-1); g) galena-2 (Gn2) and arcubisite (Arc) in selvedges of ankerite (Ank) veinlets intersecting chalcopyrite-1 (Ccp-1); h) galena-2 (Gn-2) in association with wittichenite (Wit) and miharaite (Mh), cementing pyrite (Py) and chalcopyrite-1 (Ccp-1); i) inclusions of schapbachite (Sch), wittichenite (Wit), and aikinite (Aik) in association with late chalcopyrite-2 (Ccp2) and galena-2 (Gn2) in an ankerite (Ank)-quartz (Qz) veinlet; j) galena (Gn2)-hessite (Hs) veinlets in chalcopyrite-1 (Ccp-1); k) intersection and replacement of chalcopyrite-1 (Ccp-1) by an aggregate of grains of galena-2 (Gn2), wittichenite (Wit) and naumannite (Nm); l) segregation of servelleite (Crv) among phenocrysts of galena-2 (Gn2) replacing pyrite (Py)

В пределах Сохатиного месторождения нами выделяются следующие минеральные ассоциации: І эпидот-хлоритовая и II кварц-кальцитовая, характеризующие пропилитовую стадию; III кварц-карбонатсерицитовая, IV кварц-карбонат-барит-пиритовая, V золото-полиметаллическая (1-я продуктивная), VI золото-висмут-теллуридная (2-я продуктивная), которые вместе с пострудными кварц-карбонатными прожилками объединяются нами в березитсульфидную стадию (рис. 4) [26]. В коре выветривания развиты гипергенные минералы, в том числе вторичное золото.

Рассмотрим парагенезисы продуктивной березитсульфидной стадии минерализации.

Квари-карбонат-барит-пиритовая минеральная ассоциация (ступень равновесия) вскрыта на месторождении практически всеми поверхностными горными выработками и скважинами и пользуется наибольшим распространением. Основными нерудными минералами являются кварц и карбонаты, реже барит. Кварц имеет, как правило, серый цвет. Структура его равномернозернистая с ровной или зубчатой границей зерен. Текстура обычно массивная, микродрузовидная. Карбонат, наряду с кварцем, слагает основной объем жильных образований и представлен анкеритом. В кварц-карбонатных прожилках, а также в интерстициях пирита, нередки включения реликтовых минералов вмещающих пород и метасоматитов: рутила, циркона, монацита, апатита, хлорита. Барит встречается либо в виде сыпи включений среди кварца и анкерита (рис. 5, а), либо слагает самостоятельные прожилки мощностью в первые сантиметры.

Единственный сульфидный минерал данной ассоциации – пирит. Он отмечается в кварцево-карбонатных жилах и прожилках в виде гипидиоморфных агрегатов, часто раздробленных и сцементированных более поздними минералами. Внутреннее строение кристаллов пирита в изломе слабо раковистое, часто зернистое, иногда встречаются фрамбоидальные образования пирита. В зависимости от преобладающего развития граней в комбинациях кристаллов выделено 5 морфологических типов кристаллов (МТК) пирита: преобладающий кубический (70-100 %), реже - пентагондодекаэдрический (0-23 %) и куб-пентагондодекаэдрический (0-23 %) и в единичных случаях - куб-октаэдрический и пентагоноктаэдрический. Кубические кристаллы чаще всего хорошо образованы, с равномерно развитыми и блестящими гранями (100), покрытыми очень тонкой, нередко многоцентровой штриховкой роста. Содержания золота минимальны в пирите кубического габитуса и возрастают пропорционально увеличению доли пентагондодекаэдрических и куб-пентагондодекаэдрических типов кристаллов, что характерно для всех гидротермальных месторождений золота [27].

Продуктивность кварц-карбонат-барит-пиритовой минеральной ассоциации крайне низкая, только при наложении минералов золото-полиметаллической ассоциации золотоносность пирита резко возрастает, что прямо связано с механическими включениями позднего золота (рис. 5, *b*, *c*; 6, *a*–*c*).

Золото-полиметаллическая ассоциация является самой продуктивной на золото, ореолы ее распространения определяют контуры рудных тел. Этот парагенезис максимально развит в центральной части месторождения и постепенно выклинивается к флангам. Представлен в виде прожилково-жильных образований, иногда в виде околожильной вкрапленности сульфидов в метасоматитах. Непосредственно в жилах и прожилках сульфиды встречаются в виде редкой рассеянной вкрапленности или гнездообразных агрегатов. Под микроскопом видно, что минералы золото-полиметаллической ассоциации цементируют раздробленные зерна пирита, проникают в них по трещинам и заполняют межзерновые пространства ранней пиритовой ассоциации (рис. 5, e).

Формирование золото-полиметаллической ассоциации начинается с пирротина. Единичные выделения этого минерала встречены в интерстициях зерен пирита (рис. 5, b). Взаимоотношений с другими минералами не установлено, но ассоциация с нарастающим на его гранях золотом позволяет отнести пирротин, с учетом его химического состава, к началу золотополиметаллической ступени отложения (рис. 5, c).

Не менее редким минералом руд является арсенопирит. Встречен в виде единичных выделений в пирите, совместно со сфалеритом и галенитом-1, что, собственно, и позволяет отнести его к началу той же ступени минерализации (рис. 5, *d*). Характерно, что в геохимическом поле аномалии мышьяка очень тесно коррелируются с Au, Ag, Bi, Pb, Cu.

Одним из главных минералов золото-полиметаллической ассоциации является халькопирит-1. Он встречается в виде вкрапленности и линзочек в кварце и карбонате, а чаще всего совместно с галенитом-1 цементирует катаклазированные зерна пирита (рис. 5, e).

Галенит-1 по степени распространения практически не уступает халькопириту-1. Встречается в виде вкрапленности в пирите и кварцево-карбонатных прожилках, микропросечек, секущих минералы ранних ассоциаций (рис. 5, *d*, *e*). В пространственном распределении галенита и халькопирита можно отметить латеральную зональность: галенит преобладает в западной части месторождения, халькопирит – в восточной.

Сфалерит встречается в рудах крайне редко, образуя тонкую рассеянную вкрапленность в пирите, вместе с галенитом-1 (рис. 5, d).

Минералы золото-висмут-теллуридной ассоциации выявлены только с помощью электронно-зондового микроанализа. Пространственно они тяготеют к участкам сопряжения пологих и крутопадающих структур, то есть к наиболее золотоносным частям рудных тел. Главный представитель этого парагенезиса – галенит-2, постоянно ассоциирующий с комплексом минералов теллуридно-сульфид-сульфосольного ряда: виттихенитом, айкинитом, висмутином, аркубиситом, селеноаркубиситом, сервеллеитом, матильдитом, михараитом, шапбахитом, науманнитом, гесситом, клаусталитом (рис. 5, таблица).

Большая часть этих минералов, в том числе очень редкий минерал сервеллеит, впервые открытый и зарегистрированный в 1986 г. [28], выявлена на месторождении впервые. Отдельные минералы обогащены, относительно теоретических формул, медью и свин-

цом, что можно связывать с наличием микропримесей замещаемых минералов: халькопирита-1 и галенита-1.

Минерал	Виттихенит	Айкинит	Аркубисит	Селенаркубисит	Висмутин	Михараит
Mineral	Wittikhenite	Aikinit	Arcubisite	Se-Arcubisite	Bismuthinite	Miharaite
S	19,73	17,42	14,1	12,69	17,71	20,25
Fe	-	1,23	-	0,62	2,73	6,29
Cu	38,1	20,54	10,07	11,32	0,87	25,83
Se	-	-	-	3,66	1,47	-
Ag	-	-	57,1	55,59	-	-
Te	-	-	1,82	0,99	-	-
Pb	-	25,19	-	-	-	24,84
Bi	40,67	35,62	17,03	15,15	72,94	20,07
Сумма/Total, %	99,48	100	100	100	96,89	97,28
Формула теоретическая Theoretical formula	Cu ₃ BiS ₃	CuPbBiS ₃	Ag ₆ CuBiS ₄	Ag ₆ CuBi(S,Se) ₄	Bi ₂ S ₃	PbCu₄FeBiS ₆
Формула фактическая Actual formula	Cu _{2.9} Bi _{0.95} S ₃	$Cu_{1.06}Pb_{1.34}Bi_{0.93}S_3$	$Ag_{6.3}Cu_{1.74}Bi_{0.7}S_{4.5}$	$\begin{array}{c} Ag_{5.2}Cu_{1.8}Bi_{0.7} \\ (S,Se_{0.54,})_4 \end{array}$	$Bi_{1.9}S_3$	Pb _{1.2} Cu _{3.86} Fe _{1.07} Bi _{0.9} S ₆
Минерал	Сервеллеит	Матильдит	Науманнит Nau-	Шапбахит	Клаусталит	Гессит
Mineral	Cervelleite	Matildite	mannite	Schapbachite	Clausthalite	Hessite
S	5,91	12,67	1,47	12,76	-	0,4
Fe	-	3,7	0,49	-	2,07	-
Cu	6,33	3,38	1,9	6,33	2,66	-
Se	0,71	4,24	22,1	4,92	24,99	-
Ag	67,72	21,26	72,85	17,3	-	62,44
Te	22,87	-	1,19		-	35,22
Pb	-	-	-	24,6	67,96	1,71
Bi	-	36,41	-	34,09	-	-
Сумма/Total, %	103,54	100	100		97,68	100
Формула теоретическая Theoretical formula	Ag ₄ TeS	AgBiS ₂	Ag ₂ .Se	PbAg ₂ Bi ₂ S ₅	PbSe	Ag ₂ Te
Формула фактическая Actual formula	(Ag _{3.4} Cu _{0.54})Te _{0.97} S	AgBiS ₂	Ag _{2.4} Se	Pb _{1.5} Ag ₂ Bi ₂ Cu _{0.25} S ₅	Pb _{1,04} Se	Ag _{2.09} Te

Таблица.Химический состав минералов золото-висмут-теллуридной ассоциации (мас. %)Table.Chemical composition of Bi-Te-minerals association (wt. %)

Минералы этого комплекса обычно нарастают на кристаллы более ранних сульфидов и проникают в них по трещинам, но контакты часто размытые, что указывает на замещение ранних минералов, в первую очередь, халькопирита-1 (рис. 5, f, h, k). Галенит-2 и аркубисит часто приурочены к зальбандам анкеритовых прожилков, секущих халькопирит-1, демонстрируя зональность отложения (рис. 5, g). Халькопирит-2 в этом парагенезисе является одним из самых редких минералов и встречен лишь в виде очень мелких единичных включений.

Секущих взаимоотношений между минералами внутри данной ступени не установлено, что расценивается нами как их близодновременное отложение. Можно лишь предположить более длительный период отложения галенита-2 в сравнении с остальными минералами ассоциации.

Характерной особенностью Сохатиного месторождения является наличие в составе золото-висмуттеллуридной минерализации только сульфовисмутитов и полное отсутствие сульфосолей на основе сульфоарсенитовой и сульфоантимонитовой составляющих (блеклых руд, энаргита, прустита, пираргирита и др.). Столь же показательно постоянное накопление здесь примесей селена вплоть до образования собственных минералов (науманнит, клаусталит, селенаркубисит). Гидрогеохимические аномалии селена установлены даже в водотоках, дренирующих Сохатиное месторождение. Вместе с галенитом-2 и другими минералами поздней ассоциации часто встречается золото, что указывает на ее золотоносность.

Самородное золото является главным минералом, определяющим промышленную ценность руд Сохатиного месторождения. В гидротермальном процессе золото отлагалось в двух продуктивных минеральных ассоциациях. По нашим наблюдениям и данным предыдущих исследований [19] морфологически зерна золота можно разделить на три группы: 1) комковидноизометричные; 2) удлиненные и 3) сложной формы. Первые представлены комковатыми и объемными золотинками; вторые – уплощенно-удлиненными, пластинчатыми; последние – проволочковидными и крючковатыми. В количественном отношении комковидноизометричная форма золотин является преобладающей.

Основное количество самородного золота связано с сульфидами. По времени отложения выделяется две генерации гипогенного золота. Золото-1 чаще всего наблюдается совместно с халькопиритом-1 и галенитом-2 в прожилках, цементирующих раздробленные зерна пирита (рис. 6, d). Золото-1 в пирите присутствует и отдельно, в виде механической примеси (рис. 6, a), но в большинстве случаев связь этих выделений с галенит-халькопиритовой минерализацией все-таки устанавливается (рис. 6, b, c). Пирит, видимо, служил химически благоприятной средой для осаждения золота.

Золото-2 вместе с галенитом-2, виттихенитом и другими минералами поздней ассоциации обрастает зерна халькопирита-1 и проникает по трещинам в него и более ранние минералы (рис. 6, e, f).

Цвет золота соломенно-желтый, иногда с бронзовым оттенком, реже – бледно-желтый. Встречаются зерна как с сильным блеском, так и матовые. Основной примесью в золоте является серебро, доля которого меняется от 7 до 38 %. Как золото-1, так и золото-2 имеют достаточно широкий диапазон изменения пробы. В тех случаях, когда генерация золота под микроскопом устанавливается однозначно, золото-1 имеет диапазон колебаний пробы от 662 до 920 ‰ (среднее 788 ‰), золото-2 – от 636 до 832 ‰ (среднее 734 ‰).



Рис. 6. Формы выделения золота и взаимоотношения с другими минералами: Au1 – золото-1, Au2 – золото-2, Py – пирит, Gn1 – галенит-1, Gn2 – галенит-2, Ccp1 – халькопирит-1, Wit – виттихенит, Qz – кварц, Ch1 – хлорит, Ank – анкерит; a–d – фото, e–f – изображение в обратно рассеянных электронах

Fig. 6. Forms of gold precipitation and relationships with other minerals: Au1 – gold-1, Py – pyrite, Gn1 – galena-1, Gn2 – galena-2, Ccp1 – chalcopyrite-1, Wit – wittihenite, Qz – quartz, Chl – chlorite, Ank – ankerite; a–d – photo, e–f – image in backscattered electrons

Тенденция снижения пробы прослеживается, но статистически значимого различия между золотом-1 и золотом-2 не устанавливается. Средняя проба по всем замерам гипогенного золота составляет 744 ‰, что говорит в пользу того, что в рудах преобладает золото-2.

Гипергенный этап

Образование минералов в гипергенный этап связано с преобразованием продуктов гидротермальнометасоматического этапа в результате просачивания вдоль ослабленных зон по трещинам поверхностных вод, обогащенных кислородом [20, 29]. Наиболее неустойчивыми являются карбонаты – анкерит, сидерит и кальцит, за ними следуют основные сульфиды: халькопирит, пирит, галенит. Относительно устойчивы к выветриванию кварц и барит.

Пирит обычно замещается аморфными агрегатами гидроокисидов железа – гетитом и гидрогетитом, в конечном итоге – рыхлым лимонитом. Замещение халькопирита гипергенными минералами обычно сопровождается образованием зональных агрегатов со структурой краевых каемок. Сначала по халькопириту образуется борнит, затем – ковеллин и халькозин, в приповерхностных условиях – карбонаты меди (малахит и азурит). Халькопирит наименее устойчивый из всех сульфидов, тем не менее полное его замещение наблюдается далеко не всегда, в большинстве образцов сохраняется до 50 % халькопирита (рис. 7, *a*). Более устойчивый галенит в зоне окисления замещается церусситом, сфалерит – смитсонитом.

Проба золота из зоны окисления – от 788 до 920 ‰ (в среднем 858 ‰), примеси представлены только серебром. Статистическая значимость отличия по составу гипергенного золота от гипогенного устанавливается с доверительной вероятностью 99,99 %. Окисленное золото, таким образом, облагорожено за счет процессов химического растворения и переотложения первичного золота, с выносом серебра. Существенных различий в морфологических особенностях и размерности гипогенного и гипергенного золота на сегодняшний день не установлено.

Характерными новообразованными минералами гипергенного этапа являются каолинит и монтмориллонит. *Каолинит* встречается в виде бесцветных тонкочешуйчатых и пластинчатых агрегатов, образует прожилковидные или гнездообразные тонкозернистые (<0,01 мм) скопления. Мощность прожилков составляет 1–2 мм. Корродирует кварц, карбонаты и

минералы ранних метасоматитов (рис. 7, *b*). В свою очередь каолинит сечется прожилками позднего гипергенного карбоната, являющегося типичным минералом золотоносных кор выветривания [30–35]. Содержание каолинита достигает 30 % и более в близповерхностных условиях, с глубиной резко снижается до 1–5 %, в интервале 30–40 м и глубже практически исчезает. Это не подтверждает точку зрения геологов, проводивших поисковые работы, о существовании на месторождении аргиллизитов [19]. Вероятнее всего, линейные коры выветривания являются остатками мощных, ныне эродированных, площадных кор выветривания, формировавшихся в регионе с палеоцена по миоцен [20].



Рис. 7. Новообразованные минералы в зоне окисления Сохатиного месторождения: а) замещение халькопирита (Ccp1) борнитом (Bn) и халькозином (Cct) со структурой краевых каёмок; b) образование каолинита (Kln) по трещинкам и в межзерновом пространстве с замещением карбоната (Cb); Gn1 – галенит-1; Ру – пирит; Qz – кварц

Fig. 7. Newly formed minerals in the oxidation zone of the Sokhatiny deposit: a) replacement of chalcopyrite (Ccp1) by bornite (Bn) and chalcocite (Cct) with the border structure; b) formation of kaolinite (Kln) along cracks and in the intergranular space with replacement of carbonate (Cb); Gn1 – galena-1; Py – pyrite; Qz – quartz

Монтмориллонит образуется по эпидотхлоритовым метасоматитам (пропилитам) и рудам в зонах выветривания. По рентгенофазовому анализу количество монтмориллонита в зоне окисления может достигать 28 %, с глубиной он исчезает.

В целом окисление руд начинается с появления каолинита (1–2 %) и частичного замещения мусковита гидрослюдой (иллитом). Затем начинается окисление сульфидов, количество глинистых минералов возрастает до 20–30 % и более. В участках максимального окисления первичные минералы, за исключением кварца, почти полностью замещены каолинитом, монтмориллонитом, ярозитом, гипсом, иллитом. При этом валовый химический состав окисляющихся руд существенно не меняется.

Заключение

Проведенными исследованиями установлено, что гипогенная золоторудная минерализация на месторождении Сохатиное представлена жильнопрожилковыми телами кварц-карбонат-сульфидного состава, приуроченными к зонам метасоматитов пропилит-березитового ряда. Минерализация развивается на сопряжении пологопадающих надвиговых зон и

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Orogenic gold deposits: a proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types / D. Groves, R. Goldfarb, M. Gebre-Mariam, S. Hagemann, F. Robert // Ore Geology Reviews. – 1998. – V. 13. – № 1–5. – P. 7–27.
- 2. Gold deposits in metamorphic belts: overview of current understanding, outstanding problems, future research, and exploration

крутопадающих поперечных разрывов. Вмещающая среда представлена пропилитизированными кристаллическими сланцами нижнего протерозоя.

В формировании гидротермальных образований выделено две стадии: пропилитовая и березитсульфидная с сопряженным золотым оруденением.

Изучен минеральный состав руд, и определена последовательность рудоотложения; проведено описание состава самородного золота; выявлены новые минералы (аркубисит, селеноаркубисит, висмутин, сервеллеит, матильдит, шапбахит, науманнит, клаусталит, гессит), не описанные ранее на Сохатином месторождении. Отложение рудных минералов шло в три ступени, которым соответствуют следующие минеральные ассоциации: 1) кварц-карбонат-баритпиритовая; 2) золото-полиметаллическая; 3) золотовисмут-теллуридная. Концентрация золота возрастает от ранних парагенезисов к поздним.

В гипергенных условиях вдоль рудных зон сформировались линейные коры выветривания с максимальными концентрациями золота. Золото в окисленных рудах более высокопробное, в значительной степени очищенное от примеси серебра.

significance / D. Groves, R. Goldfarb, F. Robert, C.J.R. Hart // Economic Geology. – 2003. – V. 98. – No1. – P. 1–29.

- Structural geometry of orogenic gold deposits: Implications for exploration of world-class and giant deposits / D. Groves, M. Santosh, R.J. Goldfarb, L. Zhang // Geoscience Frontiers. – 2018. – V. 9. – № 4. – P. 1163–1177.
- Goldfarb R.J., Groves D.I. Orogenic gold: common or evolving fluid and metal sources through time // Lithos. – 2015. – V. 233. – P. 2–26.

- Chen Y.J. Orogenic-type deposits and their metallogenic model and exploration potential // Geology in China. – 2006. – V. 33. – № 6. – P. 1181–1196.
- Goryachev N.A., Pirajno F. Gold deposits and gold metallogeny of Far East Russia // Ore Geology Reviews. – 2014. – V. 59. – P. 123–151.
- Горячев Н.А. Геология мезозойских золото-кварцевых жильных поясов Северо-Востока Азии. – Магадан: Изд-во СВКНИИ ДВО РАН, 1998. – 210 с.
- Савчук Ю.С., Волков А.В. Крупные и суперкрупные орогенные золотые месторождения: геодинамика, структура, генетические следствия // Литосфера. – 2019. – Т. 19. – № 6. – С. 813–833.
- Goldfarb R.J., Phillips G., Nokleberg W. Tectonic setting of synorogenic gold deposits of the Pacific Rim // Ore Geology Reviews. 1998. – V. 13. – № 1–5. – P. 185–218.
- Fridovsky V.Y. Structural control of orogenic gold deposits of the Verkhoyansk-Kolyma folded region, northeast Russia // Ore Geology Reviews. – 2018. – V. 103. – P. 38–55.
- Глухов А.Н. Тектонические факторы рудогенеза докембрийских террейнов на примере Приколымского поднятия и Омолонского массива (Северо-Восток Азии) // Вестник СПбГУ. Науки о Земле. – 2019. – Т. – 64. – № 2. – С. 219–248.
- Шпикерман В.И. Домеловая минерагения Северо-Востока Азии. – Магадан: Изд-во СВКНИИ ДВО РАН, 1998. – 333 с.
- Глухов А.Н. Геологическое строение и состав руд золоторудного месторождения Надежда // Отечественная геология. – 2013. – № 4. – С. 7–17.
- Глухов А.Н., Савва Н.Е., Колова Е.Е. Вещественный состав и генезис золотых руд месторождения Надежда, Магаданская область // Руды и металлы. – 2016. – № 4. – С. 60–71.
- Горячев Н.А. Происхождение золото-кварцевых жильных поясов Северной Пацифики. – Магадан: Изд-во СВКНИИ ДВО РАН, 2003. – 143 с.
- Глухов А.Н. Медное и полиметаллическое оруденение Приколымского террейна и его генетическая типизация // Литосфера. – 2019. – Т. 19. – № 5. – С. 717–730.
- Глухов А.Н. Геохимическая специализация верхнепротерозойских комплексов Приколымского террейна // Тихоокеанская геология. – 2014. – Т. 33. – № 3. – С. 29–38.
- Тектонофизические критерии геодинамической эволюции Приколымского террейна (Северо-Восток России) / А.Н. Глухов, А.С. Гладков, Д.А. Кошкарев, О.В. Лунина // Геодинамика и тектонофизика. – 2012. – Т. 3. – № 4. – С. 361–375.
- Протопопов Г.Х. Первые находки рудного золота в Шаманихо-Столбовском золотороссыпном районе Северо-Востока России // Отечественная геология. – 1994. – № 9. – С. 31–32.
- Глухов А.Н., Калинин Ю.А., Буляков Г.Х. Коры выветривания Глухаринского рудно-россыпного узла (Приколымское поднятие, Северо-Восток Азии) и их золотоносность // Литология и полезные ископаемые. – 2020. – № 5. – С. 461–484.
- Метасоматизм и метасоматические породы / С.С. Абрамов, О.В. Андреева, В.А. Жариков, Г.П. Зарайский, А.А. Маракушев, Б.И. Омельяненко, Н.Н. Перцев, К.В. Подлесский, И.Т. Расс, В.Л. Русинов. – М.: Научный мир, 1998. – 492 с.
- 22. Петрографический кодекс России. Магматические, метаморфические, метасоматические, импактные образования / В.В. Жданов, А.Е. Костин, Е.А. Кухаренко, Э.А. Ланда, Л.И. Лукьянова, В.Л. Масайтис, З.Д. Москаленко, Ю.Д. Пушкарев, Л.Н. Шарпенок. – СПб: Изд-во ФГБУ «ВСЕГЕИ», 2009. – 160 с.

- 23. Mineralogical, chemical and micromorphological studies of the argillic alteration zone of the epithermal gold deposit Ovacik, Western Turkey: tools for applied and genetic economic geology / H.G. Dill, R. Dohrmann, S. Kaufhold, G. Çiçek // Journal of Geochemical Exploration. 2015. V. 148. P. 105–127.
- chemical Exploration. 2015. V. 148. Р. 105–127.
 24. Гаврилов Р.Ю., Синкина Е.А., Мицых С.Н. Метод каппаметрии как прогнозно-поисковый критерий золотого оруденения // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328. № 3. С. 106–116.
- 25. Korzhinskii D.S. The theory of metasomatic zoning // Mineralium Deposita. 1968. V. 3. № 3. P. 222–231.
- 26. Юркова М.В. Минералогия руд Сохатиного месторождения (Республика Саха) // Минерально-сырьевая база алмазов, благородных и цветных металлов – от прогноза к добыче. Сборник тезисов докладов I Молодежной научно-образовательной конференции ЦНИГРИ. – М., 19–21 февраля 2020. – М.: ЦНИГРИ, 2020. – С. 225–227.
- Пириты золоторудных месторождений (свойства, зональность, практическое применение) / А.Ф. Коробейников, В.А. Нарсеев, А.Я. Пшеничкин, П.С. Ревякин. – М.: ЦНИГРИ, 1993. – 213 с.
- Criddle A.J., Chicholm J.E., Cervelleite S.C.J. Ag4TeS, a new mineral from the Bambolla mine, Mexico, and a description of a photochemical reaction involving cervelleite, acanthite, and hessite // European Journal of Mineralogy. – 1989. – V. 1. – P. 371–380.
- Supergene remobilization of Au in Au-bearing regolith related to orogenic deposits: a case study from Kazakhstan / Y.A. Kalinin, G.A. Palyanova, E.A. Naumov, K.R. Kovalev, F. Pirajno // Ore Geology Reviews. – 2019. – V. 109. – P. 358–369.
- Минерально-геохимическая зональность золотоносных кор выветривания Томь-Яйского междуречья / О.М. Янченко, В.Г. Ворошилов, Т.В. Тимкин, М. Зиаии // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 2. – С. 83–94.
- Морфология и состав золота кор выветривания Томь-Яйского междуречья / О.М. Янченко, В.Г. Ворошилов, Т.В. Тимкин, И.В. Мартыненко, М. Зиаии // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 3. – С. 84–92.
- 32. Характер распределения фосфатов в золотоносных корах выветривания Томского района / О.М. Янченко, Т.В. Тимкин, В.Г. Ворошилов, Т.Ю. Якич, М. Зиаии // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 9. – С. 74–91.
- Петрохимическая характеристика кор выветривания Ольховско-Чибижекского района / И.В. Мартыненко, В.Г. Ворошилов, Т.В. Тимкин, М. Зиаии // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 12. – С. 136–144.
- 34. Геохимические критерии выявления коллекторов и прогноза их нефтегазоносности в терригенных отложениях Пур-Тазовской нефтегазоносной области / Е.Р. Исаева, В.Г. Ворошилов, Т.В. Тимкин, М. Зиаии // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 4. – С. 132–141.
- Pshenichkin A., Timkin T., Oskina Y. Noble metals in rocks and ores of Maysko-Lebed ore field (Mountain Shoriya) // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2015. – V. 24. – P. 1–6.

Поступила 25.03.2022 г.

Информация об авторах

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

Ворошилов В.Г., доктор геолого-минералогических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Юркова М.В., аспирант отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Mansour Ziaii, PhD, доцент Шахрудского технологического университета.

UDC 553.2:549.283 (571.56)

ORE MINERALOGY OF SOKHATINY GOLD DEPOSIT (NORTHEAST ASIA, RUSSIA)

Timofey V. Timkin¹, timkin@tpu.ru

Valery G. Voroshilov¹, v_g_v@tpu.ru

Maria V. Yurkova¹, olmininayanchenko@mail.ru

Mansour Ziaii²,

m.ziaii47@gmail.com

- National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.
- ² Shahrood University of Technology, Bolvar Daneshka, Shahrood, 3619995161, Iran.

The relevance of the study is caused by the need to expand the mineral resource base of operating gold mining enterprises in Eastern Yakutia and the Magadan region.

The main aim: to study the material composition of the ores of the Sokhatiny gold ore deposit and to establish the sequence of mineral formation.

The methods: topomineralogical mapping of ores and metasomatites; study of transparent, transparent-polished and polished thin sections; scanning electron microscopy (TESCAN VEGA 3 SBU OXFORD X-Max 50); X-ray diffraction analysis (Rigaku Ultima IV), ICP-MS, geophysical (kappametry).

Results. It was established that the gold ore mineralization at the Sokhatiny deposit has a hydrothermal-metasomatic and hypergenic genesis. In the first case, vein-veinlet bodies of a quartz-carbonate-sulfide composition were formed, confined to the zones of circum-ore beresitization rocks. In the second, there was a transformation of the products of the hydrothermal-metasomatic stage under the influence of exogenous factors. The metasomatic processes in the field are manifested in the form of areal propylization and beresitization of the host metamorphic shale rock. As a result of mineralogical and mineralografic research methods, the material composition of ores was studied in detail and the sequence of ore deposition was determined; a morphological description of native gold was carried out; new minerals were identified that were not previously described at the Sokhatiny deposit. The deposition of ore minerals went in three stages, which correspond to the following mineral associations: 1) quartz-calcite-barite-pyrite; 2) gold-polymetallic; 3) gold-bismuth-telluride. Based on the names, it follows that increased concentrations of gold are confined to later steps. In oxidized ores, native gold is also noted, which in its morphological parameters does not differ from primary one. The oxidation zone is characterized by low levels of addition of silver and other elements in gold, due to chemical dissolution in surface conditions.

Key words:

Gold, Sokhatiny deposit, ore mineralogy, metasomatites, linear weathering crusts.

REFERENCES

- Groves D., Goldfarb R., Gebre-Mariam M., Hagemann S., Robert F. Orogenic gold deposits: A proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types. *Ore Geology Reviews*, 1998, vol. 13, no. 1–5, pp. 7–27.
- Groves D., Goldfarb R., Robert F., Hart C.J.R. Gold deposits in metamorphic belts: overview of current understanding, outstanding problems, future research, and exploration significance. *Economic Geology*, 2003, vol. 98, no. 1, pp. 1–29.
- Groves D., Santosh M., Goldfarb R.J., Zhang L. Structural geometry of orogenic gold deposits: Implications for exploration of world-class and giant deposits. *Geoscience Frontiers*, 2018, vol. 9, no. 4, pp. 1163–1177.
- Goldfarb R.J., Groves D.I. Orogenic gold: common or evolving fluid and metal sources through time. *Lithos*, 2015, vol. 233, pp. 2–26.
 Chen Y.J. Orogenic-type deposits and their metallogenic model
- Chen Y.J. Orogenic-type deposits and their metallogenic model and exploration potential. *Geology in China*, 2006, vol. 33, no. 6, pp. 1181–1196.
- Goryachev N.A., Pirajno F. Gold deposits and gold metallogeny of Far East Russia. Ore Geology Reviews, 2014, vol. 59, pp. 123–151.
- Goryachev N.A. Geologiia mezozoyskikh zoloto-kvarisevykh zhilnykh poyasov Severo-Vostoka Azii [Geology of mezozoic gold-

quartz vein belts of North-East of the Asia]. Magadan, NEISRI FEB RUS Publ., 1998. 210 p.

- Savchuk Y.S., Volkov A.V. Large and super-large orogenic golden deposits: Geodynamics, structure, genetic consequences. *Lithosphere (RUSSIA)*, 2019, vol. 19, no. 6, pp. 813–833. In Rus.
- Goldfarb R.J., Phillips G., Nokleberg, W. Tectonic setting of synorogenic gold deposits of the Pacific Rim. *Ore Geology Reviews*, 1998, vol. 13, no. 1–5, pp. 185–218.
 Fridovsky V.Y. Structural control of orogenic gold deposits of the
- Fridovsky V.Y. Structural control of orogenic gold deposits of the Verkhoyansk-Kolyma folded region, northeast Russia. Ore Geology Reviews, 2018, vol. 103, pp. 38–55.
- Glukhov A.N. Tectonic framework for metallogeny of precambrian structures on the example of Kolyma and Omolon terranes (Northeast Asia). *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 2019, vol. 64, no. 2, pp. 219–248. In Rus.
- Shpikerman V.I. Domelovaya minerageniya Severo-Vostoka Azii [Pre-cretaceous metallogeny of Northeastern Asia]. Magadan, NEISRI FEB RUS Publ., 1998. 333 p.
- Glukhov A.N. Geological structure and ore composition of the Nadezhda gold deposit (Magadan region). *Otechestvennaya* geologiya, 2013, no. 4, pp. 7–17. In Rus.
- Glukhov A.N., Savva N.E., Kolova E.E. Ore mineralogy and genesis of Nadezhda gold deposit, Magadan region. *Ores and metals*, 2016, no. 4, pp. 60–71. In Rus.

- Goryachev N.A. Proiskhozhdenie zoloto-kvartsevykh zhilnykh poyasov Severnoy Patsifiki [Origin of gold-quartz vein belts in the North Pacific]. Magadan, NEISRI FEB RUS Publ., 2003. 143 p.
- Glukhov A.N. Base metal mineralization of the Kolyma terrain in Northeast Russia: Overview and genetic classification. *Lithosphere (RUSSIA)*, 2019, vol. 19, no. 5, pp. 717–730. In Rus.
- Glukhov A.N. Geochemical specialization of the Upper Proterozoic complexes of the Kolyma Terrane in Northeast Russia. *Russian Journal of Pacific Geology*, 2014, vol. 8, no. 3, pp. 177–186. In Rus.
- Glukhov A.N., Gladkov A.S., Koshkarev D.A., Lunina O.V. Tectonophysical evidences of geodynamic evolution of the Prikolyma terrain (North-Eastern regions of Russia). *Geodynamics & Tectonophysics*, 2012, vol. 3, no. 4, pp. 361–375. In Rus.
- Protopopov G.Kh. Pervye nakhodki rudnogo zolota v Shamanikho-Stolbovskom zolotorossypnom rayone Severo-Vostoka Rossii [The first finds of ore gold in the Shamanikho-Stolbovsky gold placer region of the North-East of Russia]. *Otechestvennaya* geologiya, 1994, no. 9, pp. 31–32.
- Glukhov A. N. Weathering crusts in the Glukharinyi ore-placer cluster (Kolyma Terrane, Northeastern Russia) and their gold potential. *Lithology and Mineral Resources*, 2020, vol. 55, no. 5, pp. 392–414. In Rus.
- Abramov S.S., Andreeva O.V., Zharikov V.A., Zaraiskii G.P., Marakushev A.A., Omelyanenko B.I., Pertsev N.N., Podlesskii K.V., Rass I.T., Rusinov V.L. *Metasomatizm i metasomaticheskie porody* [Metasomatism and metasomatic rocks]. Moscow, Nauchny Mir Publ., 1998. 492 p.
- Zhdanov V.V., Kostin A.E., Kukharenko E.A., Landa E.A., Lukyanova L.I., Masaitis V.L., Moskalenko Z.D., Pushkarev Yu.D., Sharpenok L.N. Petrograficheskiy kodeks Rossii. Magmaticheskie, metamorficheskie, metasomaticheskie, impaktnye obrazovaniya [Petrographic code of Russia. Magmatic, metamorphic, metasomatic, impact formations]. St. Petersburg, VSEGEI Publ., 2009. 160 p.
- 23. Dill H.G., Dohrmann R., Kaufhold S., Çiçek G. Mineralogical, chemical and micromorphological studies of the argillic alteration zone of the epithermal gold deposit Ovacik, Western Turkey: Tools for applied and genetic economic geology. *Journal of Geochemical Exploration*, 2015, vol. 148, pp. 105–127.
- Gavrilov R.Yu., Sinkina E.A., Mitsykh S.N. Method of kappametry as prospecting criteria of gold mineralization. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019. vol. 330, no. 2, pp. 83–94. In Rus.
- 25. Korzhinskii D.S. The theory of metasomatic zoning. *Mineralium Deposita*, 1968, vol. 3, no. 3, pp. 222–231.
- 26. Yurkova M.V. Mineralogiya rud Sokhatinogo mestorozhdeniya (Respublika Sakha) [Mineralogy of ores of the Sokhatinskoe de-

posit (Republic of Sakha)]. I Molodezhnaya nauchnoobrazovatelnaya konferentsiya CNIGRI [I Youth Scientific and Educational Conference of TsNIGRI]. Moscow, TsNIGRI Publ., 2020. pp. 225–227.

- Korobeinikov A.F., Narseev V.A., Pshenichkin A.Ya., Revyakin P.S. *Pirity zolotorudnykh mestorozhdeniy (svoystva, zonalnost, prakticheskoe primenenie)* [Pyrites of gold deposits (properties, zoning, practical application)]. Moscow, TsNIGRI Publ., 1993. 213 p.
- Criddle A.J., Chicholm J.E., Cervelleite S.C.J. Ag₄TeS, a new mineral from the Bambolla mine, Mexico, and a description of a photochemical reaction involving cervelleite, acanthite, and hessite. *European Journal of Mineralogy*, 1989, vol. 1, pp. 371–380.
- Kalinin Y.A., Palyanova G.A., Naumov E.A., Kovalev K.R., Pirajno F. Supergene remobilization of Au in Au-bearing regolith related to orogenic deposits: A case study from Kazakhstan. Ore Geology Reviews, 2019, vol. 109, pp. 358–369.
- Yanchenko O.M., Voroshilov V.G., Timkin T.V., Ziaii M. Mineralgeochemical zonality of golden bearing weathering crust of the Tom-Yaya interfluve. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*. *Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 2, pp. 83–94. In Rus.
- Yanchenko O.M., Voroshilov V.G., Timkin T.V., Martynenko I.V., Ziaii M. Morphology and composition of gold in weathering crust of the Tom-Yaya interfluve. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic Uni*versity, Geo Assets Engineering, 2019, vol. 332, no. 9, pp. 74–91. In Rus.
- 32. Yanchenko O.M., Timkin T.V., Voroshilov V.G., Yakich T.Yu., Ziaii M. Nature of phosphate distribution within the golden weathering crusts of the Tomsk region. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 330, no. 3, pp. 84–92. In Rus.
- 33. Martynenko I.V., Voroshilov V.G., Timkin T.V., Ziaii M. Petrochemical characterization of weathering crusts of Olkhovsk-Chibizhek district. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, *Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 12, pp. 136–144. In Rus.
- 34. Isaeva E.R., Voroshilov V.G., Timkin T.V., Mansour Ziaii. Geochemical criteria to identify reservoirs and to forecast their oil and gas content in terrigenous deposits in Pur-Tazovskoy oil-bearing field. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering, 2018, vol. 329, no. 4, pp. 132–141. In Rus.
- Pshenichkin A., Timkin T., Oskina Y. Noble metals in rocks and ores of Maysko-Lebed ore field (Mountain Shoriya). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2015, vol. 24, pp. 1–6.

Received: 25 March 2022.

Information about the authors

Timofey V. Timkin, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.
 Valery G. Voroshilov, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.
 Maria V. Yurkova, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.
 Mansour Ziaii, PhD., associate professor, Shahrood University of Technology.

УДК 622.248.5:004.85

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ «БЕЗ УЧИТЕЛЯ» ДЛЯ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ ПРИХВАТОВ БУРИЛЬНОЙ И ОБСАДНОЙ КОЛОНН

Щербаков Роман Эдуардович^{1,2},

res718@bk.ru

Ковалев Артем Владимирович1,

Kovalevav@tpu.ru

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

² АО «Газпромнефть НТЦ», Россия, 190000, г. Санкт-Петербург, наб. реки Мойки, 75–79, литер Д.

Актуальность. С каждым годом истощение легкодоступных запасов углеводородов определяет необходимость разработки месторождений, характеризующихся сложными горно-геологическими условиями. Строительство скважин в данных условиях часто сопровождается различными осложнениями и авариями. Повышенные риски их возникновения обусловлены усложнением конструкции скважины, траектории ствола, а также недостаточно достоверными данными о горно-геологических условиях бурения. Прихват бурильной или обсадной колонны является одной из самых сложных аварий, которая оказывает существенное влияние на эффективность бурения и стоимость строительства скважины. Зачастую при возникновении прихвата определяет по параметрам бурения инженерным составом, однако ввиду особенностей человеческого восприятия и сменного режима работы это происходит несвоевременно. Недостатки используемого в настоящий момент подхода предопределили использование алгоритов машинного обучения. Интеллектуальная система может автоматически анализировать тен-денции изменения параметров бурения, обнаруживать аномалии в реальном времени, заблаговременно прогнозировать вероятность возникновения дварии и предупреждать инженера по бурению на ранней стадии, что позволит реализовать превентивные мероприятия до того, как колонна будет прихвачена.

Цель: создание алгоритма, позволяющего прогнозировать вероятность возникновения прихвата бурильной или обсадной колонны в процессе бурения скважины на основании анализа данных геолого-технологических исследований.

Методы: анализ современных достижений в области определения аномалий во временных рядах при помощи алгоритмов машинного обучения; создание алгоритма прогнозирования прихвата на языке программирования Python с использованием библиотек с открытым исходным кодом.

Результаты. Авторами разработан алгоритм прогнозирования прихвата, проведена оценка его эффективности на тестовой выборке, а также масштабируемость на прочие аварии и осложнения, возникающие в процессе бурения. Определены перспективные направления дальнейших исследований.

Ключевые слова:

Технологические операции строительства скважин, прогнозирование прихватов колонны, машинное обучение, многомерные временные ряды, распознавание аномалий, иерархическая временная память.

Введение

Прихват бурильной или обсадной колонны является одной из самых сложных аварий, которая оказывает существенное влияние на эффективность бурения и стоимость строительства скважины. Зачастую при возникновении прихвата требуется проведение дорогостоящих мероприятий по ликвидации последствий аварии, которые могут включать в себя ловильные работы, бурение бокового ствола или, в крайнем случае, ликвидацию аварийной и бурение новой скважины. Поэтому различные отраслевые оценки, утверждающие, что стоимость проведения мероприятий по ликвидации последствий прихвата бурильного инструмента может превышать несколько сотен миллионов долларов в год, не являются надуманными. Инциденты, связанные с прихватом бурильного инструмента, составляют значительную часть непроизводительного времени, при этом оценки варьируются от 25 до 35 % [1].

Понимание механизмов возникновения прихвата и его признаков помогает на ранней стадии реализовывать мероприятия по снижению последствий надвигающейся аварии. Традиционно признаки прихвата определяются по параметрам бурения, регистрируемым станцией геолого-технологических исследований (ГТИ). Характерными признаками дифференциального прихвата являются увеличение сопротивления продольному перемещению и повышение крутящего момента при страгивании колонны после пребывания без движения. В том случае, если помимо вышеуказанных признаков отмечается повышение давления на стояке, можно говорить о вероятности возникновения механического прихвата [2].

Зачастую признаки предстоящего прихвата не обнаруживаются заблаговременно. В основном это происходит в результате особенностей человеческого восприятия информации. Кроме того, признаки предстоящей аварии не распознаются заблаговременно в результате сменного графика работы персонала (членов буровой бригады, инженерного состава на буровой площадке и в оперативном офисе) – по статистике большинство аварий происходит в течение нескольких часов после «пересменки» [1]. Внедрение машинного обучения в анализ изменения параметров бурения становится все более популярным по вышеуказанным причинам. Различные алгоритмы машинного обучения предлагают автоматизированные решения для преодоления этих ограничений, что позволяет адаптировать человеческие знания и практической опыт для решения данной проблемы.

Автоматический анализ тенденций изменения параметров бурения, определение едва заметных, но критических отклонений и их взаимосвязей, которые зачастую не являются линейными, позволяют заблаговременно прогнозировать вероятность возникновения аварии и предупреждать инженера по бурению на ранней стадии. Данные системы позволяют избежать серьезной аварии и уменьшить последствия по освобождению прихваченной колонны.

Обзор литературы

Одной из первых зарубежных публикаций, в которой использовались статистические методы для прогнозирования вероятности возникновения прихвата колонны, была работа Хемпкинса и др. [2]. Советскими учеными также разрабатывались статистические методы, в частности метод последовательной диагностической процедуры [3]. Современные подходы к раннему определению признаков прихватов описаны в работе [5].

Ряд алгоритмов машинного обучения способны предсказывать неизвестные взаимосвязи между входными и выходными параметрами. Прогнозирование вероятности возникновения аварии требует создания более точной модели ввиду высокой нелинейности и нестабильности взаимосвязей между входными и выходными значениями.

К настоящему моменту описано несколько подходов для прогнозирования вероятности прихвата колонны при помощи различных алгоритмов машинного обучения:

- статистический анализ многомерных временных рядов [6];
- логистическая регрессия [7];
- нейронная сеть [8–10];
- метод опорных векторов [10, 12].

В упомянутых ранее статистических методах использовались данные с большого количества скважин. Эти статистические методы обычно использовали суточные отчеты о бурении, отчеты об окончании строительства скважины и другую информацию, которая отражает одно измерение в день для параметров, используемых для прогнозирования прихвата. Входные данные включали информацию о траектории ствола скважины (глубина по стволу и по вертикали, зенитный угол и интенсивность искривления), данные о свойствах бурового раствора (удельный вес, реологические параметры раствора, водоотдача, водоотдача при высоком давлении и высокой температуре, рН и концентрация хлоридов), параметры бурения (нагрузка на долото, крутящий момент на поверхности, нагрузка на крюке, давление на насосе, расход бурового раствора, частота вращения ротора или системы верхнего привода) [3].

Основным ограничением применения этого подхода к прогнозированию прихвата в реальном времени является то, что условия, приводящие к прихвату, часто возникают в течение нескольких десятков минут или часов. Поэтому требуется более высокая частота обновления данных, по сравнению с суточными отчетами о бурении и отчетами об окончании строительства скважины. Кроме того, в практике строительства скважины замер параметров бурового раствора производится с недостаточной периодичностью, что осложняет раннее обнаружение признаков прихвата. Разработанные системы для непрерывного автоматического измерения основных параметров бурового раствора в настоящий момент не получили широкого распространения [13].

В случае использования подхода к обнаружению прихвата при помощи алгоритмов обучения «с учителем» (логистическая регрессия, нейронная сеть, градиентный бустинг) возникает проблема разметки обучающей выборки, поскольку требуется предварительный сбор информации для обучения алгоритма, проверка качества входных данных, их предварительная обработка, ручная разметка (выделение интервалов с признаками предстоящей аварии). В случае изменения распределения параметров бурения при использовании модели в условиях другого месторождения требуется повторная подготовка обучающей выборки, обучение модели и оценка ее работы в условиях реального бурения.

Другой подход заключается в использовании аналитических моделей, прогнозирующих скручивающие и осевые нагрузки, воздействующие на бурильную колонну (T&D) в соответствии с плановой траекторией скважины. Сравнение прогнозов аналитической модели с фактическими данными позволяет выявить ранние признаки прихвата [14]. Таким образом, на этапе подготовки к строительству скважины разрабатывается модель скручивающих и осевых нагрузок, действующих на бурильную колонну, прогнозирующая вес на крюке и момент на устье при бурении для каждой точки по стволу скважины на основе информации о компоновке низа бурильной колонны, реологии бурового раствора и плановой траекторий ствола скважины. Использование данных T&D необходимо для автоматического вычисления несоответствия параметров бурения и прогнозирования возможного прихвата, но утверждается, что точность модели значительно повышается при добавлении дополнительных данных, таких как давление на стояке и расход бурового раствора.

Методика, предложенная далее в этой работе, не отрицает важности имитационных моделей. Однако предлагается иной подход, при котором не требуется разработка предварительной модели, поскольку система использует самообучающуюся и самонастраивающуюся модель и автоматически выявляет аномалии в поступающих данных в режиме реального времени, что позволяет предотвратить предстоящую аварию.

Описание исходных данных

Основным фактором успешного бурения скважины без возникновения аварий, связанных с прихватом бурильного инструмента, является возможность непрерывно отслеживать многочисленные тенденции изменения параметров бурения для раннего обнаружения аномалий в их поведении. В анализе тенденций важно не столько абсолютное значение какоголибо из параметров, сколько направление изменения одного из этих параметров по отношению к другим.

В процессе строительства скважины ключевыми параметрами являются:

- нагрузка на крюке (HKLD);
- момент на устье (TRQ);
- давление на стояке (SPP).

Понимание ожидаемой тенденции изменения этих параметров имеет большое значение для раннего обнаружения и, следовательно, для снижения последствий прихвата бурильного инструмента [1].

Для корректного анализа тенденций изменения параметров в процессе бурения необходимо регистрировать вес на крюке без вращения бурильной колонны, потому как в тот момент, когда бурильная колонна неподвижна, трение действует против осевого перемещения и его влияние на измеренное значение веса на крюке максимально [2].

Основной проблемой при бурении наклоннонаправленных, горизонтальных скважин, а также скважин с большим отходом от вертикали является образование слоя шлама в затрубном пространстве. Ввиду недостаточной очистки затрубного пространства происходит накопление шламовой подушки, что приводит к постоянному повышению трения и закупориванию затрубного пространства до тех пор, пока колонна не потеряет подвижность и циркуляция не будет потеряна. Данная ситуация может быть выявлена на ранней стадии путем постоянного автоматизированного мониторинга и анализа тенденции изменения измеренных ключевых параметров (HKLD, TRQ и SPP) в режиме реального времени для каждой пробуренной свечи. Это позволит проводить превентивные мероприятия на ранней стадии, чтобы избежать потенциальных дорогостоящих потерь времени и ресурсов на ликвидацию последствий механического прихвата.

Дифференциальный прихват характеризуется повышением трения между бурильным инструментом или обсадной колонной и стенкой открытого ствола скважины в результате перепада давления. Обычно из-за чрезмерного перепада давления прилипание колонн происходит в пористых и проницаемых пластах, таких как песчаник или известняк, в которых в процессе бурения образуется толстая фильтрационная корка на стенке скважины. Ранними признаками дифференциального прихвата являются посадки и затяжки после наращивания, регистрируемые датчиком веса на крюке, повышение регистрируемого момента на устье при бурении ротором, а также «скачки» момента после запуска вращения вслед за продолжительным неподвижным состоянием колонны. Рекомендации по предотвращению прихвата бурильного инструмента в основном касаются технологических аспектов процесса строительства скважины – поддержание нейтральной точки выше УБТ, добавление расширителя в КНБК и повышенный контроль параметров бурового раствора за счет обеспечения надлежащих реологических свойств раствора, снижения фильтрации бурового раствора, уменьшения толщины фильтрационной корки [2].

После того как определены механизмы возникновения различных типов прихватов и их признаки, следует определить основные требования, предъявляемые к регистрируемым параметрам бурения.

Одна из основных проблем регистрации данных параметров бурения заключается в том, что тип, частота и качество доступных данных не согласуются от скважины к скважине, что связано с применением различных станций геолого-технологических исследований (ГТИ).

Успешная идентификация ранних признаков предстоящей аварии будет зависеть от сбора конкретных потоков данных в режиме реального времени и использования этих данных для формирования прогнозов условий бурения. В зависимости от компании, предоставляющей сервис ГТИ, и количества датчиков, установленных на буровой установке, количество потоков данных, поступающих на сервер посредством языка разметки передачи информации WITSML, может варьироваться от 10 до 100. В целом наличие большего количества потоков данных позволяет лучше интерпретировать скважинные условия, однако большинство буровых установок снабжены только базовым набором датчиков.

Чтобы гарантировать, что система оповещения будет работать на различных типах скважин, предлагается разработка алгоритма для мониторинга скважины и предоставления предупреждений, даже если доступны только «критические» потоки данных. Эти критические потоки должны соответствовать следующим критериям [1]:

- полнота (степень, в которой каждая точка данных датчика содержит ожидаемые показания);
- чувствительность (степень, в которой значения показаний датчика соответствуют определенным пороговым значениям качества);
- однородность (степень, в которой потоковый объем точек данных датчиков согласован с течением времени);
- структура (степень, в которой точки потоковых данных соответствуют согласованной структуре).

Согласно предоставленным компанией ООО «Газпромнефть НТЦ» исходным данным, в соответствии с обозначенными ранее критериями, приведен список критических параметров, используемых в данном исследовании:

- Входные данные: параметры, непосредственно контролируемые бурильщиком на поверхности при проводке скважины:
 - расход бурового раствора на входе (л/с);
 - частота вращения бурильной колонны (об/мин);
 - высота талевого блока (м).

- Выходные данные измерения, которые показывают реакцию скважины на входные параметры бурения:
 - давление на стояке (атм);
 - момент при вращении на поверхности (Н*м);
 - нагрузка на крюке (т);
 - глубина долота, глубина скважины (м).

Различные параметры в скважинах, как правило, регистрируются с частотой 1 точка/5 секунд (0,2 Гц). Анализ показал, что для надежного прогнозирования вероятности возникновения аварии требуется не менее 1 точки/10 секунд (0,1 Гц) для каждого параметра [14].

На рис. 1 приведен пример исходных данных ГТИ, представленных временными рядами параметров бурения (глубина долота и скважины, вес на крюке, давление на стояке), со скважины, на которой произошел дифференциальный прихват. На рисунке отмечены три зоны, в которых бурильная колонна была прихвачена.



Puc. 1. Исходные данные параметров бурения обучающей выборки *Fig. 1.* Drilling parameters time series of training dataset

Стоит отметить, что в соответствии с анализом различных инцидентов, связанных с прихватом бурильного инструмента, можно утверждать, что во всех случаях не было обнаружено единого опережающего признака предстоящей аварии, поэтому требуется разработать алгоритм, комплексно анализирующий различные параметры бурения.

Методика проведения исследований

Как отмечалось ранее, применение алгоритмов машинного обучения позволяет исключить человеческий фактор, тем самым сократить непроизводительное время и повысить эффективность бурения скважин. На рис. 2 показана блок-схема предлагаемой системы прогнозирования прихвата бурильной или обсадной колонны [1].

Как только данные ГТИ в режиме реального времени получены с буровой площадки, выполняется контроль качества данных и их обработка (удаление пропусков, выбросов и пр.). На следующем шаге выполняется классификация данных посредством определения технологической операции, выполняемой на буровой установке (бурение ротором или слайдированием, проработка, наращивание и пр.) (табл. 1) [14].



Рис 2. Блок-схема системы прогнозирования вероятности прихвата

Fig 2. Stuck pipe model flowchart

Tехнологическая операция Rig state	Наличие ращения СВП Rotation	Наличие циркуляции бурового раствора Flowrate	Направление движения крюкоблока Bit movement	Увеличение глубины скважины Hole depth increase	Наличие агрузки на крюке Hookload
Роторное бурение Rotary drilling	Да/Yes	Да/Yes	Вниз/Down	Да/Yes	Да/Yes
Бурение слайдированием Sliding drilling	Нет/No	Да/Yes	Вниз/Down	Да/Yes	Да/Yes
Спуск с циркуляцией Wash downwards	Нет/No	Да/Yes	Вниз/Down	Het/No	Дa/Yes
Подъем с циркуляцией Wash upwards	Нет/No	Да/Yes	BBepx/Up	Нет/No	Да/Yes
Прямая проработка Ream downwards	Да/Yes	Да/Yes	Вниз/Down	Het/No	Да/Yes
Обратная проработка Ream upwards	Да/Yes	Да/Yes	BBepx/Up	Нет/No	Да/Yes
Спуск без циркуляции Run in hole	Нет/No	Нет/No	Вниз/Down	Het/No	Дa/Yes
Подъем без циркуляции Pull out of hole	Нет/No	Нет/No	BBepx/Up	Het/No	Дa/Yes
Наращивание Make connection	Нет/No	Нет/No	_	Het/No	Нет/No
Промывка над забоем Circulate hole	Нет/No	Да/Yes	Без движения Static	Нет/No	Да/Yes
Вращение над забоем Rotating hole	Да/Yes	Да/Yes	Без движения Static	Нет/No	Да/Yes

Таблица 1. Условия классификации технологических операций, выполняемых на буровой установке **Table 1.** Classification conditions of rig states

Затем данные подаются на вход ряду алгоритмов, предназначенных для поиска различных признаков, сигнализирующих о предстоящей аварии, связанной с прихватом бурильного инструмента. В случае обнаружения одного или нескольких признаков прихвата колонны модель рассчитает вероятность возникновения аварии. Если она превысит определенное пороговое значение, модель сообщит инженеру о высокой вероятности возникновения аварии.

Как уже упоминалось ранее, нет единого опережающего признака, определяющего вероятность возникно-

вения аварии. Следовательно, требуется, чтобы метод раннего обнаружения был достаточно гибким, чтобы генерировать действительные предупреждения, не зависящие от отклонения одного конкретного параметра.

Методы машинного обучения могут быть достаточно гибкими, чтобы обеспечить минимальное количество ложных срабатываний. Для задач выявления аномалий во временных рядах используется огромное множество различных алгоритмов, классификация которых представлена на рис. 3 [16].



Рис. 3. Классификация алгоритмов машинного обучения, методов и критериев оценки качества выявления аномалий во временных рядах

Fig. 3. Taxonomy of anomaly detection techniques using machine learning

Аномалии – это наблюдения, которые значительно отличаются от других наблюдений, что, возможно, обусловлено другим механизмом работы системы. Аномалии бывают точечными и контекстуальными.

Точечная аномалия возникает, когда какая-либо точка в потоке данных значительно отличается от ожидаемой закономерности распределения этих данных. Такие точки называют выбросами [16].

Обнаружение аномалий такого типа включает в себя наблюдение за каждой точкой в общем потоке данных. На рис. 4 показана точечная аномалия [16].



Рис. 3. Пример выявления точечной аномалии Fig. 3. Point anomaly detection

Другой тип аномалии наблюдается для любого шаблона данных, который аномален в одном из сценариев распределения данных. Распространенным примером являются большие дорожные пробки, которые могут быть контекстуально аномальной активностью движения после полуночи из-за аварии, плохой видимости или других причин, связанных с погодными условиями. Пример контекстуальной аномалии показан на рис. 5 **Рис. 4**[16].



Рис. 4. Пример выявления контекстуальной аномалии *Fig. 4.* Contextual anomaly detection

В соответствии с классификацией, приведенной на Рис. 3, алгоритм может использовать схему обучения «с учителем», «с частичным привлечением учителя» (полуавтоматическое обучение), или обучаться «без учителя» [17].

Подход к обнаружению аномалий при работе алгоритма «с учителем» предполагает обнаружение аномалий путем создания набора правил, выявленных в процессе обучения алгоритма на размеченных наборах данных, которые помогают прогнозировать будущие данные.

Подход к обнаружению аномалий при работе алгоритма «с частичным привлечением учителя» предполагает обнаружение аномалий путем создания первоначального набора правил, выявленных на небольшой размеченной выборке данных, в дальнейшем алгоритм корректирует первоначальные правила путем обработки поступающих неразмеченных данных.

Подход к обнаружению аномалий при работе алгоритма «без учителя» предполагает обнаружение аномалий на основе неразмеченного потока данных, таким образом, алгоритм автоматически определяет, какие данные считать нормальными и аномальными. Данный подход не требует отдельных этапов обучения и тестирования.

Как уже упоминалось ранее, при обучении «с учителем» существует проблема сбора и разметки обучающей выборки. Для решения данной проблемы предлагается использовать систему автоматического обнаружения аварий и осложнений в процессе бурения на основе метода обучения «без учителя». Данный подход позволит сократить временные и материальные затраты на подготовку и обучение модели. Кроме того, стоит отметить, что предлагается реализовать систему, которая обучается непосредственно в процессе работы, таким образом, алгоритму не требуется изначально иметь весь набор данных, потому как с каждой новой точкой он будет корректировать свою работу в режиме реального времени.

Обнаружение признаков аварии позволяет заблаговременно проводить превентивные мероприятия, поэтому требуется, чтобы эта информация была достаточно преждевременной для ее использования. Существует компромисс между ранним обнаружением и ложными срабатываниями, поскольку алгоритм, который часто делает неточные обнаружения, скорее всего, будет проигнорирован.

Резюмируя, можно выделить следующие требования к предлагаемому решению:

- Прогнозы должны быть сделаны в режиме реального времени алгоритм должен идентифицировать состояние x_t как нормальное или аномальное до получения последующего x_{t+1}.
- Алгоритм должен непрерывно обучаться без необходимости изначально иметь и хранить весь объем данных.
- Алгоритм должен обучаться «без учителя» без предварительной разметки данных или ручной настройки параметров.
- Алгоритм должен динамически адаптироваться к изменениям состояния системы и смене распределения данных, поскольку базовые статистики потока данных параметров бурения зачастую нестационарны.
- 5) Алгоритм должен распознавать аномалии в параметрах бурения как можно раньше.
- Алгоритм должен иметь минимальное количество как ложноположительных, так и ложноотрицательных срабатываний.

Анализ приведенных выше критериев позволяет сделать вывод о том, что алгоритмы обнаружения аномалий в неизменных временных рядах принципиально отличаются от тех, что требуются для работы в режиме реального времени, поэтому большинство алгоритмов, приведенных ранее, не применимы в контексте данной проблемы. Для решения поставленной задачи и выполнения поставленных требований предлагается использовать следующий алгоритм – Hierarchical Temporal Memory (HTM).

Ніегагсhical Temporal Memory (Иерархическая Временная Память) – это частная модель мозга, которая моделирует некоторые структурные и алгоритмические свойства неокортекса. Данный метод машинного обучения основан на большом количестве шаблонов последовательностей, хранящихся в нем, формируемых с помощью потока данных временных рядов. На рис. 6 представлена схема работы алгоритма в случае использования одномерного временного ряда [18].



Рис. 5. Принципиальная схема работы алгоритма НТМ для обработки одномерного временного ряда *Fig. 5.* Primary functional steps in HTM algorithm for univariate-sensing time-series

Текущий входной сигнал x_t подается на декодер (Encoder), который переводит входные значения в двоичный код, затем выполняется процесс разреженного пространственного объединения (Spatial pooler). Результирующий вектор a(xt) представляет собой разреженный двоичный вектор, отображающий текущий входной сигнал в алгоритм иерархической временной памяти (Sequence memory) - ключевой компонент данной системы. Данный компонент моделирует временные закономерности (x_t) и выводит прогноз в виде другого разреженного вектора $\pi(x_t)$. Таким образом, $\pi(x_t)$ является предсказанием для $a(x_{t+1})$ [18]. Однако $a(x_t)$ и $\pi(x_t)$ напрямую не отражают аномалии во временных рядах. Для создания надежной системы обнаружения аномалий в алгоритм вводится два дополнительных шага. Вопервых, необработанная оценка аномалии (Prediction error) вычисляется по двум разреженным векторам предсказанному и действительному значению. Так как необработанные оценки аномалии могут быть зашумлены, с целью снижения количества ложных срабатываний вычисляется вероятность аномалии (Anomaly likelihood) в соответствии с гауссовым распределением, при превышении вероятности аномалии порогового значения состояние системы отмечается аномальным.

Иерархическая временная память состоит из слоев нейронов, организованных в набор столбцов (рис. 7). Сеть принимает поток входных данных, закодированных в виде разреженных векторов, моделирует последовательности высокого порядка (последовательности с долгосрочными зависимостями), используя композицию из двух отдельных разреженных представлений. Текущий ввод, xt и контекст предыдущей последовательности (x_{t-3}, x_{t-2}, x_{t-1}) одновременно кодируются с использованием динамически обновляемого разреженного распределенного представления. Сеть использует эти представления для прогнозирования следующего временного шага в виде разреженного вектора. При получении входных данных для следующего временного шага сеть использует разницу между прогнозируемым значением и фактическим вводом для обновления своих синаптических соединений. Обучение происходит на каждом временном шаге, но поскольку представления очень разрежены, обновляется лишь крошечный процент синапсов [18].

Дополнительные детали алгоритма HTM и свойства его представления выходят за рамки данной работы, но подробно описаны в следующих работах [18, 18].



Рис. 6. Блок иерархической временной памяти *Fig. 6.* Hierarchical temporal memory block
Так как входные данные содержат большое количество потоков данных с различных датчиков буровой установки, такие среды не могут быть эффективно обработаны с помощью одной сложной модели, так как сложность обучения и вывода изменяется квадратично с увеличением входной размерности. В таком случае следует разделить большую систему на набор меньших моделей, каждая из которых моделирует подмножество среды. Меньшие модели облегчают обучение и повышают производительность, но могут потерять потенциально полезные корреляции между другими моделями [19].

Входной набор данных представляет многомерный временной ряд, поэтому используется следующая принципиальная схема работы алгоритма (рис. 8). Реализуется три ядра алгоритма, на каждый из которых подаются на вход выделенные части доступного набора данных. Для прогнозирования вероятности прихвата бурильного инструмента отслеживаются такие ключевые параметры, как нагрузка на крюке, момент на устье, давление на стояке, для различных технологических операций. Для того чтобы суммировать результаты работы отдельных ядер и сократить объем вычислений, рассчитывается логарифм вероятности возникновения аварии по каждому отдельному параметру, затем результаты предсказаний ядер суммируются. При превышении суммарного значения порогового значения состояние системы отмечается аномальным.

Входные данные



Puc. 7. Принципиальная схема алгоритма обработки многомерного временного ряда параметров бурения скважины **Fig. 7.** Functional diagram illustrating a complex system for multivariate-sensing time-series

Таблица 2. Гиперпараметры	модели	иерархической
временной памяти		

Table 2.	петагспісаї тетрогаї те	mory nyperparameters
Наи	менование параметра	Значение

паименование параметра	эначение				
Parameter name	Value				
Количество ячеек/Number of columns N	2048				
Количество слоев в ячейке	16				
Number of cells per column M	10				
Порог активации сегмента	10				
Dendritic segment activation threshold Θ	19				
Исходное состояние синапса	0 22075451521220015				
Initial synaptic permanence	0,23073431321239013				
Увеличение связи синапсов	0.04220160621061210				
Synaptic permanence increment p ⁺	0,04329100031901319				
Уменьшение связи синапсов	0.007285708040842100				
Synaptic permanence decrement p ⁻	0,007283708940843109				
Уменьшение связи синапсов для пред-					
сказанной неактивной ячейки	0.00102650287546220				
Synaptic permanence decrement for	0,00102030387340339				
predicted inactive segments p					

С целью отслеживания динамики изменения состояния системы в скользящем окне вычисляется количество точек за последние 30 минут, в которых поведение системы было аномальным. При превышении частоты появления аномальных интервалов порогового значения будет сгенерировано предупреждение для инженера по бурению.

На обучающей выборке были определены следующие гиперпараметры модели (табл. 2).

Результаты исследования

Для выполнения данной исследовательской работы компанией ООО «Газпромнефть НТЦ» был предоставлен исходный набор данных временных рядов параметров бурения скважины, на которой произошла серия дифференциальных прихватов. Предоставленные данные были переданы реализованному алгоритму на вход, при выполнении программного кода данные передавались строчка за строчкой, таким образом, изначально алгоритм не имел возможности использовать весь набор данных, тем самым обеспечивалось обучение алгоритма в режиме реального времени.

Для оценки качества работы алгоритма использовались такие метрики, как среднеквадратичная ошибка прогнозирования определенного параметра, время получения предупреждения до того, как авария произошла. Результаты работы алгоритма на обучающей выборке представлены на рис. 9. На верхнем треке отображены значения веса на крюке в течение рейса, на нижнем отмечены зоны, для которых вероятность возникновения аварии превысила предопределенный порог, и в данной точке отмечаются признаки прихвата.

Параметры используемой модели, а также архитектура алгоритма определялись на данном наборе данных путем запуска серии экспериментов с различными конфигурациями.



Рис. 8. Результаты работы алгоритма иерархической временной памяти на обучающей выборке *Fig. 8.* Hierarchical temporal memory results on training dataset

На первом интервале произошедшего прихвата предупреждение было сгенерировано за 31 час до инцидента. На втором интервале предупреждение было сгенерировано до подъема КНБК, последующих предупреждений непосредственно до момента прихвата не было, поэтому будем считать, что модель корректно не распознала признаки предстоящей аварии. На третьем интервале произошедшего прихвата предупреждение было сгенерировано за 20 часов до инцидента. Медианная оценка среднеквадратичной ошибки прогнозирования равна 2,42 т, что является достаточным показателем для выявления признаков предстоящей аварии. Также немаловажной характеристикой работы модели является количество ложных срабатываний, при работе алгоритма с данными предоставленной выборки было обнаружено четыре ложных срабатывания. При бурении под кондуктор признаков прихвата не наблюдалось, ложные срабатывания также отсутствовали.

С целью проверки качества работы алгоритма на тестовой выборке были зафиксированы параметры модели. Тестовая выборка включала в себя две скважины, на которых в определенный момент времени произошел дифференциальный прихват. Результаты работы алгоритма на тестовой выборке представлены на рис. 10, 11. Как видно из представленного графика, предупреждение о вероятности возникновения прихвата было сгенерировано за 30 часов до возникновения инцидента. Медианная оценка среднеквадратичной ошибки прогнозирования составляет 1,02 т, что является достаточным показателем для выявления признаков предстоящей аварии. При работе алгоритма с данными тестовой выборки скважины № 1 было обнаружено четыре ложных срабатывания.

Анализ результатов работы модели на тестовой скважине № 2 показал, что предупреждение о вероятности возникновения прихвата было сгенерировано за 13 часов до возникновения инцидента. Медианная оценка среднеквадратичной ошибки прогнозирования составляет 0,89 т, что является достаточным показателем для выявления признаков предстоящей аварии. При работе алгоритма было сгенерировано семь ложных срабатываний.

Заключение

В данной работе были приведены требования, предъявляемые к алгоритмам, обучающимся «без учителя», для обнаружения аномалий в потоковых данных в режиме реального времени. На основании недостатков разрабатываемых ранее подходов к прогнозированию прихвата колонны был предложен новый метод автоматического обнаружения инцидентов. Алгоритм, основанный на иерархической временной памяти, способен обнаруживать точечные и контекстуальные аномалии в зашумленных данных. Он отвечает требованиям непрерывного обнаружения аномалий в режиме реального времени без предварительного доступа ко всему объему входных данных.



Рис. 9. Результаты работы алгоритма иерархической временной памяти на тестовой выборке, скважина $N \ge 1$ *Fig. 9.* Hierarchical temporal memory results on test dataset, well no. 1



Puc. 10. Результаты работы алгоритма иерархической временной памяти на тестовой выборке, скважина № 2 Fig. 10. Hierarchical temporal memory results on test dataset, well no. 2

Результаты работы алгоритма доказывают его применимость в задаче прогнозирования вероятности возникновения аварий в процессе бурения.

В соответствии с полученными результатами определены направления дальнейших исследований:

- совершенствование методики автоматического прогнозирования прихвата;
- 2) разработка методов автоматической оценки качества входных данных в реальном времени;
- 3) проведение опытно-промышленных испытаний;
- 4) разработка пользовательского интерфейса;
- масштабирование предложенного метода на другие типы осложнений и аварий с целью повышения безопасности и эффективности работ по строительству скважин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Stuck pipe early warning system utilizing moving window machine learning approach / A.S. Omogbolahan, A.M. Beshir, Z.A. Majed, F.I. Ajikobi // Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference. – Abu Dhabi, UAE, 2019. URL: https://doi.org/10.2118/197674-MS (дата обращения 02.03.2022).
- Митчелл Дж. Безаварийное бурение. Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2017. – 364 с.
- Multivariate statistical analysis of stuck drillpipe situations / W.B. Hempkins, R.H. Kingsborough, W.E. Lohec, C.J. Nini // SPE Drilling Engineering. – 1987. – V. 03. – Р. 237–244. URL: https://doi.org/10.2118/14181-PA (дата обращения 02.03.2022).
- Мирзаджанзаде А.Х., Аветисов А.Г., Булатов А.И. Методические указания по применению статистических методов в бурении нефтяных и газовых скважин. – Краснодар: ВНИИКРнефть, 1983. – 316 с.
- Липатов Е.Ю. Исследование и разработка технологии и технических средств для предупреждения и ликвидации прихвата бурильной колонны (на примере месторождений Среднего Приобья): моногр. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2019. – 128 с.
- Weakley R.R. Use of stuck pipe statistics to reduce the occurrence of stuck pipe // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. – New Orleans, USA, 1990. URL: https://doi.org/10.2118/20410-MS (дата обращения 02.03.2022).
- Wisnie A.P., Zhiwei Zhu. Quantifying stuck pipe risk in Gulf of Mexico oil and gas drilling // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. – New Orleans, USA, 1994. URL: https://doi.org/10.2118/28298-MS (дата обращения 02.03.2022).
- Кодиров Ш.Ш., Шестаков А.Л. Разработка искусственной нейронной сети для прогнозирования прихватов колонн бурильных труб // Вестник ЮУрГУ. Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2019. – № 3. – С. 20–32. DOI: 10.14529/ctcr190302
- Borozdin S., Dmitrievsky A., Eremin N. Drilling problems forecast system based on neural network // SPE Annual Caspian Technical Conference. – Virtual, 2020. URL: https://doi.org/ 10.2118/202546-MS (дата обращения 02.03.2022).
- Абу-Абед Ф.Н. Снижение риска при строительстве газовых скважин на базе нейросетевой модели // Газовая промышленность. – 2014. – № S712 (712). – С. 100–102.
- 11. Intelligent prediction of differential pipe sticking by support vector machine compared with conventional artificial neural networks: an

example of Iranian offshore oil fields / J. Reza, K. Reza, A.S. Mahdi, A. Emamzadeh // SPE Drilling & Completion. – 2012. – V. 27. – Р. 586–595. URL: https://doi.org/10.2118/163062-PA (дата обращения 02.03.2022).

- Chamkalani Ali, Pordel Shahri Mojtaba, Saeed Poordad. Support vector machine model: a new methodology for stuck pipe prediction // SPE Unconventional Gas Conference and Exhibition. – Muscat, Oman, 2013. URL: https://doi.org/10.2118/164003-MS (дата обращения 02.03.2022).
- Vajargah Ali Karimi, Sullivan Gregory, Eric van Oort. Automated fluid rheology and ECD management // SPE Deepwater Drilling and Completions Conference. – Galveston, USA, 2016. URL: https://doi.org/10.2118/180331-MS (дата обращения 02.03.2022).
- Stuck-pipe prediction by use of automated real-time modeling and data analysis / K. Salminen, C. Cheatham, M. Smith, Kh. Valiullin // SPE Drilling & Completion. – 2017. – V. 32. – Р. 184–193. URL: https://doi.org/10.2118/178888-PA (дата обращения 02.03.2022).
- Arnaout Mohammad Arghad. Distributed multi-sensor fusion system for drilling rig state detection: Doctoral Thesis. – Leoben, 2014. – 132 p.
- 16. A review of machine learning and deep learning techniques for anomaly detection in IoT data / R. Al-amri, R.K. Murugesan, M. Man, A.F. Abdulateef, M.A. Al-Sharafi, A.A. Alkahtani // Applied Sciences. – 2021. – V. 12. URL: https://doi.org/10.3390/ app11125320 (дата обращения 02.03.2022).
- Машинное обучение / Б. Хенрик, Д. Ричардс, М. Феверолф, И. Рузмайкина. – СПб: Изд-во «Питер», 2021. – 336 с.
- Unsupervised real-time anomaly detection for streaming data / S. Ahmad, A. Lavin, S. Purdy, Z. Agha // Neurocomputing. – 2017. – V. 262. – Р. 134–147. URL: https://doi.org/10.1016/j. neucom.2017.04.070 (дата обращения 02.03.2022).
- Ahmad S., Hawkins J. Properties of sparse distributed representations and their application to Hierarchical Temporal Memory // arXiv. 2015. URL: https://arxiv.org/abs/1503.07469 (дата обращения 02.03.2022).
- Multivariate-time-series-driven real-time anomaly detection based on Bayesian network sensors / N. Ding, H. Gao, H. Bu, H. Ma, H. Si // Sensors. – 2018. – V. 10. URL: https://doi.org/10.3390/s18103367 (дата обращения 02.03.2022).

Поступила: 02.03.2022 г.

Информация об авторах

Щербаков Р.Э., аспирант Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета; главный специалист Центра управления строительством скважин АО «Газпромнефть НТЦ».

Ковалев А.В., кандидат технических наук, доцент отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 622.248.5:004.85

USING UNSUPERVISED MACHINE LEARNING ALGORITHM TO PREVENT THE STICKING OF DRILLING AND CASING STRINGS

Roman E. Shcherbakov^{1,2},

res718@bk.ru

Artem V. Kovalev¹,

Kovalevav@tpu.ru

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

² «Gazpromneft NTC»,

75–79, liter D, Moika River embankment, St. Petersburg, 190000, Russia.

The relevance. Drilling failures and accidents will continue to attract attention in drilling for oil and gas as more complex wells are being drilled across depleted zones to reach deeper reservoir targets. Stuck pipe incident continue to be a major contributor to non-productive time in drilling operations for oil and gas. When a stuck pipe incident occurs, costly corrective actions may include fishing operations, side-tracking the hole, or completely having to drill a new well. Stuck pipe warning signs are often undetected early enough for the deployment of effective mitigation strategies due to human mistakes and crew changes during drilling operations. The unsupervised machine learning algorithm is programmed to automatically detect abnormalities in real-time drilling parameter trends and predict potential stuck pipes, communicate observations in the form of alerts to engineers in advance to allow proactive corrective actions. Early detection of a stuck pipe and mitigating the incident in real time not only help to prevent its occurrence, but also help in making informed decisions to the appropriate freeing mechanism to adopt if it occurs.

The main aim: create the stuck pipe detection model which predicts failure probability during the well drilling using mud logging service data. **Objects:** multivariate-sensing time-series data of mud logging service.

Methods: analysis of current anomaly detection techniques achievments in the field of using machine learning; developing the stuck pipe detection model with open-source Python frameworks.

Results. The authors have developed stuck pipe detection model with HTM algorithm, evaluated performance with test dataset. Promising areas of further research were identified.

Key words:

Drilling operation, stuck pipe, machine learning, multivariate-sensing time-series, anomaly detection, hierarchical temporal memory.

REFERENCES

- Omogbolahan A.S, Beshir A.M., Majed Z.A., Ajikobi F.I. Stuck pipe early warning system utilizing moving window machine learning approaslide *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference*. Abu Dhabi, UAE, 2019. Available at: https://doi.org/10.2118/197674-MS (accessed 2 March 2022).
- Mitchell J. Trouble-free drilling: stuck pipe prevention. Austin, Drilbert Engineering, Incorporated, 2002. 300 p.
- Hempkins W.B., Kingsborough R.H., Lohec W.E., Nini C.J. Multivariate statistical analysis of stuck drillpipe situations. SPE Drilling Engineering, 1987, vol. 3, pp. 237–244. Available at: https://doi.org/10.2118/14181-PA (accessed 2 March 2022).
- Mirzadzhanzade A.H., Avetisov A.G., Bulatov A.I. Metodicheskie ukazaniya po primeneniyu statisticheskikh metodov v burenii neftyanykh i gazovykh skvazhin [Methodological guidelines on the application of statistical methods in oil and gas drilling]. Krasnodar, VNIIKRneft Publ., 1983. 62 p.
- 5. Lipatov E.Yu. Issledovanie i razrabotka tekhnologii i tekhnicheskikh sredstv dlya preduprezhdeniya i likvidatsii prikhvata burilnoy kolonny (na primere mestorozhdeniy Srednego Priobya). Monografiya [Research and development of technology and technical means for prevention and liquidation of drill string sticking (on the example of Middle Priobye fields. Monography]. Tyumen, TyumGNGU Publ., 2015. 128 p.
- Weakley R.R. Use of stuck pipe statistics to reduce the occurrence of stuck pipe. SPE Annual Technical Conference and Exhibition. New Orleans, Louisiana, 1990. Available at: https://doi.org/ 10.2118/20410-MS
- Wisnie A.P., Zhiwei Zhu. Quantifying stuck pipe risk in Gulf of Mexico oil and gas drilling. SPE Annual Technical Conference and Exhibition. New Orleans, USA, 1994. Available at: https://doi.org/10.2118/28298-MS (accessed 2 March 2022).

- Qodirov Sh.Sh., Shestakov A.L. Development of artificial neural network for predicting drill pipe sticking. *Bulletin of the South Ural State University. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2019, vol. 19, no. 3, pp. 20–32. In Rus. DOI: 10.14529/ctcr190302
- Borozdin S., Dmitrievsky A., Eremin N. Drilling problems forecast system based on neural network. SPE Annual Caspian Technical Conference. Virtual, 2020. Available at: https://doi.org/ 10.2118/202546-MS (accessed 2 March 2022).
- Abu-Abed F.N. Snizhenie riska pri stroitelstve gazovykh skvazhin na baze neyrosetevoy modeli [Risk minimization during construction of gas wells based on the neural network model]. *Gas Industry*, 2014, no. S712 (712), pp. 100–102.
- Reza J., Reza K., Mahdi A.S., Emamzadeh A. Intelligent prediction of differential pipe sticking by support vector machine compared with conventional artificial neural networks: an example of Iranian offshore oil fields. SPE Drilling & Completion, 2012, vol. 27, pp. 586–595. Available at: https://doi.org/10.2118/163062-PA (accessed 2 March 2022).
- Chamkalani Ali, Pordel Shahri Mojtaba, Saeed Poordad. Support vector machine model: a new methodology for stuck pipe prediction. SPE Unconventional Gas Conference and Exhibition. Muscat, Oman, 2013. Available at: https://doi.org/10.2118/ 164003-MS (accessed 2 March 2022).
- Vajargah A.K., Sullivan G., Van Oort E. Automated fluid rheology and ECD management. SPE Deepwater Drilling and Completions Conference. Galveston, USA, 2016. Available at: https://doi.org/10.2118/180331-MS (accessed 2 March 2022).
- Salminen K., Cheatham C., Smith M., Valiullin K. Stuck-pipe prediction by use of automated real-time modeling and data analysis. *SPE Drilling & Completion*, 2017, vol. 32, pp. 184–193. Available at: https://doi.org/10.2118/178888-PA (accessed 2 March 2022).

- 15. Arnaout Mohammad Arghad. Distributed multi-sensor fusion system for drilling rig state detection. Doctoral Thesis. Leoben, 2014. 132 p.
- Al-amri R., Murugesan R.K., Man M., Abdulateef A.F., Al-Sharafi M.A., Alkahtani A.A. A review of machine learning and deep learning techniques for anomaly detection in IoT data. *Applied Sciences*, 2021, vol. 12. Available at: https://doi.org/10.3390/ app11125320 (accessed 2 March 2022).
- 17. Brink H., Richards J.W., Fetherolf M. Real-world machine learning. New York, Manning, 2017. 264 p.
- Ahmad S., Lavin A., Purdy S., Agha Z. Unsupervised real-time anomaly detection for streaming data. *Neurocomputing*, 2017, vol. 262, pp. 134–147.

Ahmad S., Hawkins J. Properties of sparse distributed representations and their application to Hierarchical Temporal Memory. 2015. Available at: https://arxiv.org/abs/1503.07469 (accessed 2 March 2022).

 Ding N., Gao H., Bu H., Ma H., Si H. Multivariate-time-seriesdriven real-time anomaly detection based on Bayesian network. *Sensors*, 2018, vol. 10. https://doi.org/10.3390/s18103367 (accessed 2 March 2022).

Received: 2 March 2022.

Information about the authors

Roman E. Shcherbakov, post-graduate student, National Research Tomsk Polytechnic University; principal engineer, «Gazpromneft NTC».

Artem V. Kovalev, Cand Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 628.1.032-026.86(292.471)

ТОКСИЧНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ В ПРИРОДНЫХ ВОДАХ СЕВАСТОПОЛЬСКОЙ ГОРОДСКОЙ АГЛОМЕРАЦИИ: РАСПРЕДЕЛЕНИЕ, ФОН, АНОМАЛИИ

Новиков Дмитрий Анатольевич^{1,2}, NovikovDA@ipgg.sbras.ru

Черных Анатолий Витальевич^{1,2}, ChernykhAV@ipgg.sbras.ru

Хващевская Альбина Анатольевна³, unpc voda@mail.ru

Максимова Анастасия Алексеевна^{1,2}, rock.nastaya64@gmail.com

Деркачев Антон Сергеевич^{1,2},

a.derkachev@g.nsu.ru

Дульцев Федор Федорович^{1,2}, DultsevFF@ipgg.sbras.ru

Ничкова Лариса Александровна⁴, nichkova@sevsu.ru

Сигора Галина Анатольевна⁴, sigora1@yandex.ru

Хоменко Тамара Юрьевна⁴, tamara_homenko21.07@mail.ru

Яхин Тимур Анисович⁵, timalife@mail.ru

- ¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3.
- ² Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, Россия, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1.
- ³ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.
- ⁴ Севастопольский государственный университет, Россия, 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33.
- ⁵ Государственное унитарное предприятие города Севастополя «Водоканал», Россия, 299011, г. Севастополь, ул. Адм. Октябрьского, 4.

Актуальность. До настоящего исследования по природным водам Севастопольской городской агломерации отсутствовали актуальные сведения по распределению широкого спектра высокотоксичных элементов.

Цель: установить характеристики гидрогеохимического фона и изучить распределение высокотоксичных химических элементов в водах питьевого водоснабжения населения Севастопольской городской агломерации на основе актуальных сведений об их химическом составе, полученном современными методами анализа.

Методы. Лабораторное изучение химического состава методами титриметрии, ионной хроматографии, массспектрометрии с индуктивно связанной плазмой проводилось в Проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии Инженерной школы природных ресурсов Томского политехнического университета. Оценка токсикологических особенностей вод проводилась с использованием действующих нормативных документов: СанПиН 1.2.3685-21, ГОСТ Р 51232-98, СанПиН 2.1.3684-21, и рекомендаций Всемирной организации по здравоохранению.

Результаты. Для природных вод территории Севастопольской городской агломерации установлены характеристики гидрогеохимического фона и аномалий. Выявлено, что концентрации большинства изученных токсичных элементов находятся ниже ПДК (V, Cr, Cu, Zn, Mo, Cd, Pb u Bi). Ряд объектов отличается превышением предельно допустимых концентраций по Fe, Mn, Co, Ni u Tl. По нормируемым химическим элементам в настоящее время наиболее неблагоприятные условия характеризуют воды села Колхозное. Практически на всей территории Гераклейского полуострова установлены высокие содержания урана и повышенные мышьяка. Огромное влияние на ухудшение качественных характеристик природных вод оказали засухи 2018–2020 гг., приведшие к росту концентраций практически всех микрокомпонентов не только в поверхностных, но и в подземных водах, включая скважины, родники и колодцы. Выявление роли природных и антропогенных факторов в процессах формирования гидрогеохимического поля эксплуатируемых водоносных горизонтов на территории Севастопольской городской агломерации требует продолжения мониторинговых исследований, начатых в 2018 г.

Ключевые слова:

Природные воды, высокотоксичные элементы, радионуклиды, питьевое водоснабжение населения, Севастопольская городская агломерация, Крым.

Введение

Проблема чистой питьевой воды в мире в последние десятилетия только нарастает. Растущая антропогенная нагрузка оказывает все большее влияние на водные экосистемы. Особенно сильно проявляется загрязнение вод тяжелыми металлами и токсичными элементами первого класса опасности. Согласно постановлению Главного государственного врача РФ (СанПиН 1.2.3685-21), в группу 1 класса опасности входят Ве, As, Hg, Tl и U. Как отмечается в многочисленных работах российских и зарубежных ученых, перечисленные выше элементы обладают высокотоксичными, канцерогенными и мутагенными свойствами [1-21]. При этом таллий (Tl), являясь высокотоксичным элементом, гораздо меньше изучен, чем ртуть, уран и другие [22], что связано с несовершенством классических аналитических методов, имеющих к нему низкую чувствительность. Но экотоксикологическая важность таллия обусловлена его острой токсичностью для живых организмов и сопоставима с таковой для ртути [23]. К тяжелым металлам относится более 30 химических элементов из периодической системы Д.И. Менделеева. В настоящем исследовании рассмотрены: марганец, ванадий, хром, железо, кобальт, никель, медь, цинк, молибден, кадмий, свинец и висмут, т. к. они обладают наибольшей токсичностью. Одними из основных источников загрязнения вод этими элементами выступают автотранспорт и промышленные предприятия.

Как писал великий естествоиспытатель В.И. Вернадский: «...торий стоит вне геохимии воды, торий не входит в водный режим Земли...», потому что считалось, что Th и продукты его распада в воде присутствуют в столь ничтожно малых количествах, которые нельзя было зафиксировать [24]. Современные исследования показали, что Th может являться индикаторным элементом, отражающим вклад как природного, так и техногенного фактора в экологогеохимическую характеристику. Поэтому он также был рассмотрен в рамках настоящей работы. В этой связи основной целью настоящего исследования является оценка распределения высокотоксичных химических элементов в водах питьевого водоснабжения населения Севастопольской городской агломерации (СГА) на основе актуальных сведений об их химическом составе, полученном современными методами анализа.

Материалы и методы

Наш коллектив с 2018 г. занимается изучением особенностей гидрогеологии, гидрогеохимии и механизмов формирования природных вод СГА [25, 26]. В течение этого времени впервые для вод Крымского полуострова на единой методической основе с использованием современной химико-аналитической базы выполнены комплексные изотопно-геохимические исследования, результаты которых отражены в целой серии работ [27–31], при этом оценка их токсикологических особенностей еще не выполнялась и впервые представлена в настоящем исследовании.

В ходе экспедиционных работ в летне-осенний период 2018–2021 гг. было отобрано 105 проб природных вод из 76 объектов в пределах СГА (рис. 1, *a*).

Отбор и предварительная пробоподготовка выполнялись в соответствии с общепринятыми методиками. Лабораторное изучение химического состава методами титриметрии, ионной хроматографии, массспектрометрии с индуктивно связанной плазмой проводилось в Проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии Инженерной школы природных ресурсов Томского политехнического университета (аналитики В.В. Куровская, А.С. Погуца, Э.С. Шведская, Ю.Ф. Татарская, М.А. Глушкова). Оценка токсикологических особенностей вод проводилась с использованием действующих нормативных документов: СанПиН 1.2.3685-21, ГОСТ Р 51232-98, СанПиН 2.1.3684-21, и рекомендаций Всемирной организации по здравоохранению [32–35]. При анализе гидрогеохимической информации определены характеристики распределения фоновых концентраций и установлены гидрогеохимические аномалии для тяжелых металлов и токсичных элементов первого класса опасности. Гидрогеохимический фон – средняя из наиболее часто встречающихся концентраций того или иного компонента подземных вод. Гидрогеохимическая аномалия – концентрация, значительно превышающая фоновую (≥30 %).

Результаты и обсуждение

Ранее отмечалось, что актуальные сведения по природным водам СГА стали появляться недавно и с 2018 г. по настоящее время ведется их мониторинг. В табл. 1 приведены типовые пробы вод Родниковского, Орловского, Бельбекского и Инкерманского водозаборов, активно использующегося населением родника Деспита и Чернореченского водохранилища, которое выступает основным источником водоснабжения населения СГА. Кратко рассмотрим особенности их геохимии.

Воды гидрокарбонатного кальциевого состава Родниковского водозабора приурочены к верхнеюрскому водоносному комплексу, величина их общей минерализации варьирует от 359 до 606 мг/дм³, содержание кремния – от 1,42 до 3,03 мг/дм³. Геохимические параметры среды отвечают окислительной обстановке с Eh +118,7 – +180,5 мВ, нейтральным pH 7,4 и O_{2раств.} 8,03–8,51 мг/дм³. Балансовые запасы подземных вод относятся к категориям B и C₁ и составляют 4,76 и 4,047 тыс. м³/сут, соответственно.

Воды Орловского водозабора преимущественно хлоридно-гидрокарбонатного кальциево-натриевого состава относятся к средне-верхнесарматскому водоносному комплексу. Величина общей минерализации изменяется от 544 до 1213 мг/дм³, содержания кремния – от 4,31 до 7,49 мг/дм³. Геохимические параметры среды изменяются от восстановительной до окислительной обстановки с Еh от –151,2 до +220,3 мВ, характеризуются нейтральным и слабощелочным pH (7,0–8,0) и О_{2раств.} 2,91–7,15 мг/дм³. Балансовые запасы подземных вод относятся к категориям A и B и составляют 28,2 и 11,8 тыс. м³/сут, соответственно.

Воды Бельбекского водозабора гидрокарбонатнохлоридного кальциево-натриевого и гидрокарбонатного кальциевого состава относятся к четвертичному аллювиальному водоносному комплексу. Величина их общей минерализации составляет от 604 до 805 мг/дм³, и содержание кремния варьирует в пределах 4,67–5,17 мг/дм³. Геохимические параметры среды отвечают окислительной обстановке с Eh от +69,3 до +176,3 мВ, нейтральному pH (7,3) и О_{2раств.} 4,52–4,77 мг/дм³. Балансовые запасы подземных вод относятся к категории A и равны 3,5 тыс. м³/сут.



Рис. 1. Карта-схема изученных объектов (а): 1 – водозаборы (1–6 – Родниковский; 7–10, 13 – Инкерманский; 11, 12 – Бельбекский; 14–20 – Орловский); 2 – родники, колодцы (номера 21–67); 3 – поверхностные воды (номера 68–76) и диаграмма Пайпера природных вод СГА (б)

Fig. 1. Schematic map of sampling (a) and Piper diagram of the studied waters (b). Objects: 1 – water intakes (1–6 – Rodnikovsky; 7–10, 13 – Inkerman; 11, 12 – Belbeksky; 14–20 – Orlovsky); 2 – springs, wells (numbers 21–67); 3 – surface waters (numbers 68–76)

Воды Инкерманского водозабора гидрокарбонатного кальциевого состава с величиной общей минерализацией, варьирующей от 485 до 624 мг/дм³, и содержанием кремния 3,88–5,78 мг/дм³ относятся к четвертичному аллювиальному водоносному комплексу.

Геохимические параметры среды отвечают окислительной обстановке с Eh от +131,3 до +168,2 мВ, нейтральному pH (7,3–7,5) и $O_{2 pact B}$ 2,96–5,82 мг/дм³. Балансовые запасы подземных вод относятся к категории A и равны 27,3 тыс. м³/сут.

Вторая группа (родники, колодцы и неглубокие скважины) является наиболее разнообразной по химическому составу. Установлено 13 химических типов от сульфатно-гидрокарбонатно-хлоридного кальциевомагниевого до хлоридного кальциево-натриевого, при доминировании гидрокарбонатного кальциевого типа (рис. 1, *б*). Величина общей минерализации и содержание кремния в них варьирует в больших пределах – от 253 до 2083 мг/дм³ и 1,51–14,02 мг/дм³, соответственно. Наиболее минерализованные воды (более 1 г/дм³) установлены в колодце храма Воскресения Христова (№ 64), в селе Колхозное (№ 54, 63, 65, 66) и в роднике на ул. Громова (Северная сторона г. Севастополь) (№ 67). Геохимические параметры среды отвечают окислительной обстановке с Еh от +5,8 до +209,3 мВ, нейтральным и слабощелочным pH (7,0–8,3) и О_{2раств}, 2,22–15,87 мг/дм³.

No	Год	Объект	nН	М	HCO_3^-	SO4 ²⁻	Cl	Ca ²⁺	Mg^{2+}	Na^+	\mathbf{K}^+	As	Hg	U	Be	Tl
112	Year	Object	pm	мг/дм ³ /mg/l мкг/дм ³ /µg								ıg/l				
		Бе	ельбе	кский	водозаб	op/Belt	oeksky	water	: intake	s	-					
12	2020	Скв. (well) № 3	7,7	604	332	58	31	110	13	27	4	0,200	0,013	1,140	0,05	0,003
11	2020	Скв. (well) № 10	7,7	805	334	114	117	116	24	81	4	0,242	0,019	1,216	н.п.	0,01
	Инкерманский водозабор/Inkerman water intakes															
7	2019	Скв. (well) № 5	7,7	485	278	45	23	99	8	18	2	0,180	0,031	0,690	н.п.	Н.П.
13	2019	Скв. (well) № 6	7,8	624	304	72	43	124	9	31	3	0,216	н.п.	0,809	0,019	Н.П.
10	2019	Скв. (well) № 15	7,7	604	316	73	32	118	9	30	2	0,447	0,026	1,136	н.п.	Н.П.
8	2019	Шахта (mine) № 2	7,7	516	307	43	24	100	12	17	2	0,148	0,005	0,661	0,02	0,003
9	2020	Шахта (mine) № 5	7,7	576	305	77	30	108	12	26	3	0,485	н.п.	1,098	н.п.	Н.П.
			Орло	вский	водозабо	op/Orlo	vsky v	water i	ntakes		-					
17	2019	Скв. (well) № 3	7,5	1128	281	123	345	155	34	157	2	0,590	0,017	1,324	н.п.	Н.П.
17	2020	Скв. (well) № 3	7,7	1122	262	139	344	156	29	163	2	0,461	н.п.	1,344	н.п.	0,016
16	2020	Скв. (well) № 5	7,6	1122	293	138	313	190	31	115	2	0,511	н.п.	1,863	н.п.	0,012
18	2020	Скв. (well) № 7	7,8	1149	264	148	352	156	29	173	2	0,461	н.п.	1,522	н.п.	0,022
14	2020	Скв. (well) № 9	7,5	947	266	96	266	160	31	89	2	0,509	0,001	1,506	н.п.	0,004
19	2019	Скв. (well) № 10	7,6	1162	273	146	354	170	40	144	2	0,415	Н.П.	1,448	Н.П.	0,0006
19	2020	Скв. (well) № 10	7,7	1144	273	138	344	156	31	166	3	0,701	0,020	1,590	н.п.	0,009
15	2020	Скв. (well) 55-61	7,4	1099	336	154	235	180	40	93	2	0,472	0,028	1,743	Н.П.	0,007
20	2020	Скв. (well) № 55–74	7,7	1213	256	142	397	165	31	187	2	0,647	0,003	1,468	н.п.	Н.П.
		Род	нико	вский і	водозабс	p/Rodi	nikovs	ky wa	ter inta	kes						
1	2018	Скв. (well) № 5531	7,9	359	262	6	3	83	3	2	0	0,136	Н.П.	0,130	н.п.	0,0005
4	2018	Скв. (well) № 5566	7,9	430	311	9	5	90	8	6	1	0,362	Н.П.	0,335	0,016	0,003
4	2019	Скв. (well) № 5566	7,6	411	293	8	8	86	9	5	0	0,336	0,008	0,187	н.п.	0,0002
2	2018	Скв. (well) № 5595	7,3	407	293	10	5	91	4	4	0	0,022	Н.П.	0,281	0,016	0,004
2	2019	Скв. (well) № 5595	7,5	412	295	9	6	88	7	5	0	0,228	0,019	0,252	Н.П.	0,001
5	2018	Скв. (well) № 5760	8,1	476	348	7	5	107	5	4	1	0,180	0,019	0,156	Н.П.	0,003
3	2018	Скв. (well) № 5775	8,2	422	303	10	5	93	6	5	1	0,200	Н.П.	0,312	Н.П.	0,003
6	2018	Скв. (well) № 5776	8,2	606	441	10	5	139	5	5	1	0,190	Н.П.	0,301	Н.П.	0,002
			Вод	охран	илище, р	одник	/reserv	/oir, sp	oring							
70	2018	Чернореченское водохранилище	8.0	207	125	15	6	12	4	2	1	0.486	0.020	0 179		0.000
70	2018	Chernorechenskoe reservoir	0,0	207	155	15	0	43	4	3	1	0,480	0,020	0,178	н.п.	0,009
70	2010	Чернореченское водохранилище	82	217	151	7	6	11	4	4	1	0.484	0.042	0 180	пп	0.0004
70	2019	Chernorechenskoe reservoir	0,2	217	151	/	0	44	+	+	1	0,404	0,042	0,109	п.п.	0,0004
37	2018	ролник Леспита	8,0	683	470	28	19	133	18	14	1	0,078	н.п.	0,473	0,02	0,004
37	2019	Despit spring	7,6	608	404	28	23	107	23	16	1	0,114	0,029	0,375	н.п.	0,002
37	2020	Despit spring	7,9	630	405	38	29	104	27	19	1	0,342	н.п.	0,410	н.п.	0,0005

Таблица 1. Химический состав природных вод СГА и содержание в них элементов первого класса опасности

 Table 1.
 Chemical composition of natural waters of the Sevastopol urban agglomeration (SUA) and the content of the first hazard elements class in them

h.n. - ниже предела обнаружения, № - номер на рис. 1, <math>M - величина общей минерализации.

H.n. – below the detection limit, N_{P} – number in Fig. 1, M – total dissolved solids.

Среди поверхностных (третья группа) широко распространены гидрокарбонатные кальциевые воды, меньшим распространением пользуются гидрокарбонатные и гидрокарбонатно-хлоридные кальциевонатриевые и гидрокарбонатные натриевые типы. Геохимические параметры среды отвечают окислительной обстановке с Eh от +95,5 до +177,0 мВ, слабощелочным и щелочным pH (7,9–8,9) и О_{2раств.} 5,02–12,55 мг/дм³.

Остановимся подробнее на распределении наиболее токсичных химических элементов в природных водах (рис. 2).

В водах первой группы (водозаборы) концентрации Ве (мкг/дм³) изменяются от 0,005 до 0,02; As – от 0,14 до 0,70; Hg – от 0,001 до 0,031; Tl – от 0,005 до 0,023 и U – от 0,13 до 1,86. Фоновые концентрации этих элементов имеют следующее распределение (мкг/дм³): U (1,116)>As (0,302)>Be (0,019)>Hg (0,018)>Tl (0,004) (рис. 3). Ни по одному из элементов первого класса опасности нет значений выше ПДК. Практически во всех скважинах Орловского водозабора установлены превышения фоновых значений урана, мышьяка и талия (1,3–1,9; 0,5–07 и 0,02–0,07 мкг/дм³)

соответственно); в скважинах № 10 и 55–61 отмечаются превышения фона по ртути (0,02 и 0,03 мкг/дм³ соответственно). В водах скважины № 10 Бельбекского водозабора установлены превышения фоновых значений талия (0,01 мкг/дм³), урана (1,2 мкг/дм³) и ртути (0,02 мкг/дм³), в скважине № 3 – урана (1,1 мкг/дм³) и бериллия (0,05 мкг/дм³).

Воды шахты № 5 Инкерманского водозабора характеризуются повышенными значениями мышьяка $(0,5 \text{ мкг/дм}^3)$ и таллия $(0,006 \text{ мкг/дм}^3)$; скважины № 15 – мышьяка $(0,05 \text{ мкг/дм}^3)$ и ртути $(0,003 \text{ мкг/дм}^3)$; в шахте № 2 и скважине № 6 установлены превышения фоновых значений бериллия $(0,020 \text{ и } 0,019 \text{ мкг/дм}^3)$, соответственно), в скважине № 5 – ртути $(0,03 \text{ мкг/дм}^3)$. В водах Родниковского водозабора установлены превышения фоновых концентраций мышьяка в скважине № 5566 $(0,4 \text{ мкг/дм}^3)$ и ртути в скважинах № 5760 и 5595 $(0,020 \text{ и } 0,019 \text{ мкг/дм}^3)$, соответственно). Среди тяжелых металлов фоновые содержания уменьшаются от железа к висмуту (мкг/дм^3) : Fe (118,531)>Zn (17,677)>Cr (1,7)>Cu (0,89)>Mn (0,511)>V (0,5)>Ni (0,237)>Mo (0,214)>Co

(0,055)>Pb (0,027)>Cd (0,006)>Bi (0,002). Превышения ПДК по железу выявлены в скважине № 5 Орлов-

ского водозабора (0,43 мг/дм³) и скважине № 5775 Родниковского водозабора (0,42 мг/дм³) (рис. 4).



Рис. 2. Распределение мышьяка, ртути, урана и тория в природных водах СГА **Fig. 2.** Distribution of the concentrations of arsenic, mercury, uranium and thorium in natural waters of SUA

В эксплуатируемых водозаборах концентрации тория изменяются от 0,0004 до 0,015 мкг/дм³, составляя в среднем 0,005 мкг/дм³. Наибольшие его содержания установлены на Орловском и Инкерманском водозаборах (рис. 2).

В водах второй группы (родники, колодцы и неглубокие скважины) содержания элементов первого класса опасности значительно выше (мкг/дм³): Ве от 0,003 до 0,16; As – от 0,05 до 3,61; Hg – от 0,001 до 0,23; Tl – от 0,0005 до 0,48 и U – от 0,014 до 5,37. Их фоновые концентрации снижаются в ряду от урана к таллию (мкг/дм³): U (0,948)>As (0,435)>Hg (0,027)>Be (0,018)>Tl (0,006). Установлено превышение ПДК по таллию в скважине в с. Колхозное (0,48 мкг/дм³). Содержания урана в водах выше фоновых установлены непосредственно на Гераклейском полуострове (родники на ул. Громова, Сарандинакской балке, Максимовой даче), в селах Колхозное и Пироговка (от 0,003 до 0,005 мг/дм³). Значительные концентрации мышьяка выявлены в водах Гераклейского полуострова, водопунктов села Колхозное и практически всей юго-западной окраины СГА (0,001-0,004 мг/дм³). Повышенные содержания ртути выявлены в ряде родников юго-западной окраины СГА, а также в колодцах с. Колхозное (от $3 \cdot 10^{-5}$ до $2 \cdot 10^{-4}$ мг/дм³). Превышение фоновых содержаний таллия установлены в водах Гераклейского полуострова и водопунктах села Колхозное (от 1,7·10⁻⁵ до 4,8·10⁻⁴ мг/дм³). Наибольшие концентрации бериллия выявлены в водах села Колхозное, источников Странный, Деспита, Николаевского, а также в колодце Кую-Алан (от $1,8\cdot10^{-5}$ до $1,6\cdot10^{-4}$ мг/дм³). Стоит отметить, что высокие концентрации практически всех элементов первого класса опасности установлены в водах колодца храма Воскресения Христова. В целом содержания тория в водах второй группы достигают 0,1 мкг/дм³ в колодце и скважине, расположенных в с. Колхозное. Его повышенные содержания также можно отметить в родниках на ул. Громова (№ 67), садового товарищества «Родничок» (№ 47) и скважине села Орловка (№ 34). В водах родников и колодцев фоновые содержания тяжелых металлов имеют схожее распределение и уменьшаются от железа к висмуту (мкг/дм³): Fe(137,103)>Zn(9,865)>Cr(1,793)>Mn(0,903)>Cu(0,679) >Ni(0,603)>V(0,482)>Mo(0,221)>Co(0,102)>Pb(0,056) >Cd (0,008)>Bi (0,003).



Рис. 3. Гистограммы распределения концентраций As (a), U (b), Hg (в), Tl (г) и Be (d) в водах водозаборов (зеленый цвет), родников и колодцев (красный цвет) СГА. Штриховая линия – значения гидрогеохимического поля, пунктирная – гидрогеохимической аномалии

Fig. 3. Histograms of the concentrations distribution for (a) As, (b) U, (c) Hg, (d) Tl, and Be (e) in waters of the SUA water intakes (green) and springs and wells (red). The dashed line is the value of the hydrogeochemical background; the dotted line is the hydrogeochemical anomaly

Превышающие ПДК концентрации Fe установлены в водах с. Колхозное (1,1–2,1 мг/дм³), а также родников Деспита, Странный, Чертова лестница, колодцев с. Санаторное и возле Храма Воскресения Христова (0,3–0,77 мг/дм³) (табл. 2). Превышения ПДК по марганцу установлены в объектах села Колхозное: скважины № 2 (0,57 г/дм³), колодца для питья (0,11 мг/дм³); родников Кильсе-Буруном (0,14 г/дм³), Чертова лестница (0,12 мг/дм³) и колодца в с. Санаторное (0,30 мг/дм³). Наибольшие содержания кобальта (0,31 мг/дм³) выявлены в водах колодца для питья с. Колхозное; никеля (0,041 мг/дм³) – в роднике «Святого Предтечи» с. Оборонное и таллия (0,0004 мг/дм³) – скв. № 1 с. Колхозное.

В химическом составе поверхностных вод СГА (третья группа) практически не обнаружено Ве, содержания остальных элементов первого класса опасности в целом ниже, чем у второй группы, и не превышают ПДК (мкг/дм³): As – от 0,48 до 1,81; Hg – от 0,009 до 0,042; Tl – от 0,002 до 0,009 и U – от 0,16 до 1,59.

Таблица 2. Изученные объекты с превышением предельно допустимых концентраций

Table 2.	Objects	with	excess	of	threshold	limit	value
	(TLV)						

	Действующий	Единицы				
Элемент	ПДК в России	измере-	Номер водопункта			
Element	Current TLV in	ния	Water point number			
	Russia	Units				
Mn	0,1		25, 41, 48, 54, 66, 73			
Fe	0,3	мг/дм ³	3, 16, 34, 37, 41, 44, 48, 51, 53, 54, 64, 65			
Co	0,1	mg/l	66			
Ni	0,02		52			
T1	0,0001		65			

Номер водопункта в таблице совпадает с номером на рис. 1. The number of the water point in the table coincides with the number in Fig. 1.





Рис. 4. Зависимость содержаний тяжелых металлов от величины общей минерализации природных вод СГА. Красная пунктирная линия – значения предельно допустимых концентраций по [32]. Условные обозначения см. на рис. 1

Fig. 4. Dependence of the heavy metals concentration on the value of the total mineralization. Red dotted line – threshold limit value values by [32]. See the legend in Fig. 1

Засуха последних трех лет (за исключением 2021 г.) стала следствием роста концентраций практически всех микрокомпонентов с 2018 по 2020 гг. [36–41]. В 2020 г. в водах Чернореченского водохранилища установлены повышенные содержания ртути и таллия (0,042 и 0,009 мкг/дм³, соответственно); мышьяка – в реках Кача и Ай-Тодорка, оз. Конюшня в с. Орлиное. Также в р. Кача установлено повышенное содержание урана. Среди поверхностных вод наибольшие содержания тория также выявлены в 2020 г. в водах Чернореченского водохранилища (0,025 мкг/дм³), озера Конюшня в селе Орлиное (0,014 мкг/дм³) и р. Черной (0,011 мкг/дм³), при средних значениях, изменяющихся от 0,0002 до 0,0036 мкг/дм³.

В поверхностных водах СГА некоторые фоновые содержания тяжелых металлов отличаются на порядок от ранее описанных групп и уменьшаются от железа к кадмию (мкг/дм³): Fe(66,4)>Mn(4,7)>Cr(1,03)>Cu(0,92) >Zn(0,83)>Ni(0,55)>V (0,33)>Mo(0,17)>Co(0,047)>Pb (0,042)>Bi(0,004)>Cd(0,002). Превышения предельно допустимых концентраций марганца установлены только в реке Черная (0,17 мг/дм³), что требует дополнительных исследований.

Выводы

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

 Впервые для природных вод территории Севастопольской городской агломерации установлены характеристики гидрогеохимического фона. По изученному спектру химических элементов практически все рассмотренные воды Севастопольской городской агломерации не имеют критических концентраций токсичных элементов.

Среди первой группы выявлены повышенные значения урана в водах Орловского водозабора изменяющиеся в интервале 1,32–1,86 мкг/дм³. Воды второй группы (родники, колодцы и неглубокие скважины) отличаются более высокими содержаниями элемен-

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Abd Byty A.W., Gharbi M.A., Assaf A.H. Estimation of the concentration of some heavy metals in groundwater in Rutba City // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – V. 904 (1). – 012009.
- Abojassim A.A., Neama H.H. Radiological and chemical risk assessment from uranium concentrations in groundwater samples collected from Al-Kufa area, Iraq // Water Science and Technology: Water Supply. – 2020. – V. 20 (8). – P. 3194–3206.
- Determination of heavy metals in groundwater around Al-Buraihi sewage station in Taiz City, Yemen / R.Q. Alansi, A.M.A. Mohammed, M.M. Ali, W.A.M. Ghalib, S.C. Ponnappa // Journal of Health and Pollution. – 2021. – V. 11 (30). – P. 1–12.
- Arsenic in groundwater of the Kolkata Municipal Corporation (KMC), India: critical review and modes of mitigation / D. Chakraborti, B. Das, M.M. Rahman, B. Nayak, A. Pal, M.K. Sengupta, S. Ahamed, Md.A. Hossain, U.K. Chowdhury, B. Kumar Biswas, K.C. Saha, R.N. Dutta // Chemosphere. – 2017. – V. 180. – P. 437–447.
- Evaluation of groundwater quality and health risks from contamination in the north edge of the Loess Plateau, Yulin City, Northwest China / H. Su, W. Kang, Y. Xu, J. Wang // Environmental Earth Sciences. – 2017. – V. 76. – P. 467–488.
- Fang H., Lin Z., Fu X. Spatial variation, water quality, and health risk assessment of trace elements in groundwater in Beijing and

тов первого класса опасности (мкг/дм³): Ве – от 0,003 до 0,16; Аѕ – от 0,05 до 3,61; Нg – от 0,001 до 0,23; Tl – от 0,0005 до 0,48 и U – от 0,014 до 5,37. Установлено превышение предельно допустимых концентраций по таллию в скважине в с. Колхозное (0,48 мкг/дм³). Ряд водопунктов села Колхозное имеет также превышение ПДК по тяжелым металлам, высокие и повышенные содержания элементов 1 класса опасности.

- 2. В пределах СГА под действием природных и антропогенных факторов сформировалось сложно построенное гидрогеохимическое поле. Их роль в обогащении вод наиболее токсичными химическими элементами требует продолжения мониторинговых исследований, начатых в 2018 г. К настоящему времени наибольшие концентрации урана установлены непосредственно на Гераклейском полуострове (родники на ул. Громова, Сарандинакской балке, Максимовой даче), в селах Колхозное и Пироговка. Максимальные значения мышьяка выявлены в водах колодцев села Колхозное; ртути - в скважине села Орловка. Высокие концентрации практически всех элементов первого класса опасности установлены в водах колодца храма Воскресения Христова.
- 3. Засуха последних трех лет стала основной причиной роста концентраций практически всех микрокомпонентов с 2018 по 2020 гг. В 2020 г. повышенные содержания ртути и таллия установлены в водах Чернореченского водохранилища (0,042 и 0,009 мкг/дм³, соответственно); мышьяка в реках Кача и Ай-Тодорка, озера Конюшня в с. Орлиное. Также в р. Кача установлены повышенные концентрации урана.

Исследование выполнено при финансовой поддержке проектов Министерства науки и высшего образования РФ №№ FWZZ-2022-0014 и FSWW-0022-2020.

Shijiazhuang, North China Plain // Environmental Science and Pollution Resears lide - 2021. – V. 28 (40). – P. 57046–57059.

- High uranium concentrations in the groundwater of the Rio de Janeiro State, Brazil, mountainous region / J.M. Godoy, P.R. Ferreira, E.M. de Souza, L.I. da Silva, I.C.S. Bittencourt, F. Fraifeld // Journal of the Brazilian Chemical Society. – 2019. – V. 30 (2). – P. 224–233.
- Groundwater beneath the urban area of Khan Younis City, southern Gaza Strip (Palestine): assessment for multi-domestic purposes / M.S. Abu Jabal, I. Abustan, M.R. Rozaimy, H. El Najar // Arabian Journal of Geosciences. – 2017. – V. 10. – P. 257–272.
- Hydrochemical characteristics and the impact of anthropogenic activity on groundwater quality in suburban area of Urmia city, Iran / M. Chitsazan, N. Aghazadeh, Y. Mirzaee, Y. Golestan // Environment, Development and Sustainability. – 2017. – V. 21. – № 1. – P. 1–21.
- Hydrogeochemical and isotopic signature of surface and groundwater in a highly industrialized sector of the Rio de la Plata coastal plain (Argentina) / L. Santucci, E. Carol, G. Borzi, M.G. García // Marine Pollution Bulletin. – 2017. – V. 120. – P. 387–395.
- Ibrahim S.A., Al-Tawash B.S., Abed M.F. Environmental assessment of heavy metals in surface and groundwater at Samarra City, Central Iraq // Iraqi Journal of Science. – 2018. – V. 59 (3). – P. 1277–1284.
- 12. Arsenic speciation and uranium concentrations in drinking water supply wells in Northern Greece: Correlations with redox

indicative parameters and implications for groundwater treatment / I.A. Katsoyiannis, S.J. Hug, A. Ammann, A. Zikoudi, C. Hatziliontos // Science of the Total Environment. – 2007. – V. 383 (1–3). – P. 128–140.

- Dominant geochemical reactions and hazardous metal contamination status in the Kabul's aquifers, Afghanistan / A. Mahaqi, M. Mehiqi, M. Rahimzadeh, J. Hosseinzadeh, M.M. Moheghi, M.A. Moheghy // International Journal of Environmental Science and Technology. – 2021. – V. 18 (12). – P. 4043–4052.
- Mobilization and health risk assessment of fertilizer induced uranium in coastal groundwater / M. Mathivanan, C. Sabarathinam, P. Mohan Viswanathan, V. Senapathi, D. Nadesan, G.G. Indrani, G. Malaimegu, S.S. Kumar // Environmental Researslide – 2022. – V. 203. – 111791.
- Rapid decadal evolution in the groundwater arsenic content of Kolkata, India and its correlation with the practices of her dwellers / A. Malakar, S. Islam, Md.A. Ali, S. Ray // Environmental Monitoring and Assessment. – 2016. – V. 188. – P. 584–595.
- Ratnalu G.V., Dhakate R. Human health hazard evaluation with reference to chromium (Cr+3 and Cr+6) in groundwater of Bengaluru Metropolitan City, South India // Arabian Journal of Geosciences. – 2021. – V. 14 (23). – 2472.
- Risk assessment of heavy metals in drinking water on the human health, Assiut City, and its environs, Egypt / E.M. Seleem, A. Mostafa, M. Mokhtar, S.A. Salman // Arabian Journal of Geosciences. - 2021. - V. 14 (6). - 427.
- Selvakumar S., Chandrasekar N., Kumar G. Hydrogeochemical characteristics and groundwater contamination in the rapid urban development areas of Coimbatore, India // Water Resources and Industry. – 2017. – V. 17. – P. 26–33.
- Spatial analysis and health risk assessment of heavy metals concentration in drinking water resources / R.A. Fallahzadeh, M.T. Ghaneian, M. Miri, M.M. Dashti // Environmental Science and Pollution Researslide – 2017. – V. 24. – P. 24790–24802.
- A critical review on the occurrence and distribution of the uranium- and thorium-decay nuclides and their effect on the quality of groundwater / A. Vengosh, R.M. Coyte, J. Podgorski, T.M. Johnson // Science of the Total Environment. – 2022. – V. 808. – 151914.
- Wilson D.C. Potential urban runoff impacts and contaminant distributions in shoreline and reservoir environments of Lake Havasu, southwestern United States // Science of the Total Environment. – 2018. – V. 621. – P. 95–107.
- Peter A.L.J., Viraraghavan T. Thallium: a review of public health and environmental concerns // Environment International. – 2005. – V. 31 (4). – P. 493–501.
- Kemper F.H., Bertram H.P. Thallium. Metals and their compounds in the environment: occurrence, analysis, and biological relevance. – New York: Weinheim, 1991. – P. 1227–1241.
- Вернадский В.И. Труды по радиогеологии. М.: Наука, 1997. – 319 с.
- 25. Роль системы «вода-порода» в процессах формирования состава природных вод Севастопольской городской агломерации / А.А. Хващевская, Д.А. Новиков, Ю.Г. Копылова, И.В. Сметанина, А.В. Черных, Ф.Ф. Дульцев // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 1. – С. 118–128.
- 26. Новиков Д.А., Черных А.В., Дульцев Ф.Ф. Новый взгляд на гидрогеологические условия города федерального значения Севастополь // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 8. – С. 105–122.

- 27. Новиков Д.А., Черных А.В., Дульцев Ф.Ф. Оценка качества подземных вод верхнеюрских отложений юго-западных районов Крымского полуострова для целей питьевого и сельскохозяйственного водоснабжения // Экология и промышленность России. – 2019. – Т. 2. – № 4. – С. 52–57.
- 28. Первые данные о распределении урана и тория в природных водах Байдарской долины (Крымский полуостров) / Д.А. Новиков, Т.В. Корнеева, Ю.Г. Копылова, А.В. Черных, Ф.Ф. Дульцев, А.А. Хващевская // Химия в интересах устойчивого развития. – 2021. – Т. 29. – № 4. – С. 461–471.
- Distribution of the stable isotopes (δ18O, δD μ δ13C) in natural waters of the Baydar valley (Crimean Peninsula) / D.A. Novikov, L.A. Nichkova, A.V. Chernykh, F.F. Dultsev, A.N. Pyryaev, G.A. Sigora, T.Yu. Khomenko // E3S Web of Conferences. – 2019. – V. 98. – 01038.
- 30. Новые изотопно-гидрогеохимические данные по составу природных вод Байдарской долины (Крымский полуостров) / Д.А. Новиков, Ю.Г. Копылова, А.В. Черных, Ф.Ф. Дульцев, А.Н. Пыряев, А.А. Хващевская, Л.А. Ничкова, Г.А. Сигора, Т.А. Яхин // Геология и геофизика. – 2021. – Т. 62. – № 12. – С. 1705–1726.
- Geochemistry of natural waters of the Baydar valley (Crimean Peninsula) / L.A. Nichkova, D.A. Novikov, A.V. Chernykh, F.F. Dultsev, G.A. Sigora, T.Yu. Khomenko // E3S Web of Conferences. - 2019. - V. 98. - 01036.
- СанПиН 1.2.3685-21 Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. – М., 2021. – 975 с.
- ГОСТ Р 51232-98. Вода питьевая. Общие требования к организации и методам контроля качества. М.: Стандартинформ, 2010. 18 с.
- 34. СанПиН 2.1.3684-21 Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организации и проведению санитарнопротивоэпидемических (профилактических) мероприятий (с изменениями на 26 июня 2021 года). – М., 2021. – 65 с.
- Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first addendum. – Geneva: World Health Organization, 2017. – 631 p.
- Доклад о состоянии и охране окружающей среды на территории города Севастополя в 2018 году. – Севастополь, 2019. – 311 с.
- Доклад о состоянии и охране окружающей среды на территории города Севастополя в 2019 году. – Севастополь, 2020. – 333 с.
- Доклад о состоянии и охране окружающей среды на территории города Севастополя в 2020 году. – Севастополь, 2021. – 316 с.
- Доклад о состоянии и охране окружающей среды на территории Республики Крым в 2018 году. – Симферополь, 2019. – 422 с.
- Доклад о состоянии и охране окружающей среды на территории Республики Крым в 2019 году. – Симферополь, 2020. – 360 с.
- Доклад о состоянии и охране окружающей среды на территории Республики Крым в 2020 году. – Симферополь, 2021. – 404 с.

Поступила 17.01.2022 г.

Информация об авторах

Новиков Д.А., кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН; доцент кафедры геологии месторождений нефти и газа и кафедры общей и региональной геологии Новосибирского национального исследовательского государственного университета.

Черных А.В., научный сотрудник лаборатории гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН; младший научный сотрудник Новосибирского национального исследовательского университета. **Хващевская** А.А., кандидат геолого-минералогических наук, доцент, заведующая проблемной научноисследовательской лаборатории гидрогеохимии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, доцент Отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Максимова А.А., младший научный сотрудник лаборатории гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН; ассистент кафедры минералогии и геохимии Новосибирского национального исследовательского университета.

Деркачев А.С., инженер лаборатории гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН; студент, Новосибирский национальный исследовательский государственный университет.

Дульцев Ф.Ф., научный сотрудник лаборатории гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН; научный сотрудник Новосибирского национального исследовательского университета.

Ничкова Л.А., кандидат технических наук, заведующая кафедрой техносферной безопасности, Севастопольский государственный университет.

Сигора Г.А., кандидат биологических наук, доцент кафедры техносферной безопасности, Севастопольский государственный университет.

Хоменко Т.Ю., ассистент кафедры техносферной безопасности, Севастопольский государственный университет.

Яхин Т.А., начальник отдела насосных станций Государственного унитарного предприятия города Севастополя «Водоканал». UDC 628.1.032-026.86(292.471)

TOXIC ELEMENTS IN NATURAL WATERS OF THE SEVASTOPOL URBAN AGGLOMERATION: DISTRIBUTION, BACKGROUND, ANOMALIES

Dmitry A. Novikov^{1,2}, NovikovDA@ipgg.sbras.ru

Anatoliy V. Chernykh^{1,2}, ChernykhAV@ipgg.sbras.ru

Albina A. Khvacshevskaya³, unpc voda@mail.ru

Anastasia A. Maksimova^{1,2}, rock.nastaya64@gmail.com

Anton S. Derkachev^{1,2}, a.derkachev@g.nsu.ru Fedor F. Dultsev^{1,2}, DultsevFF@ipgg.sbras.ru

Larisa A. Nichkova⁴, nichkova@sevsu.ru

Galina A. Sigora⁴, sigora1@yandex.ru

Tamara Yu. Khomenko⁴, homenko21.07@mail.ru

Timur A. Yakhin⁵, timalife@mail.ru

- ¹ Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Koptyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.
- ² Novosibirsk State University,
 1, Pirogov street, Novosibirsk, 630090, Russia.
- ³ National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.
- ⁴ Sevastopol State University,
 33, Universitetskaya street, Sevastopol, 299053, Russia.
- ⁵ State Unitary Enterprise of the city of Sevastopol «Vodokanal»,4, Adm. Oktyabrsky street, Sevastopol, 299011, Russia.

The relevance. Prior to the present study on the natural waters of the Sevastopol urban agglomeration, there was no relevant information on the distribution of a wide range of highly toxic elements.

The aim of the research is to establish the characteristics of the hydrogeochemical background and study the distribution of highly toxic chemical elements in the drinking water supply of the population of the Sevastopol urban agglomeration based on current information about their chemical composition obtained by modern methods of analysis.

Methods. Laboratory study of the chemical composition by titrimetry, ion chromatography, inductively coupled plasma mass spectrometry was carried out at the Problem Research Laboratory of Hydrogeochemistry of the TPU School of Natural Resources. The assessment of the toxicological characteristics of waters was carried out using the current regulatory documents: SanPiN 1.2.3685-21, GOST R 51232-98, SanPiN 2.1.3684-21, and the recommendations of the World Health Organization.

Results. The hydrogeochemical background of the distribution of highly toxic chemical elements in the natural water of the Sevastopol urban agglomeration are established. The concentration of highly toxic elements (V, Cr, Cu, Zn, Mo, Cd, Pb and Bi) does not exceed the threshold limit value. Several objects are characterized by exceeding the threshold limit value for Fe, Mn, Co, Ni and TI. The waters of the Kolkhoznoe village have the most unfavorable characteristics. Almost throughout the entire territory of the Kheracleian Peninsula, high concentrations of uranium and arsenic were established. The droughts of 2018–2020 had a huge impact on the deterioration of the quality characteristics of natural waters, which led to the increase in the concentrations of almost all microcomponents not only in surface waters, but also in groundwater (including wells and springs). Identification of the role of natural and anthropogenic factors in formation of the hydrogeochemical field of exploited aquifers on the territory of the Sevastopol urban agglomeration requires the continuation of monitoring.

Key words:

Natural waters, highly toxic elements, radionuclides, drinking water supply of the population, Sevastopol urban agglomeration, Crimea Peninsula.

The research was financially supported by projects no. FWZZ-2022-0014 and FSWW-0022-2020 of the Ministry of Science and Education of the Russian Federation.

REFERENCES

- Abd Byty A.W., Gharbi M.A., Assaf A.H. Estimation of the Concentration of some heavy metals in groundwater in Rutba City. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 904 (1), 012009.
- 2. Abojassim A.A., Neama H.H. Radiological and chemical risk assessment from uranium concentrations in groundwater samples

collected from Al-Kufa area, Iraq. *Water Science and Technology: Water Supply*, 2020, vol. 20 (8), pp. 3194–3206.

 Alansi R.Q., Mohammed A.M.A., Ali M.M., Ghalib W.A.M., Ponnappa S.C. Determination of Heavy Metals in Groundwater Around Al-Buraihi Sewage Station in Taiz City, Yemen. *Journal* of *Health and Pollution*, 2021, vol. 11 (30), pp. 1–12.

- Chakraborti D., Das B., Rahman M.M., Nayak B., Pal A., Sengupta M.K., Ahamed S., Hossain Md.A., Chowdhury U.K., Kumar Biswas B., Saha K.C., Dutta R.N. Arsenic in groundwater of the Kolkata Municipal Corporation (KMC), India: critical review and modes of mitigation. *Chemosphere*, 2017, vol. 180, pp. 437–447.
- Su H., Kang W., Xu Y., Wang J. Evaluation of groundwater quality and health risks from contamination in the north edge of the Loess Plateau, Yulin City, Northwest China. *Environmental Earth Sciences*, 2017, vol. 76, pp. 467–488.
- Fang H., Lin Z., Fu X. Spatial variation, water quality, and health risk assessment of trace elements in groundwater in Beijing and Shijiazhuang, North China Plain. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, vol. 28 (40), pp. 57046–57059.
- Godoy J.M., Ferreira P.R., de Souza E.M., da Silva L.I., Bittencourt I.C.S., Fraifeld F. High uranium concentrations in the groundwater of the Rio de Janeiro State, Brazil, mountainous region. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 2019, vol. 30 (2), pp. 224–233.
- Abu Jabal M.S., Abustan I., Rozaimy M.R., El Najar H. Groundwater beneath the urban area of Khan Younis City, southern Gaza Strip (Palestine): assessment for multi-domestic purposes. *Arabian Journal of Geosciences*, 2017, vol. 10, pp. 257–272.
- Chitsazan M., Aghazadeh N., Mirzaee Y., Golestan Y. Hydrochemical characteristics and the impact of anthropogenic activity on groundwater quality in suburban area of Urmia city, Iran. *Environment, Development and Sustainability*, 2017, vol. 21, no. 1, pp. 1–21.
- Santucci L., Carol E., Borzi G., García M.G. Hydrogeochemical and isotopic signature of surface and groundwater in a highly industrialized sector of the Rio de la Plata coastal plain (Argentina). *Marine Pollution Bulletin*, 2017, vol. 120, pp. 387–395.
- Ibrahim S.A., Al-Tawash B.S., Abed M.F. Environmental assessment of heavy metals in surface and groundwater at Samarra City, Central Iraq. *Iraqi Journal of Science*, 2018, vol. 59 (3), pp. 1277–1284.
- Katsoyiannis I.A., Hug S.J., Ammann A., Zikoudi A., Hatziliontos C. Arsenic speciation and uranium concentrations in drinking water supply wells in Northern Greece: correlations with redox indicative parameters and implications for groundwater treatment. *Science of the Total Environment*, 2007, vol. 383 (1–3), pp. 128–140.
- Mahaqi A., Mehiqi M., Rahimzadeh M., Hosseinzadeh J., Moheghi M.M., Moheghy M.A. Dominant geochemical reactions and hazardous metal contamination status in the Kabul's aquifers, Afghanistan. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2021, vol. 18 (12), pp. 4043–4052.
- Mathivanan M., Sabarathinam C., Mohan Viswanathan P., Senapathi V., Nadesan D., Indrani G.G., Malaimegu G., Kumar S.S. Mobilization and health risk assessment of fertilizer induced uranium in coastal groundwater. *Environmental Research*, 2022, vol. 203, 111791.
- Malakar A., Islam S., Ali Md.A., Ray S. Rapid decadal evolution in the groundwater arsenic content of Kolkata, India and its correlation with the practices of her dwellers. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2016, vol. 188, pp. 584–595.
 Ratnalu G.V., Dhakate R. Human health hazard evaluation with
- Ratnalu G.V., Dhakate R. Human health hazard evaluation with reference to chromium (Cr⁺³ and Cr⁺⁶) in groundwater of Bengaluru Metropolitan City, South India. *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, vol. 14 (23), 2472.
- Seleem E.M., Mostafa A., Mokhtar M., Salman S.A. Risk assessment of heavy metals in drinking water on the human health, Assiut City, and its environs, Egypt. *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, vol. 14 (6), 427.
- Selvakumar S., Chandrasekar N., Kumar G. Hydrogeochemical characteristics and groundwater contamination in the rapid urban development areas of Coimbatore, India. *Water Resources and Industry*, 2017, vol. 17, pp. 26–33.
- Fallahzadeh R.A., Ghaneian M.T., Miri M., Dashti M.M. Spatial analysis and health risk assessment of heavy metals concentration in drinking water resources. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, vol. 24, pp. 24790–24802.
- Vengosh A., Coyte R.M., Podgorski J., Johnson T.M. A critical review on the occurrence and distribution of the uranium- and thorium-decay nuclides and their effect on the quality of groundwater. *Science of the Total Environment*, 2022, vol. 808, 151914.

- Wilson D.C. Potential urban runoff impacts and contaminant distributions in shoreline and reservoir environments of Lake Havasu, southwestern United States. *Science of the Total Environment*, 2018, vol. 621, pp. 95–107.
- Peter A.L.J., Viraraghavan T. Thallium: a review of public health and environmental concerns. *Environment International*, 2005, vol. 31 (4), pp. 493–501.
- 23. Kemper F.H., Bertram H.P. *Thallium. Metals and their compounds in the environment: occurrence, analysis, and biological relevance.* New York, Weinheim, 1991. pp. 1227–1241.
- Vernadsky V.I. *Trudy po radiogeologii* [Proceedings on radiogeology]. Moscow, Nauka Publ., 1997. 319 p.
- 25. Khvashchevskaya A.A., Novikov D.A., Kopylova Y.G., Smetanina I.A., Chernykh A.V., Dultsev F.F. The role of the «water–rock» system in formation of natural water composition of the Sevastopol city. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering, 2021, vol. 332, no. 1, pp. 118–128. In Rus.
- Novikov D.A., Chernykh A.V., Dultsev F.F. New look at hydrogeological conditions of the federal city of Sevastopol. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 8, pp. 105–122. In Rus.
- Novikov D.A., Chernykh A.V., Dultsev F.F. Groundwater quality assessment of Upper Jurassic sediments in the southwestern districts of the Crimean Peninsula for drinking and agricultural water supply. *Ecology and Industry of Russia*, 2019, vol. 2, no. 4, pp. 52–57. In Rus.
- Novikov D.A., Korneeva T.V., Kopylova Y.G., Chernykh A.V., Dultsev F.F., Khvashchevskaya A.A. The first data on the distribution of uranium and thorium in the natural waters of the Baydar valley (the Crimean Peninsula). *Chemistry for Sustainable Development*, 2021, vol. 29, no. 4, pp. 461–471. In Rus.
- Novikov D.A., Nichkova L.A., Chernykh A.V., Dultsev F.F., Pyryaev A.N., Sigora G.A., Khomenko T.Yu. Distribution of the stable isotopes (δ18O, δD μ δ13C) in natural waters of the Baydar valley (Crimean Peninsula). *E3S Web of Conferences*, 2019, vol. 98, 01038.
- Novikov D.A., Kopylova Y.G., Chernykh A.V., Dultsev F.F., Pyryaev A.N., Khvashchevskaya A.A., Nichkova L.A., Sigora G.A., Yahin T.A. New data on hydrogeochemical and isotopic composition of natural waters of the Baidar valley (Crimean Peninsula). *Russian Geology and Geophysics*, 2021, vol. 62, no. 12, pp. 1705–1726. In Rus.
- Nichkova L.A., Novikov D.A., Chernykh A.V., Dultsev F.F., Sigora G.A., Khomenko T.Yu. Geochemistry of natural waters of the Baydar valley (Crimean Peninsula). *E3S Web of Conferences*, 2019, vol. 98, 01036.
- 32. SanPiN 1.2.3685-21 Gigienicheskie normativy i trebovaniya k obespecheniyu bezopasnosti i (ili) bezvrednosti dlya cheloveka faktorov sredy obitaniya [Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans]. Moscow, 2021. 975 p.
- GOST R 51232-98. Voda pityevaya. Obshchie trebovaniya k organizatsii i metodam kontrolya kachestva [Drinking water. General requirements for the organization and methods of quality control]. Moscow, Standartinform Publ., 2010. 18 p.
- 34. SanPiN 2.1.3684-21 Sanitarno-epidemiologicheskie trebovaniya k soderzhaniyu territoriy gorodskikh i selskikh poseleniy, k vodnym obyektam, pityevoy vode i pityevomu vodosnabzheniyu, atmosfernomu vozdukhu, pochvam, zhilym pomeshcheniyam, ekspluatatsii proizvodstvennykh, obshchestvennykh pomeshcheniy, organizatsii i provedeniyu sanitarno-protivoepidemicheskikh (profilakticheskikh) meropriyatiy (s izmeneniyami na 26 iyunya 2021 goda) [Sanitary and epidemiological requirements for the maintenance of the territories of urban and rural settlements, for water bodies, drinking water and drinking water supply, atmospheric air, soils, residential premises, operation of industrial, public premises, organization and implementation of sanitary and anti-epidemic (preventive) events (as amended on June 26, 2021)]. Moscow, 2021. 65 p.
- Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first addendum. Geneva: World Health Organization, 2017. 631 p.
- 36. Dokład o sostoyanii i okhrane okruzhayushchey sredy na territorii goroda Sevastopolya v 2018 godu [Report on the state and protec-

tion of the environment in the city of Sevastopol in 2018]. Sevastopol, 2019. 311 p.

- Doklad o sostoyanii i okhrane okruzhayushchey sredy na territorii goroda Sevastopolya v 2019 godu [Report on the state and protection of the environment in the city of Sevastopol in 2019]. Sevastopol, 2020. 333 p.
- Doklad o sostoyanii i okhrane okruzhayushchey sredy na territorii goroda Sevastopolya v 2020 godu [Report on the state and protection of the environment in the city of Sevastopol in 2020]. Sevastopol, 2021. 316 p.
- Doklad o sostoyanii i okhrane okruzhayushchey sredy na territorii Respubliki Krym v 2018 godu [Report on the state and protection

of the environment on the territory of the Republic of Crimea in 2018]. Simferopol, 2019. 422 p.

- Doklad o sostoyanii i okhrane okruzhayushchey sredy na territorii Respubliki Krym v 2019 godu [Report on the state and protection of the environment on the territory of the Republic of Crimea in 2019]. Simferopol, 2020. – 360 p.
- 41. Doklad o sostoyanii i okhrane okruzhayushchey sredy na territorii Respubliki Krym v 2020 godu [Report on the state and protection of the environment on the territory of the Republic of Crimea in 2020]. Simferopol, 2021. 404 p.

Received: 17 January 2022.

Information about the authors

Dmitry A. Novikov, Cand. Sc., head of the laboratory, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences; associate professor, Novosibirsk State University.

Anatoliy V. Chernykh, researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences; junior researcher, Novosibirsk State University.

Albina A. Khvacshevskaya, Cand. Sc., head of the scientific laboratory, National Research Tomsk Polytechnic University.

Anastasia A. Maksimova, junior researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences; assistant, Novosibirsk State University.

Anton S. Derkachev, engineer, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences; student, Novosibirsk State University.

Fedor F. Dultsev, researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences; researcher, Novosibirsk State University.

Larisa A. Nichkova, Cand. Sc., head of the department, Sevastopol State University.

Galina A. Sigora, Cand. Sc., associate professor, Sevastopol State University.

Tamara Yu. Khomenko, assistant, Sevastopol State University.

Timur A. Yakhin, head of department, State Unitary Enterprise of the city of Sevastopol «Vodokanal».

УДК 622.691.4

ИЗУЧЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ В ЗАЩИТНЫХ ФУТЛЯРАХ ПОД АВТОМОБИЛЬНЫМИ И ЖЕЛЕЗНЫМИ ДОРОГАМИ В РЕЗУЛЬТАТЕ УВЕЛИЧЕНИЯ ОБЪЕМА ЗАМЕРЗАЮЩЕЙ ВОДЫ В МЕЖТРУБНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Тарасов Владимир Алексеевич,

vtarasov.1998@mail.ru

Султанмагомедов Тимур Султанмагомедович, tsultanmaga@gmail.com

Султанмагомедов Султанмагомед Магомедтагирович, ftt2010@mail.ru

¹ Уфимский государственный нефтяной технический университет, Россия, 450062, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью снижения риска аварий на переходах магистральных газопроводов, проложенных в защитных футлярах под автомобильными и железными дорогами – одних из наиболее опасных и ответственных участков. Лед, образовавшийся в межтрубном пространстве при наличии сезонно промерзающих и оттаивающих грунтов или при перекачке газа при отрицательной температуре совместно с некачественной установкой торцевых уплотнений, может привести к смятию поперечного сечения газопровода, тем самым повышая риск аварии на данном участке. Проводимые исследования позволят заранее изучить потенциально уязвимые участки переходов с помощью компьютерного моделирования и предусматривать для них комплекс защитных мер.

Цель: оценка возможности повреждения магистральных газопроводов, проложенных в защитных футлярах, льдом, который образовался в межтрубном пространстве; обоснование дополнительных мер и рекомендаций, направленных на обеспечение безопасной эксплуатации подземных переходов магистральных газопроводов под автомобильными и железными дорогами.

Объекты: участки магистральных газопроводов, проложенные в защитных футлярах под автомобильными и железными дорогами в условиях сезонно оттаивающего и промерзающего грунта вблизи защитного футляра или транспортирующие газ при отрицательной температуре.

Методы: математическое моделирование, моделирование методом конечных элементов, методы строительной механики и сопротивления материалов, планирование эксперимента.

Результаты. Определена возможность повреждения магистральных газопроводов, проложенных в защитных футлярах, льдом, который образовался в межтрубном пространстве; предложена математическая модель определения давления, возникающего в межтрубном пространстве вследствие увеличения объема замерзающей воды, и проверена ее адекватность с использованием программного комплекса ANSYS на примере газопровода 219×6 мм и защитного футляра 325×12 мм; обозначены рекомендации для вновь проектируемых газопроводов и их переходов, а также для уже существующих.

Ключевые слова:

Магистральный газопровод, защитный футляр, лед, переходы под автомобильными и железными дорогами, напряженно-деформированное состояние.

Введение

Современные магистральные газопроводы – это сложные линейно-протяженные инженерные сооружения, которые тянутся на многие тысячи километров, проложенные в различных климатических условиях и пересекающие на своем пути большое разнообразие естественных и искусственных препятствий. Одной из составных частей этих сооружений являются подземные переходы магистральных газопроводов под автомобильными и железными дорогами. В настоящее время к сооружению данных участков предъявляются повышенные требования безопасности. Однако, как показывает практика, даже этих мер бывает недостаточно, чтобы избежать аварий.

Важной составляющей управления промышленной безопасностью является анализ техногенного риска. Аварии на обозначенных участках, как правило, имеют более высокую удельную частоту (в пересчете на единицу длины), чем в среднем для линейной части магистральных газопроводов, и могут сопровождать-

е разнонеобходимые данные о зоне потенциального поражеятствий. и прочие данные, можно произвести количественную оценку риска на данном участке. К примеру, стандарт [2] содержит подробное описание последовательных этапов количественного анализа риска применительно к технологическим объектам транспорта газа и газового конденсата и подземных хранилищ газа ПАО «Газпром». Помимо этого, в мировой практике также активно внедряются и применяются различные подходы к оценке риска возникновения аварий на опасных про-

внедряются и применяются различные подходы к оценке риска возникновения аварий на опасных производственных объектах, в число которых входят магистральные газопроводы. Среди них можно отметить применение комплексного метода количественного анализа рисков [3] или применение метода ин-

ся значительными социально-экономическими ущербами [1]. Оценку риска возникновения аварии как на

данных участках, так и на всех прочих, экономиче-

ский ущерб и возможное число пострадавших произ-

водят по различным утвержденным методикам. Имея

дексации для оценки риска с использованием геоинформационных систем [4].

Результирующая оценка рисков по указанным методикам, применительно к переходам магистральных газопроводов под автомобильными и железными дорогами (особенно с высокой интенсивностью движения), говорит о высокой степени опасности этих участков, в первую очередь, для жизни и здоровья людей. Поэтому так важно соблюдение повышенных требований безопасности, предъявляемых к данным участкам магистральных газопроводов на всех этапах жизненного цикла этого объекта: от проектирования до его ликвидации. И хотя полностью исключить возможность возникновения аварий на любых производственных предприятиях нельзя, снизить риск их возникновения все-таки возможно.

Опасные состояния на переходах

Опасное состояние перехода характеризуется совокупностью и характером его дефектов и неисправностей. Дефекты и неисправности, возникающие на данных участках, аналогичны тем, что могут проявиться на линейной части магистральных газопроводов. В первую очередь, это коррозионное разрушение металла вследствие нарушения целостности изоляционного покрытия, гофры и вмятины, продольные трещины, трещины на сварных соединениях и т. п. дефекты. Наличие и дальнейшее их развитие приводит к возникновению опасного состояния, которое впоследствии может привести к разгерметизации газопровода.

Причины и условия их возникновения могут быть различны, начиная с брака строительства и заканчивая естественными процессами коррозии. Однако здесь имеются некоторые особенные условия, не встречающиеся на линейной части. Предпосылки к ним могли быть заложены как на этапе проектирования (например, неверный выбор конструкции перехода, неверная оценка грунтовых условий), так и на этапе строительства.

В результате нарушения требований нормативнотехнической документации, отступлений от требуемых технологий строительства либо же при довольно длительной эксплуатации на таких переходах магистральных газопроводов, проложенных в защитных футлярах, может возникать электрический контакт «труба–футляр» (непосредственное взаимодействие или взаимодействие через коррозионную среду). Такое взаимодействие приводит к инициированию коррозионного разрушения в месте контакта или снижению эффективности электрохимической защиты газопровода [5].

Одной из наиболее важных задач при сооружении переходов подобного типа является качественная герметизация межтрубного пространства с целью предотвращения попадания грунтовых вод. На сегодняшний день разработано множество вариантов исполнения торцевых герметизирующих манжет и укрытий для них. Опыт эксплуатации каждой из них позволил выявить недостатки, которые были устранены в последующих вариантах. И тем не менее разгерметизация межтрубного пространства все-таки случается. Последствия разгерметизации обычно приводят к попаданию грунтовых вод в межтрубное пространство и негативно влияют на состояние стенки защитного футляра и конструкций опорнонаправляющих колец, постепенно разрушая их. В результате данных коррозионных процессов риск аварии на переходах возрастает.

Вышеописанные ситуации к настоящему времени достаточно хорошо изучены, разработаны различные методы и рекомендации для их недопущения или своевременного устранения. Однако была обнаружена одна интересная особенность: возможность потери устойчивости поперечного сечения газопровода в результате образования льда в межтрубном пространстве. В литературе можно встретить лишь несколько публикаций, в которых так или иначе обозначена данная проблема применительно к газораспределительным системам. Возможность возникновения такой ситуации на магистральных газопроводах и предстоит оценить.

Цели и задачи

Основной целью исследования является оценка возможности повреждения магистральных газопроводов, проложенных в защитных футлярах, льдом, который образовался в межтрубном пространстве. Дополнительная цель – обоснование дополнительных мер и рекомендаций, направленных на обеспечение безопасной эксплуатации подземных переходов магистральных газопроводов под автомобильным и и железными. Для этого необходимо последовательно решить ряд задач:

- анализ имеющейся информации по данной проблеме;
- проведение собственных экспериментальных исследований на модели и сравнение их результатов с результатами обследований и испытаний из других источников;
- построение расчетной модели и разработка методики расчета с использованием методов сопротивления материалов и строительной механики;
- построение компьютерной модели в программном комплексе ANSYS и расчет с использованием метода конечных элементов, проверка ее адекватности и сравнение с предложенной расчетной моделью и с экспериментальными исследованиями на реальной модели;
- обоснование дополнительных мер и рекомендаций, направленных на обеспечение безопасной эксплуатации подземных переходов магистральных газопроводов под автомобильными и железными дорогами с учетом имеющихся вариантов решения обозначенной проблемы.

Нормативная база и текущие представления о проблеме на сегодняшний день

В настоящее время при проектировании и сооружении переходов под автомобильными и железными дорогами в Российской Федерации руководствуются требованиями документов [6, 7], а также требованиями специального отраслевого документа [8]. В них установлены нормы проектирования, конструктивные требования, технология строительства, а также требования к контролю качества. Основной (и, собственно, представляющей для нас интерес) конструкцией перехода является прокладка газопровода в защитном футляре.

Одним из примеров зарубежных нормативных документов является стандарт США [9], устанавливающий нормы проектирования и строительства для участков трубопроводов, проложенных под естественными и искусственными препятствиями как с использованием защитных футляров, так и без них. Кроме того, данный стандарт может применяться и для оценки состояния перехода. Пример такого использования стандарта – оценка напряженнодеформированного состояния газопровода, описанная в работе [10]. Имеется также и международный стандарт [11] для проектирования и сооружения переходов трубопроводов, проложенных в защитных футлярах. В зарубежной практике также имеются предложения по отказу от защитного футляра в пользу увеличения толщины стенки газопровода как наиболее экономичного и практичного способа, изложенные в работе [12].

На сегодняшний день потерю устойчивости поперечного сечения газопровода в результате образования льда в межтрубном пространстве по имеющимся данным связывают с одной из двух причин: нахождение сезонно оттаивающего и промерзающего грунта вблизи защитного футляра или транспортировка газа при отрицательных температурах совместно с некачественной установкой торцевых уплотнений и в первом, и во втором случае.

Наличие условий, представленных выше, показывает потенциальную возможность образования и развития вмятин, трещин, различных коррозионных повреждений со всеми вытекающими последствиями (рис. 1). Возможность повреждений такого рода подтвердили результаты обследований рассматриваемых переходов, а также результаты модельных испытаний, описанные в работе [13].



Рис. 1. Смятие газопровода вследствие образования льда в межтрубном пространстве *Fig.* 1. Crumpling of the gas pipeline due to the formation of ice in the inter-pipe space

Происходит это по следующей схеме: в результате разгерметизации торцевых уплотнений грунтовая вода способна проникнуть в межтрубное пространство и привести к потере устойчивости поперечного сечения газопровода (смятию) за счет увеличения объема в процессе замерзания.

Собственные экспериментальные исследования, проведенные на модели, показали схожие результаты. В качестве защитного футляра выступает отрезок трубы длиной 250 мм, диаметром 108 мм и толщиной

стенки 3 мм с приваренным патрубком для заполнения межтрубного пространства водой. Для имитации газопровода используется отрезок трубы длиной 310 мм, диаметром 51 мм и толщиной стенки 0,5 мм. Малая труба помещается внутри большой, опираясь на вырезанные вставки из пенопласта. Концы труб герметизируются самодельными манжетами из резины без всяких усилений и фиксируются на обеих трубах при помощи стальных червячных хомутов. Общий вид модели представлен на рис. 2.



Рис. 2. Общий вид модели для эксперимента: 1 – газопровод; 2 – защитный футляр; 3 – стальной хомут; 4 – резиновая манжета; 5 – пенопластовые вставки-опоры; 6 – патрубок; 7 – крышка

Fig. 2. General view of the model for the experiment: 1 – gas pipeline; 2 – protective case; 3 – steel clamp; 4 – rubber cuff; 5 – styrofoam support inserts; 6 – branch pipe; 7 – cover

Межтрубное пространство модели полностью заполнялось водой, затем помещалось в морозильную камеру на 24 часа до полного замораживания воды, а после подвергалось полному оттаиванию при комнатной температуре. После полного оттаивания модель подверглась осмотру и фиксации результатов: по верхней образующей внутренней трубы в положении 12 часов располагалась продольно вытянутая вмятина, с одного из торцов расширяющаяся при замерзании вода растянула импровизированную манжету (рис. 3).



Puc. 3. Результат эксперимента **Fig. 3.** Result of the experiment

Из рис. З видно, что ситуация очень напоминает результаты обследований, о которых было сказано выше. Смятие (потеря устойчивости поперечного сечения) произошло в той же самой позиции. Данное сходство, очевидно, говорит об одинаковых условиях кристаллизации.

Анализ имеющейся литературы показал, что к настоящему моменту уже существуют некоторые способы решения поставленной проблемы. Стандарт [8] допускает прокладку магистрального газопровода без защитного футляра в случае транспортировки газа с отрицательной температурой или же при наличии многолетнемерзлых грунтов. Однако здесь требуется соответствующее технико-экономическое обоснование, поскольку газопровод подвергается значительным нагрузкам от движущегося транспорта и потребует увеличения значения проектной толщины стенки. При наличии же футляра для борьбы с ледообразованием в межтрубном пространстве (применительно к системам газораспределения) уже разработан ряд технических решений. Самым первым среди них является способ заполнения межтрубного пространства вспененным полимером, описанный в работе [14]. Попытки его модификации привели к появлению конструкций защитных футляров, описанных в работах [15] (использование кольцеобразных отрезков замкнутопористого полимера) и [16] (использование спирально-наматываемых отрезков из рулонного пенополиэтилена). Еще один известный способ заключается в снижении температуры замерзания раствора с помощью порошкообразного хлористого кальция и описан в работе [17]. Однако выводы о необходимости использования этих решений основаны на результатах модельных испытаний, в то время как математически параметры этих явлений еще не были получены. При наличии математической и компьютерной моделей можно оценить напряженно-деформированное состояние перехода без проведения модельных испытаний и принять соответствующие меры.

Расчет давления увеличивающегося в объеме льда в межтрубном пространстве

Природа разрушительной силы льда в замкнутом объеме достаточно широко известна. В литературе можно найти работы, в которых подробно описывается это явление, устанавливаются зависимости давления льда от температуры, от наличия растворенных в замерзающей воде газов [18–20]. Однако спрогнозировать последствия увеличения объема замерзающей воды в замкнутом пространстве довольно трудно. Даже в данном конкретном случае нельзя с уверенностью сказать, что наиболее уязвимым элементом в системе «газопровод-лед-защитный футляр» окажется именно газопровод. Воздействие льда может оказать разрушительное влияние и на защитный футляр, вызывая в нем кольцевые напряжения выше условного или физического предела текучести материала трубы.

Поэтому прежде чем делать какие-либо выводы касательно данной ситуации, необходимо обосновать их расчетами, чтобы адекватно оценить предлагаемые проектные решения.

При замерзании воды объем образовавшегося льда может увеличиваться до 9 % от первоначального объема воды (это показывает отношение плотностей воды и льда). Это говорит о том, что напряжения в стенках обеих труб будут возникать, если межтрубное пространство заполнено водой как минимум на 92 %. На основе информации о расширении льда можно рассчитать кольцевые напряжения в стенке газопровода и защитного футляра, вызванные их деформацией вследствие расширения льда, и сравнить их со значением физического (условного) предела текучести материалов.

Расчет давления увеличивающегося в объеме льда в межтрубном пространстве будем производить на основе взаимосвязи между напряжениями и деформациями в стенках защитного футляра и газопровода. Для решения данной задачи принимаем во внимание, что давление расширяющегося льда одинаково для стенок газопровода и защитного футляра. Избыточное давление внутри газопровода отсутствует (случай, когда газопровод находится на консервации). Торцевые стенки расчетной модели также принимаются недеформируемыми. Расчетная схема представлена на рис. 4.



Рис. 4. Расчетная схема **Fig. 4.** Calculation scheme

Объем межтрубного пространства до и после изменения объема замерзающей воды при деформации газопровода и защитного футляра вычисляется по формулам (1) и (2) соответственно:

$$V_0 = \pi R_0^2 h - \pi r_0^2 h; \tag{1}$$

$$V_1 = \pi R_1^2 h - \pi r_1^2 h.$$
(2)

где R_0 – срединный радиус стенки защитного футляра; r_0 – срединный радиус стенки газопровода; R_1 – срединный радиус стенки защитного футляра после его деформации; r_1 – срединный радиус стенки газопровода после его деформации; h – длина защитного футляра и газопровода.

Увеличение первоначального объема будем выражать через коэффициент расширения k_p – отношение увеличенного объема к первоначальному:

$$k_p = \frac{V_1}{V_0} = \frac{\pi R_1^2 h - \pi r_1^2 h}{\pi R_0^2 h - \pi r_0^2 h} = \frac{R_1^2 - r_1^2}{R_0^2 - r_0^2}.$$
 (3)

Исходя из формулы (3) определяется новое значение срединного радиуса стенки газопровода r₁:

$$r_1 = \sqrt{R_1^2 - k_p (R_0^2 - r_0^2)} \,. \tag{4}$$

Относительное удлинение стенки газопровода определяется по формуле (5):

$$\varepsilon_{\rm KII}^r = \frac{r_1 - r_0}{r_0} \ .$$
 (5)

Обобщенный закон Гука для плоского напряженного состояния газопровода имеет вид:

$$\begin{cases} \varepsilon_{\mathrm{K}\mathrm{u}}^{r} = \frac{\sigma_{\mathrm{K}\mathrm{u}}^{r}}{E} - \nu \frac{\sigma_{\mathrm{n}\mathrm{p}}^{r}}{E} \\ \varepsilon_{\mathrm{n}\mathrm{p}}^{r} = \frac{\sigma_{\mathrm{n}\mathrm{p}}^{r}}{E} - \nu \frac{\sigma_{\mathrm{K}\mathrm{u}}^{r}}{E} \end{cases}$$
(6)

где E – модуль упругости стали; ε_{np}^{r} – относительные деформации от действия продольных напряжений; $\sigma_{\kappa u}^{r}$ – кольцевые напряжения в стенке газопровода; σ_{np}^{r} – продольные напряжения в стенке газопровода; ν – коэффициент Пуассона.

Образовавшийся лед будет препятствовать продольным перемещениям газопровода, поэтому значение продольных напряжений в стенке трубы определяется как $\nu \sigma_{\text{кц}}^r$. На основе этого получаем формулу для расчета кольцевых напряжений $\sigma_{\text{кu}}^r$:

$$\sigma_{\mathrm{K}\mathrm{I}\mathrm{I}}^{r} = \frac{E\varepsilon_{\mathrm{K}\mathrm{I}}^{r}}{1-\nu^{2}}.$$
(7)

97

Давление, вызвавшее данные кольцевые напряжения в стенке газопровода (8):

$$p_r = \frac{\sigma_{\kappa_{\rm H}}^r \delta_r}{r_0},\tag{8}$$

где δ_r – толщина стенки газопровода.

Однако расширение льда оказывает одновременное влияние на обе оболочки. Это означает, что деформации в стенках газопровода и защитного футляра зависят друг от друга, т. к. являются составными параметрами одного и того же объема – чем больше деформируется внешняя оболочка, тем меньше деформируется внутренняя, и наоборот. Чтобы учесть эту зависимость, зададимся некоторым значением кольцевых напряжений в стенке защитного футляра $\sigma_{\kappa ц}^{R}$ и определим соответствующие им деформации в стенке защитного футляра $\varepsilon_{\kappa ц}^{R}$ по закону Гука. Исходя из этих данных получаем новое значение срединного радиуса стенки защитного футляра R_1 , которое можно использовать в формуле (4) при определении нового радиуса r_1 .

Поскольку мы условились, что давление расширяющегося льда распространяется во все стороны одинаково и равномерно ($p_R=p_r$), можно определить величину давления, вызывающего конкретные напряжения и деформации в стенке газопровода с учетом конкретных напряжений и деформаций в

стенке защитного футляра. Данное давление будет соответствовать текущему коэффициенту расширения. Для этого достаточно найти общий корень двух уравнений (9) и (10), приравняв их между собой:

$$p_R = \frac{\sigma_{\kappa_{\rm H}}^R \delta_R}{R_0}; \qquad (9)$$

$$p_r = \frac{E\delta_r \left(r_0 - \sqrt{R_1^2 - k_p (R_0^2 - r_0^2)} \right)}{r_0^2 (1 - \nu^2)},\tag{10}$$

где *R*₁ определяется следующим образом:

$$R_1 = R_0 \left(1 + \frac{\sigma_{\mathrm{KII}}^R (1 - \nu^2)}{E} \right) \,.$$

 $\sigma_{\kappa \mu}^{R}$ – кольцевые напряжения в стенке защитного футляра; δ_{R} – толщина стенки защитного футляра.

Решая эти уравнения графически (рис. 5), находим точку пересечения графиков этих функций с координатами (σ_{Ku}^{R} ; p). Это и будет искомое значение давления, вызванное изменением объема льда в межтрубном пространстве в k_p раз, соответствующее напряжению σ_{Ku}^{R} в стенке футляра и σ_{Ku}^{r} в стенке газопровода. Напряжения и деформации в стенке газопровода можно определить из формул (8) и (7), используя полученное значение давления.



Рис. 5. График для определения давления льда р в межтрубном пространстве **Fig. 5.** Graph for determining ice pressure in the inter-pipe space

Таким образом, увеличивая значение коэффициента расширения и анализируя изменение кольцевых напряжений для стенки газопровода и защитного футляра, можно предположить, на каком этапе и что конкретно первым потеряет устойчивость поперечного сечения стенки трубы – газопровод или защитный футляр.

Моделирование с использованием программного комплекса ANSYS

Расчет производится в модуле Static Structural Mechanical. При первичном расчете для построения компьютерной модели использовались материалы и изделия, которые были применены в испытаниях, описанных в работе [5]. В качестве защитного футляра выступает отрезок трубы 325×12 мм длиной 1,5 м, газопровод представлен трубой 219×6 мм длиной 1,5 м. Материал труб – сталь $09\Gamma 2C$ с временным сопротивлением 490 МПа и пределом текучести 345 МПа, модуль упругости – $2,06 \times 10^5$ МПа. В дальнейшем, изменяя каждый из этих параметров, можно получать результаты для различных переходов. Тип опоры – неподвижная (fixed support), устанавливается по торцам газопровода и защитного футляра. Давление *P* прикладывается к внутренней поверхности защитного футляра и к наружной поверхности газопровода. Величиной развиваемого в межтрубном пространстве давления задаемся исходя из результатов расчетов вышеописанной математической модели, в зависимости от коэффициента расширения льда. Результаты расчета для давления P=25,722 МПа, соответствующего коэффициенту расширения $k_p=1,009$, представлены на рис. 6. Результаты расчетов при различных значениях давления в межтрубном пространстве можно представить в виде таблицы и в виде графиков (рис. 7–9).



Рис. 6. Распределение напряжений в защитном футляре (сверху) и газопроводе (снизу), соответствующее давлению в межтрубном пространстве – 25,722 МПа

Fig. 6. Distribution of stresses in the protective case (top) and gas pipeline (bottom) corresponding to the pressure in the inter-pipe space – 25,722 MPa

Динамика роста напряжений в стенках труб показывает, что в стенке газопровода при данном давлении они выше, вероятнее всего, его оболочка и потеряет устойчивость.

На данном этапе модель не учитывает термодинамические основы образования льда и представляет собой задачу из области статики для количественной оценки повреждений газопровода и защитного футляра, где лед выступает в качестве абсолютно твердого тела. На практике же поведение льда несколько сложнее: лед также является деформируемым телом и обладает некоторой упругостью E; имеет в своем составе пористые включения, заполненные газами, которые способствуют снижению скорости роста давления; при повышении давления в замерзающей воде равновесное состояние «вода-лед» смещается в сторону меньших температур, понижая температуру замерзания воды.

Сравнивая результаты расчетов по обеим моделям, делаем вывод, что предложенная математическая модель дает близкие значения напряжений (максимальное расхождение 5,8 % до достижения предела текучести) и деформаций (максимальное расхождение 6,2 % до достижения предела текучести) в стенках труб. Небольшое расхождение результатов по мере роста давления сохраняется лишь до тех пор, пока в стенке одной из труб не будет превышен предел текучести для данного материала. Аналитически вычислить истинные деформации по представленной модели в таком случае оказывается невозможно.

<i>Table.</i> Results of calculations based on the proposed mathematical model and in the Ansys software package										
Шаги/Steps	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
kp	1,001	1,002	1,003	1,004	1,005	1,006	1,007	1,008	1,009	1,01
Р, МПа/МРа	2,858	5,716	8,574	11,433	14,291	17,149	20,007	22,865	25,722	28,58
σr, MΠa/MPa	50,73	101,47	152,20	202,93	253,66	304,39	355,12	405,84	456,57	507,30
σR, MΠa/MPa	37,28	74,55	111,83	149,10	186,37	223,65	260,92	298,19	335,46	372,73
Δr, мм/mm	0,0239	0,0477	0,0716	0,0955	0,1193	0,1432	0,1671	0,1909	0,2148	0,2387
Δ R , мм/mm	0,0258	0,0515	0,0773	0,1031	0,1288	0,1546	0,1804	0,2062	0,2319	0,2577
σr(Ans), MΠa/MPa	47,93	95,87	143,80	191,75	239,68	287,61	335,54	352,36	396,93	442,30
σR(Ans), MΠa/MPa	35,81	71,63	107,44	143,26	179,08	214,89	250,70	286,52	322,32	357,71
∆r(Ans), мм/mm	0,0253	0,0507	0,0760	0,1013	0,1266	0,1519	0,1773	0,6804	3,5169	6,4078
$\Delta R(Ans)$, MM/mm	0,0265	0,0530	0,0795	0,1061	0,1326	0,1591	0,1856	0,2121	0,2386	0,2637

Таблица. Результаты расчетов по предложенной математической модели и в программном комплексе ANSYS **Table Волица in the Annual Sections based on the proposed mathematical model and in the Annual Sections based on the proposed mathematical model and in the Annual Sections based on the proposed mathematical model and in the Annual Sections based on the proposed mathematical model and in the Annual Sections based on the proposed mathematical model and in the Annual Sections based on the proposed mathematical model and in the Annual Sections based on the proposed mathematical model and in the Annual Sections based on the proposed mathematical model and in the Annual Sections based on the proposed mathematical model and in the Annual Sections based on the Proposed mathematical model and in the Annual Sections based on the Proposed mathematical model and in the Annual Sections based on the Proposed mathematical model and in the Annual Sections based on the Proposed mathematical model and in the Annual Sections based on the Proposed mathematical model and in the Annual Sections based on the Proposed mathematical model and in the Annual Sections based on the Proposed mathematical model and in the Annual Sections based on the Proposed mathematical model and in the Annual Sections based on the Proposed mathematical model and in the Annual Sections based on the Proposed mathematical model and in the Annual Sections based on the Proposed mathematical model and the Proposed mathematical model and the Proposed mathematical model and the Proposed mathematical model and the Proposed mathematical model and the Proposed mathematical model and the Proposed mathematical model and the Proposed mathematical model and the Proposed mathematical model and the Proposed mathematical model and the Proposed mathematical model and the Proposed mathematical model and the Proposed mathematical model and the Proposed mathematical model and the Proposed mathematical model and the Proposed mathematical model and the Proposed mathematical mo**



Рис. 7. Графическое представление результатов расчета напряжений в стенках труб по предложенной математической модели ($\sigma_R u \sigma_r$) и в программном комплексе ANSYS ($\sigma_R(Ans) u \sigma_r(Ans)$)





Рис. 8. Графическое представление результатов расчета деформаций в стенке защитного футляра по предложенной математической модели (ΔR) и в программном комплексе ANSYS (ΔR(Ans))





Рис. 9. Графическое представление результатов расчета деформаций в стенке газопровода по предложенной математической модели (Δr) и в программном комплексе ANSYS (Δr(Ans))

Fig. 9. Graphical representation of the results of the calculation of deformations in the gas pipeline wall according to the proposed mathematical model (Δr) and in the ANSYS software package ($\Delta r(Ans)$)

Заключение

При проектировании или оценке состояния переходов магистральных газопроводов под автомобильными и железными дорогами особое внимание должно быть уделено таким факторам, как температура эксплуатации, уровень грунтовых вод и его прогнозируемые изменения, возможность промерзания грунтов при смене сезонных температур, наличие вблизи футляра многолетнемерзлых грунтов. Совокупность этих факторов может привести к образованию льда в межтрубном пространстве и повреждению газопровода и защитного футляра. Следует также учитывать, что для труб большого диаметра объем межтрубного пространства значительно больше, поэтому пройдет больше времени, прежде чем вода заполнит его хотя бы на 92 %. Однако не стоит забывать, что кольцевые напряжения от внешнего или внутреннего давления в стенке труб увеличиваются пропорционально их диаметру, поэтому при недостаточной толщине стенок газопровод или футляр могут подвергнутся смятию при более низких значениях давления льда в межтрубном пространстве, чем для труб меньшего диаметра.

Возможных сценариев при неправильной оценке ситуации может быть достаточно много, поэтому принятие правильных решений по выделенным аспектам может значительно снизить риск аварии на данных участках.

Предложенная математическая модель расчета позволяет оценить величину давления льда в межтрубном пространстве в зависимости от изменения его объема. Проанализировав степень воздействия ледовых образований в межтрубном пространстве на газопровод и защитный футляр, можно определить необходимость использования дополнительных мер по предотвращению ледообразования. На основании полученных результатов на текущем этапе можно сделать ряд практических выводов:

- При проектировании новых магистральных газопроводов и их переходов под автомобильными и железными дорогами, прокладываемых в условиях многолетнемерзлых грунтов, сезонно промерзающих и протаивающих грунтов, а также при отрицательной температуре перекачки газа, следует рассмотреть вариант прокладки без использования защитного футляра. В этом случае необходимо представить соответствующее технико-экономическое обоснование для увеличения толщины стенки газопровода и обеспечения последующей безопасности при эксплуатации.
- Если конструкция перехода все же предполагает защитный футляр, при проектировании можно воспользоваться предложенной математической моделью или компьютерной моделью для определения опасного состояния перехода и условий, при которых оно возникает.
- На этапе строительства обеспечить надлежащие входной контроль поступающих материалов для герметизации межтрубного пространства, пооперационный контроль процесса установки резиновых манжет и укрытий для них, приемочный контроль выполненных работ по герметизации межтрубного пространства.
- Для предотвращения ледообразования в межтрубном пространстве следует рассмотреть возможность применения одного из устройств и способов, предложенных в работах [15–17].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Обоснование нормативных требований к пересечениям магистральных газопроводов с автомобильными и железными дорогами методами анализа риска / С.А. Ковалёв, К.С. Железов, А.Н. Ершова, М.А. Киркин // Научно-технический сборник Вести газовой науки. – 2017. – № 1 (29). – С. 142–153.
- СТО Газпром 2-2.3-351-2009. Стандарт организации Газпром. Методические указания по проведению анализа риска для опасных производственных объектов газотранспортных предприятий ОАО «Газпром». – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2009. – 272 с.
- Han Z.Y., Weng W.G. An integrated quantitative risk analysis method for natural gas pipeline network // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. – 2010. – V. 23. – P. 428–436.
- Applying indexing method to gas pipeline risk assessment by using GIS: a case study in Savadkooh, North of Iran / H.R. Jafari, S. Karimi, G.N. Bidhendi, M. Jabari, N.K. Ghahi // Journal of Environmental Protection. – 2011. – V. 2. – P. 947–955.
- Бирюков А.В., Коробченко Д.А., Захаров В.В. О проблеме возникновения электрических контактов «труба-футляр» на переходах стальных подземных газопроводов сетей газораспределения через естественные и искусственные преграды // Научно-технические проблемы совершенствования и развития систем газоэнергоснабжения. – 2019. – № 1. – С. 33–39.
- СП 36.13330.2012 Магистральные трубопроводы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.06-85* (с Изменениями № 1, 2, 3). – М.: Стандартинформ, 2019. – 91 с.
- СП 86.13330.2012 Магистральные трубопроводы. Актуализированная редакция СНиП III-42-80* (с Изменениями № 1, 2). М.: Стандартинформ, 2018. – 161 с.
- СТО Газпром 2-2.1-249-2008 Стандарт организации Газпром. Магистральные газопроводы. – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2008. – 157 с.
- API RP 1102, Steel Pipelines Crossing Railroads and Highways. URL: https://vdocuments.site/api-1102-pipelines-crossingrailroad-highways.html (дата обращения: 10.11.2021).

- The implementation of API RP 1102 code to evaluate gas pipeline road crossing / N. Siswantoro, M.B. Zaman, S. Priyanta, D. Priyanta // Maritime Safety International Conference. – Bali: Clausius Scientific Press, 2018. – P. 240–248.
- ISO 16440:2016. Petroleum and natural gas industries Pipeline transportation systems – design, construction and maintenance of steel cased pipelines. URL: https://www.iso.org/obp/ui/ #iso:std:iso:16440:ed-1:v1:en (дата обращения: 10.11.2021).
- Xueshen Z., Zeliang Y., Peng H. Innovation design of longdistance pipelines buried under high-filling planned roads // Natural Gas Industry B. – 2015. – V. 2. – P. 198–202.
- Повышение безопасности подземных газопроводов в защитных футлярах / Ю.Ю. Федоров, О.Н. Буренина, С.В. Васильев, П.В. Ксенофонтов // Газовая промышленность. 2019. № 7 (787). С. 88–92.
- System for roadbed traversing by pipeline: Patent 3774403 USA. Fil. 08.09.1971; Publ. 27.11.1973.
- Защитный фугляр: пат. Рос. Федерация, № 183262, заявл. 29.12.2017; опубл. 17.09.2018. Бюл. № 26. – 4 с.
- Устройство для защиты газопроводов от механических повреждений: пат. Рос. Федерация, № 202636, заявл. 23.10.2019; опубл. 01.03.2021. Бюл. № 7. – 6 с.
- Способ предотвращения замерзания грунтовых вод в защитных футлярах газопроводов: пат. Рос. Федерация, № 2730754, заявл. 23.10.2019; опубл. 25.08.2020. Бюл. № 24. – 4 с.
- Самылова Ю.А. Численное моделирование замерзания воды с растворенным газом в замкнутых объемах: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Тюмень, 2010. – 23 с.
- Васильев В.И., Михайлов В.А., Попов В.В. Замерзание воды в замкнутом объеме // I Евразийский симпозиум по проблемам прочности материалов и машин для регионов холодного климата. – Якутск: Якутский филиал Изд-ва СО РАН, 2002. – С. 41–48.
- Sugawa M., Seki N., Kimoto K. Freezing limit of water in a closed circular tube // Wärme – und Stoffübertragung. – 1983. – V. 17. – P. 187–192.

Поступила 01.04.2022 г.

Информация об авторах

Тарасов В.А., магистрант кафедры проектирования и строительства объектов нефтяной и газовой промышленности, Уфимский государственный нефтяной технический университет.

Султанмагомедов Т.С., аспирант кафедры транспорта и хранения нефти и газа, ассистент кафедры проектирования и строительства объектов нефтяной и газовой промышленности, Уфимский государственный нефтяной технический университет.

Султанмагомедов С.М., доктор технических наук, профессор кафедры проектирования и строительства объектов нефтяной и газовой промышленности, декан факультета трубопроводного транспорта, академик РАЕН, Уфимский государственный нефтяной технический университет.

UDC 622.691.4

STUDY OF THE PROBLEM OF STABILITY LOSS OF THE MAIN GAS PIPELINES CROSS-SECTION IN PROTECTIVE CASES UNDER HIGHWAYS AND RAILWAY LINES AS A RESULT OF INCREASE IN THE VOLUME OF FREEZING WATER IN THE INTER-PIPE SPACE

Vladimir A. Tarasov¹,

vtarasov.1998@mail.ru

Timur S. Sultanmagomedov¹, tsultanmaga@gmail.com

isultaninaga@ginali.com

Sultanmagomed M. Sultanmagomedov¹,

ftt2010@mail.ru

¹ Ufa State Petroleum Technological University,

1, Kosmonavtov street, Ufa, 450062, Russia.

The relevance of the study is caused by the need to reduce the risk of accidents at the crossings of trunk gas pipelines laid in protective cases under highways and railway lines – one of the most dangerous and responsible sections. Ice formed in the inter-pipe space in the presence of seasonally freezing and thawing soils or when pumping gas at negative temperature together with poor-quality installation of end sealing cuffs can lead to stability loss of the gas pipeline cross-section, thereby increasing the risk of an accident at this site. The conducted research will allow us to investigate potentially vulnerable sections of crossings in advance using computer modeling and provide for them a set of protective measures.

The aim of the research is to assess the possibility of damage to trunk gas pipelines laid in protective cases by ice formed in the inter-pipe space; justify the additional measures and recommendations aimed at ensuring the safe operation of underground crossings of trunk gas pipelines under highways and railway lines.

Objects: sections of trunk gas pipelines laid in protective cases under highways and railway lines in seasonally thawing and freezing soil near the protective case or transporting gas at a negative temperature.

Methods: mathematical modeling, finite element modeling in the ANSYS software package, methods of structural mechanics and resistance of materials, experiment planning.

Results. The possibility of damage to trunk gas pipelines laid in protective cases by ice formed in the inter-pipe space was determined; a mathematical model for determining the pressure arising in the inter-pipe space due to increase in freezing water volume was proposed and its adequacy was verified using the ANSYS software package on the example of a 219×6 mm gas pipeline and a 325×12 mm protective case; recommendations for newly designed gas pipelines and their transitions, as well as for existing ones, were indicated.

Key words:

Trunk gas pipeline, protective case, ice, crossings under highways and railway lines, stress-strain state.

REFERENCES

- Kovalev S.A., Zhelezov K.S., Ershova A.N., Kirkin M.A. Substantiation of regulatory requirements for intersections of gas mains and motor roads or railways using methods of risk analysis. *Scientific and technical collection of the News of gas science*, 2017, vol. 1 (29), pp. 142–153. In Rus.
- STO Gazprom 2-2.3-351-2009 Standart organizatsii Gazprom. Metodicheskie ukazaniya po provedeniyu analiza riska dlya opasnykh proizvodstvennykh obektov gazotransportnykh predpriyatii OAO «Gazprom» [STO Gazprom 2-2.3-351-2009 Gazprom organization standard. Methodological guidelines for conducting risk analysis for hazardous production facilities of Gazprom JSC gas transportation]. Moscow, Gazprom VNIIGAZ LLC, 2009. 272 p.
- 3. Han Z.Y., Weng W.G. An integrated quantitative risk analysis method for natural gas pipeline network. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2010, vol. 23, pp. 428–436.
- Jafari H.R., Karimi S., Bidhendi G.N., Jabari M., Ghahi N.K. Applying indexing method to gas pipeline risk assessment by using GIS: a case study in Savadkooh, North of Iran. *Journal of Environmental Protection*, 2011, vol. 2, pp. 947–955.
- Biryukov A.V., Korobchenko D.A., Zakharov V.V. About the problem of the occurrence of electrical contacts «pipe-case» at the crossings of steel underground gas pipelines of gas distribution networks through natural and artificial barriers. *Scientific and technical problems of improvement and development of gas power supply systems*, 2019, vol. 1, pp. 33–39. In Rus.
- SP 36.13330.2012 Magistralnye truboprovody. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 2.05.06-85* (s Izmeneniyami No 1, 2, 3) [SP 36.13330.2012 Main pipelines. Updated version of SN&P 2.05.06-

85* (with amendments No. 1, 2, 3)]. Moscow, Standarinform Publ., 2019. 91 p.

- SP 86.13330.2014 Magistralnye truboprovody. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP III-42-80* (s Izmeneniyami No 1, 2) [SP 86.13330.2014 Main (Trunk) pipelines. Updated version of SN&P III-42-80* (with amendments No. 1, 2)]. Moscow, Standarinform Publ., 2018. 161 p.
- STO Gazprom 2-2.1-249-2008 Standart organizatsii Gazprom. Magistralnye gazoprovody [STO Gazprom 2-2.1-249-2008 Gazprom organization standard. Main gas pipelines]. Moscow, Gazprom VNIIGAZ LLC, 2008. 157 p.
- API RP 1102, Steel Pipelines Crossing Railroads and Highways. Available at: https://vdocuments.site/api-1102-pipelines-crossingrailroad-highways.html (accessed 10 November 2021).
- Siswantoro N., Zaman M.B., Priyanta S., Priyanta D. The implementation of API RP 1102 code to evaluate gas pipeline road crossing. *Maritime Safety International Conference*. Bali, Clausius Scientific Press, 2018. pp. 240–248.
- ISO 16440:2016. Petroleum and natural gas industries pipeline transportation systems – design, construction and maintenance of steel cased pipelines. Available at: https://www.iso.org/obp/ui/ #iso:std:iso:16440:ed-1:v1:en (accessed 10 November 2021).
- Xueshen Z., Zeliang Y., Peng H. Innovation design of longdistance pipelines buried under high-filling planned roads. *Natural Gas Industry B*, 2015, vol. 2, pp. 198–202.
- Fedorov Yu.Yu., Burenina O.N., Vasilyev S.V., Ksenofontov P.V. Enhancing safety of underground gas pipelines in protective shields. *Gas industry*, 2019, vol. 7 (787), pp. 88–92. In Rus.
- Ralph H. System for roadbed traversing by pipeline. Cushing. Patent 3774403 USA, 1973.

- Vasilyev S.V., Ksenofontov P.V., Popov S.N., Savvina A.V., Fedorov Yu.Yu. Zashitniy futlyar [Protective case]. Patent RF, no. 183262, 2018.
- Popov S.N., Fedorov Yu.Yu., Ksenofontov P.V., Vasilyev S.V. Ustroystvo dlya zashchity gazoprovodov ot mekhanicheskikh povrezhdeniy [Device for protecting gas pipelines from mechanical damage]. Patent RF, no. 202636, 2021.
- Popov S.N., Fedorov Yu.Yu., Ksenofontov P.V., Vasilyev S.V., Davydova N.N. Sposob predotvrashcheniya zamerzaniya gruntovykh vod v zashchitnykh futlyarakh [Method for prevention of groundwater freezing in protective case of gas pipelines]. Patent RF, no. 2730754, 2020.
- Samylova Yu.A. Chislennoe modelirovanie zamezaniya vody s rastvorennym gazom v zamknutykh obemakh. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Numerical modeling of nonequilibrium dissolved-gas

release freezing of water in closed volume. Cand. Diss. Abstract]. Tyumen, 2010. 23 p.

- Vasilyev V.I., Mikhailov V.A., Popov V.V. Zamerzanie vody v zamknutom obeme [Freezing of water in a closed volume]. *I Evraziyskiy simpozium po problemam prochnosti materialov i mashin dlya regionov kholodnogo klimata* [I Eurasian symposium on the problems of strength of materials and machines for cold climate regions]. Yakutsk, Yakut branch of Publ. House SB RAS, 2002. pp. 41–48.
- Sugawa M., Seki N., Kimoto K. Freezing limit of water in a closed circular tube. Wärme – und Stoffübertragung, 1983, vol. 17, pp. 187–192.

Received: 1 April 2022.

Information about the authors

Vladimir A. Tarasov, master student, Ufa State Petroleum Technological University.

Timur S. Sultanmagomedov, graduate student, assistant, Ufa State Petroleum Technological University.

Sultanmagomed M. Sultanmagomedov, Dr. Sc., professor, Academician of RANS, dean of the pipeline transport department, Ufa State Petroleum Technological University.

УДК 622.276:622.24

ПРИМЕНЕНИЕ ПЕН И ПЕНОПЛАСТОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КРЕПИ СКВАЖИН

Заливин Владимир Григорьевич,

zalivinVG@yandex.ru

Иркутский национальный исследовательский технический университет, Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

Повышение крепи скважины – это создание искусственной перемычки в околоствольном пространстве скважины, заполняющей пустоты в горных породах (поры, трещины, каверны), скрепляющей структуры слабосвязанных пород и тем самым способствующей закупорке каналов ухода бурового раствора в пласт и предотвращающей осыпи и обвалы неустойчивых горных пород. Рассмотрены композиционные материалы отверждаемых тампонажных пен, технология и условия их применения. В предлагаемой технологии предполагается осуществлять бурение на пенах и в осложненных интервалах горных пород переводить их в твердое состояние (пенопласты), тем самым закупоривая каналы ухода бурового раствора.

Актуальность. Развитие отечественной геологоразведочной отрасли делает весьма актуальным разработку научных подходов к составам буровых растворов, позволяющих осуществлять цикл бурения с высокой механической скоростью и одновременным тампонированием зон поглощений в зонах пониженного пластового давления. С этих позиций применение газожидкостных смесей в качестве очистного агента и тампонажного материала наиболее актуально. Потери бурового раствора в скважине происходят из-за превышения забойного давления над пластовым. Интенсивность поглощения определяется наличием открытой пористости горных пород, интенсивной трещиноватостью и каверзностью. Разработка технологий для повышения целостности стенок скважины и околоствольного пространства, позволяющих осуществелять процесс бурения на пенах и в осложненных интервалах горных пород переводить их в твердое состояние, при этом существенно повышая крепь скважины, – задача весьма значимая.

Цель: показать эффективность применения пен и пенопластов в цикле строительства скважин при бурении по многолетнемерзлым породам, в зонах потерь циркуляции, в неустойчивых и слабосцементированных породах (глина, пески, ил, мягкие глинистые сланцы). Отверждаемые пены с регулируемыми сроками схватывания позволяют усилить адгезию и прочность тампонажного камня, создать непроницаемый барьер при ликвидации потерь бурового раствора.

Методы. Для решения поставленных задач была использована методика, включающая обзор литературных и патентных информационных источников, их научный анализ; эмпирические исследования функциональных свойств газожидкостных смесей; лабораторные и стендовые испытания; апробация полученных зависимостей в производственных условиях. В исследовании применены: пены и пенопласты на основе карбамидных смол и катализаторов отверждения и их составы, способы доставки в зону осложнения под избыточным давлением при одновременном снижении энергоемкости процесса нагнетания.

Результаты. Применяется технология бурения на составах пен (любой кратности) и перевод пен в случае вскрытия поглощающего горизонта в пенопласт, что позволит без прекращения процесса бурения безаварийно пройти осложняющий горизонт. Разработан и рекомендован композиционный состав отверждаемой смеси со сроками полимерезации: 12–22 мин и через 24 час – 100 кг/см², состав повышенной гидрофобности и прочности карбамидного пенопласта с модификацией кубовым остатком антиокислителя ФЧ-16 ТУ 3830257-76. Рекомендована технология тампонирования зон осложнений с учетом прироста температуры от адиабатического сжатия воздушной фазы при давлении нагнетания и продавливания.

Выводы. Разработанные составы пенопластов на основе карбамидных смол отвечают основным требованиям, предъявляемым к тампонирующим смесям.

Ключевые слова:

Ликвидация поглощения бурового раствора, крепления стенок скважины, пены и отверждаемые пены (пенопласты), тампонажные смеси, карбамидные смолы.

Введение

Геологические условия проходки скважин характеризуются наличием осложнений, связанных с зонами тектонических нарушений и гидротермальных процессов, которые сопровождаются интенсивной трещиноватостью и дробленностью горных пород. Мощность зон гидротермальных нарушений колеблется от одного до десятков метров. При бурении скважин наличие этих зон вызывает потерю циркуляции бурового раствора, обвалы и обрушения стенок скважин, сужение ствола [1]. При ремонте скважин возникают проблемы при изоляции водопритоков.

Целесообразно для безаварийного бурения зон осложнений, обусловленных:

- потерей устойчивости ствола скважины;
- поглощением бурового раствора;
- слабыми связями между частицами, зернами и отдельными элементами горных пород;

 низкими пластовыми давлениями, производить искусственное улучшение прочностных характеристик стенок скважины и снижать их проницаемость [2].

Упрочнение стенок скважин проводят в процессе бурения тампонажными растворами на основе цементных смесей, полимеров, смол, битумов, силикатов [3]. Для кольматации трещиноватой зоны используют как вяжущие (твердеющие и нетвердеющие) материалы, так и различные наполнители [4]. В основном используется технология и технические средства для тампонирования скважин традиционными методами и материалами: (вязкоупругие растворы – ВУР, вязкоупругие смеси – ВУС, гельцементные смеси, тампонажные пасты, быстросхватывающие смеси – БСС, перекрыватели) [5]. Однако эти методики требуют остановки процесса бурения на длительное время, применения дополнительных материалов и оборудования. Исходя из чего возникает потребность в технологии и технических средствах, обеспечивающих промывку скважины пеной и при необходимости тампонирование зон поглощения и крепления стенок скважины отверждающими композициями пен на том же оборудовании. При этом схема нагнетания обеспечивает простое и надежное управления процесса в широких пределах изменения прочностных свойств пенопласта, технические средства обладают высокой мобильностью, а исходные материалы для получения тампонажной смеси доступны и сравнительно дешевые.

Изучение зон поглощения показывает, что мощность зон осложнений в осадочных породах (конгломераты, песчаники, алевролиты) находится в пределах 5–10 м, их количество на скважину от 1 до 10, с коэффициентом поглощающей способности K>2. В эффузивных образованиях (фельзиты, дациты, андезито-базальты) мощность зон колеблется от 10 до 80 м, их количество на скважину 1–3, коэффициент поглощающей способности K=0,6-18. Данные кавернометрии свидетельствуют о том, что в зонах поглощения бурового раствора наблюдается не только увеличение диаметра скважины, но и образование каверн размером до 400 мм [6]. Все существующие методы предупреждения и борьбы с поглощениями бурового раствора можно разделить на три группы:

- методы регулирования реологических свойств буровых растворов (БР);
- методы уменьшения перепада давления в системе скважина-пласт;
- методы уменьшения сечения или полной изоляции каналов поглощения.

Первые два метода не всегда дают положительный результат, т. к., снизив плотность БР, можно пробурить скважину без поглощений, но могут возникнуть проблемы при цементировании колонны. Третий метод наиболее эффективен. Для ликвидации катастрофических поглощений и заколонных перетоков, обвалов в трещиноватых коллекторах нами был разработан способ вскрытия этих горизонтов пеной с последующим ее отверждением.

О методике применения пен и отверждаемых пен

Проведенные исследования в Иркутском национальном исследовательском техническом университете (ИРНИТУ) доказывают эффективность использования в качестве тампонирующего материала смесь мочевиноформальдегидной смолы (МФС) и раствора кислоты с раздельной подачей в скважину смолы и раствора при непрерывном их смешении в определенной заданной пропорции [7]. Непрерывное смешение компонентов может происходить в манифольде, линии высокого давления или в цементировочной головке, установленной на бурильной колонке, с последующим схватыванием смеси в пласте для изоляции зон поглощения.

Переход карбамидных смол из начального в отвержденное состояние является результатом химических реакций, сопровождающихся образованием химических связей. Скорость отверждения зависит от соотношения смолы и отвердителя. В качестве отвердителя могут применяться: органические кислоты – щавелевая, лимонная, минеральные кислоты – соляная, фосфорная, а также соли – хлористый аммоний, хлористое железо, хлористый цинк, и некоторые эфиры кислот – дибутилсульфат и др.

Теоретические и экспериментальные исследования подтверждают, что для получения отверждаемых пен на основе карбамидных смол могут быть использованы смолы: КФ-МТ, КФ-Б, КФ-БЖ, КФ-Ж, а также смолы М-70, КС-68, меламиноформальдегидные смолы МЛФС, М-270, ММФ-50 и др. [8].

В практике получения пенопластов на основе МФС применяются ПАВ, содержащие активную сульфогруппу [9]. По техническим и экономическим соображениям наибольший интерес представляют алкилсульфонаты натрия – торговое название Волгонат, Эмульгатор Е-30, Сульфонол (алкиларилсульфонат натрия), Сульфонат (алкилсульфонат натрия). Эти пенообразователи легко растворимы в холодной воде, содержат высокий процент активного вещества и обеспечивают получение пен достаточно высокой степени аэрации при малых расходах [10].

На рис. 1 показаны зависимости критической кратности полимерной пены от концентрации сульфонола НП-3 для различных температур смоляного раствора и пенообразователя. Кривая 1 получена для температуры смоляного раствора 10 °С, сульфонол вводился не подогретым. Можно заметить, что при такой температуре исходных растворов не может быть получена пена высокой кратности при нормальных условиях.



- Рис. 1. Зависимость критической кратности полимерной пены от концентрации сульфанола: 1 – 30 % раствор МФ-17 с КМЦ, t раствора 10 °C, t_o сульфанол 10 °C; 2 – 30 % раствор МФ-17 с КМЦ, t_o=10 °C, t_o сульфанол 40 °C; 3 – 30 % раствор МФ-17 с КМЦ, t_o=40 °C, t_o сульфанол 40 °C
- Fig. 1. Dependence of the critical multiplicity of polymer foam on sulfanol concentration: 1 – 30 % mixture MF-17 with KMTs, mixture t is 10 °C, sulphanole t_o is 10 °C; 2 – 30 % mixture MF-17 with KMTs, t_o=10 °C, sulphanole t_o is 40 °C; 3 – 30 % mixture MF-17 with KMTs, t_o=40 °C, sulphanole t_o is 40 °C

Кривая 2 соответствует случаю, когда в смоляной раствор, имеющий T=10 °C, вводился сульфонол, предварительно подогретый до T=40 °C. Кратность пены при этом возросла в два раза.

Кривая 3 получена для подогретого до T=40 °C сульфонола и смоляного раствора. При этом получается пена наибольшей кратности.

В тех интервалах, где пластовое давление позволяет применять аэрированные растворы, необходимо осуществлять бурение на пене (табл. 1). Пены эффективны для прохождения зон поглощений малой интенсивности осыпающихся пород, теряющих при вскрытии свою устойчивость [11].

Бентонит Bentonite	КМЦ Carboxymethyl cellulose	ГПАА-1 % Hydrolyzed polyacrylamide	Na ₂ CO ₃	ПАВ Surfactant	Вода Water	Горно-геологические условия применения Geological conditions of application				
3–5	0,2–0,3	-	0,2–0,3	0,3–0,8	Остальное Rest	Heустойчивые рыхлые отложения с малыми во- допритоками Unstable loose sediments with low water inflows				
-	_	1,0	Ι	0,3–0,5		Относительно устойчивые трещиноватые породы Relatively stable fractured rocks				
-	_	_	_	0,25–0,5		Плотные монолитные породы Dense monolithic rocks				

 Таблица 1. Рекомендуемые рецептуры пенообразующих составов

 Table 1.
 Recommended formulations of foaming compositions

Из-за малых весовых расходов пен в процессе бурения и низкой теплоемкости пена имеет небольшой запас тепла и может эффективно применяться при бурении многолетнемерзлых пород, не растепляя стенки скважины [12]. Возможно также применение для тампонирования скважин полимерных композиций, включающих поливинилхлорид и сложный эфир диэтиленгликоля и синтетических жирных кислот фракции С7–С9, для повышения морозостойкости и снижения водопоглощения. Для снижения температуры замерзания пены и сохранения свойств при низких температурах в пенообразующий раствор необходимо добавлять NaCl, CaCl₂ (до 10 % концентрации).

Немаловажную роль играет способ получения пены? определяющий соотношение газожидкостного компонента [13].

Для улучшения свойств пены добавляют помимо реагента вспенивателя стабилизирующие и структурообразующие добавки [14] (органические полимеры и глины), регуляторы величины рН и смягчители воды (Na₂CO₃), понизители гидравлических сопротивлений (додецеловый спирт).

Основным критерием для выбора пенообразователя, помимо его доступности и удобства применения, является его хорошая совместимость со смоляным и кислотным раствором для получения неразрушающихся высокократных карбамидных пенопластов.

Основным компонентом карбамидных пенопластов также является отвердитель – катализатор отверждения [15].

Катализаторы отверждения карбамидных смол делятся на две группы: катализаторы холодного отверждения и катализаторы горячего отверждения. К первой группе (отверждение при 5–50 °C) относятся: минеральные кислоты (смоляная, серная, фосфорная, ортофосфорная, азотная); ароматические сульфокислоты (бензол, толуол, нафталинсульфокислота); полиалкилароматические полисульфокислоты с молекулярной массой меньше 500 (динонилнафталиндисульфокислота и др.); аммониевые соли минеральных кислот (соляной, азотной, фосфорной и др.). Ко второй группе (отверждение при 50–165 °C) – органические кислоты (щавелевая, себациновая, муравьиная, трифторуксусная, бензойная, лимонная); цинковые и кадмиевые соли органических (муравьиной, молочной, фталевой, щавелевой, винной), минеральных (серной, фосфорной, азотной, соляной) и сульфоароматических (птолуолсульфокислоты и др.) кислот; хлорид магния, сульфаты алюминия и железа. Наиболее активными катализаторами при температурах выше 100 °C являются каприлат кадмия, сульфат цинка и борная кислота.

Чаще всего применяют кислоты средней силы, такие как муравьиная, щавелевая и особенно фосфорная, и ортофосфорная, которые обладают быстрым каталитическим действием, способствуют получению стабильной пены и не вызывают коррозию аппаратуры. Использование ортофосфорной и щавелевой кислоты уменьшает усадку пены в процессе ее отверждения и увеличивает эластичность образцов пенопласта по сравнению с использованием в качестве катализаторов отверждения серной и соляной кислоты.

Более сильные кислоты не обеспечивают необходимой жизнеспособности состава, а каталитические действия более слабых кислот недостаточны для полного отверждения смолы. Изменяя концентрацию кислотного отвердителя в пене, можно регулировать скорость ее отвердения – от секунд до нескольких часов. Рабочая концентрация кислоты подбирается экспериментально в каждом конкретном случае.

На технологические показатели тампонирования скважин отверждающими газожидкостными смесями (ОГЖС) на основе карбамидных смол большое влияние оказывает принятая рецептура, выбранные технологические режимы и регламенты, температура окружающей среды, химический состав вод в скважинах, состав горных пород и другие горногеологические условия.

Выбранная рецептура пенопласта должна содержать минимальное число исходных компонентов, не требующих предварительной их подготовки. В связи с тем, что дозирование раствора вспенивателя, смолы и кислоты надежнее и проще осуществлять дозаторами объемного действия, например дозировочными насосами типа НД, рецептуру для получения тампонирующего пенопласта удобнее выражать в данном случае в объемных соотношениях компонентов.

Рецептура корректируется в зависимости от геолого-технических условий тампонирования.

Степень аэрации α, или кратность ОГЖС, регулируется путем изменения газожидкостного отношения.

Кратность пены – термин, употребляемый в литературе по теории к практике пенных систем. Кратность пены (К) – это отношение объема пены к объему жидкости, израсходованной на ее образование. В нормальных условиях пеногенераторами воздушномеханического принципа действия удается получить пену кратностью до 80.

При оценке газожидкостного отношения в практике бурения скважин используется термин «степень аэрации», т. е. соотношение расхода жидкой и газовой фаз.

$$a = \frac{Q_{\scriptscriptstyle B}}{Q_{\scriptscriptstyle W}}.$$
 (1)

Употребление термина «степень аэрации» в качестве оценки технологического процесса или характеристики конкретного режима прокачивания газожидкостной смеси является весьма неудачным. То же самое относится и к термину «кратность пены». В самом деле, величина степени аэрации, к примеру α =28, может быть получена при различных соотношениях расходов жидкой и газовой фаз смеси, т. е.:

$$a = \frac{Q_{\text{\tiny B}}}{Q_{\text{\tiny w}}} = \frac{48 \text{ m}^3/\text{мин}}{28,7 \text{ л/c}} = \frac{32 \text{ m}^3/\text{мин}}{18,5 \text{ л/c}} = \frac{16 \text{ m}^3/\text{мин}}{9,1 \text{ л/c}} = 28.$$
(2)

Однако при этом технологические параметры и гидродинамические условия в системе скважинапласт будут далеко неодинаковыми. Поэтому, когда речь идет о величине степени аэрации (2) и кратности, следует для полноты оценки технологического процесса обязательно указать еще один параметр, при котором получена пена, – расход жидкости или воздуха. При этом с учетом известных данных и по давлению в скважине можно судить о действительном режиме в скважине газожидкостной смеси.

Для повышения гидрофобности и прочности карбамидного пенопласта был испытан кубовый остаток ректификации экстрактивных фенолов (отходы химического производства, содержащие резорцин), выпускаемый объединением «Ангарскнефтеоргсинтез» – кубовый остаток антиокислителя ФЧ-16 ТУ 3830257-76 [16]. Поскольку кубовый остаток плохо растворяется в воде, но довольно хорошо эмульгируется, была использована эмульсия кубового остатка в воде и его 30 % раствор в этиленгликоле.

Результаты опытов по исследованию свойств пенопластов с различным содержанием кубового остатка приведены в табл. 2.

Кубовый остаток в 2–3 раза уменьшает водопоглощение и увеличивает прочность образцов пенопласта. Однако увеличение его содержаний более 1 % приводит к существенному уменьшению кратности пенопласта (1), а для поддержания постоянной кратности потребуется увеличение расхода пенообразователя в нормальных условиях.

Таблица 2. Влияние кубового остатка на гидрофобность и прочность карбамидного пенопласта **Table 2.** Influence of the distillation residue on the hydrophobicity and strength of urea foam

Способ приготовления Preparation method	№ п/п	Содержание кубового остатка, % вес Vat content, wt. %	Кратность Multiplicity, К	Объемный вес,	Водопоглощение, о кг/м ³ Water absorption, о kg/m ³	Прочность на сжатие, $\sigma \kappa r / m^2$ Compressive strength, $\sigma kg/m^2$	Примечание Note
Водная эмульсия	1	0,5	20	7,8	280	333	Состав пенопласта Foam composition
Water emulsion	2	1,0	16,6	8,75	168	178	Смола М-16-62 – 20 %
	3	1,5	12,7	12,9	68	360	Resin M-16-62 – 20 %
30%-й раствор в	4	0,5	30,9	7,2	224	305	Пенообразователь сульфонол – 0,44 %
этиленгликоле	5	1,0	27,0	5,7	293	249	Foaming agent sulfonol – 0,44 %
30 % solution in	6	2,0	18,0	7,6	410	405	Кислота/Acid
ethylene glycol	7	3,0	11,5	13,1	326	278	H ₃ PO ₄ – 1,5 %

Повышение качества тампонирования предупреждением преждевременного отверждения пены при одновременном снижении энергоемкости нагнетания и продавливания

Эффективность данной технологии заключается в том, что в скважину нагнетают газожидкостную смесь (ГЖС) и отвердитель и продавливают их до начала интенсивного отверждения и деформационного разупрочнения [17]. При продавливании ГЖС в интервал тампонирования происходит увеличение температуры воздушной фазы за счет сжатия пузырьков газа под избыточным давлением. Так как теплопроводность отверждаемой ГЖС очень мала при незначительном времени теплообмена, потери тепла на теплообмен с окружающей средой практически равны 0 и процесс рассматривается как адиабатический. Прирост температуры ГЖС при этом определяется по формуле:
$$\Delta t_{\rm c} = \frac{C_{\beta} \rho_{\beta}^0 K_a T_1}{C_{\rm st, \varphi} \rho_{\rm st, \varphi}} \left[\frac{P_2}{P_1} - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{1/K} \right], \tag{3}$$

где C_{β} – теплоемкость воздуха при давлении продавливания, Дж/кг °С; ρ_{β}^{0} – плотность воздушной фазы в нормальных условиях, (кг/м³); K_{α} – газожидкостное соотношение; T_1 – начальная температура воздуха в тампонирующей смеси, Дж/кг °С; $C_{\mathrm{ж},\phi}$ – теплоемкость жидкой фазы тампонажной смеси, Дж/кг °С; $\rho_{\mathrm{ж},\phi}$ – плотность жидкой фазы тампонирующей смеси, кг/м³; P_1 – атмосферное давление; P_2 – конечное давление продавливания смеси; K – показатель адиабаты сжатия воздуха.

Конечная температура тампонирующей смеси с учетом ее прироста от сжатия воздушной фазы:

$$t_{\rm TC} = T_1 + \Delta t_{\rm TC}.\tag{4}$$

В связи с этим нагнетание газа и отвердителя осуществляют с учетом прироста температуры от адиабатического сжатия воздушной фазы при давлении нагнетания и продавливания.

В табл. 3 и на рис. 2 приведены результаты расчета $t_{r,c}$ по формуле (3) в зависимости от давления про-

давливания и газожидкостного соотношения тампонирующей смеси Ка.

Таблица 3. Зависимость давления продавливания от прироста температуры тампонирующей смеси

Table 3.	Dependence of the punching pressure on the	
	temperature rise of the plugging mixture	

Давление	Прирост температуры Δt_c тампонирующей сме-								
продавливания	си, °С, при газожидкостном соотношение, Ка								
P_2 , кг/см ²	Increase in the	e temperatur	re of the plugg	ging mix-					
Squeezing pres-	ture,	ture, °C, at gas-liquid ratio, Ka							
sure P_2 , kg/cm ²	20	20 50 70							
5	0,33	0,84	1,16	1,67					
10	0,88	2,19	3,07	4,4					
20	2,09	5,22	7,31	10,44					
30	3,39	8,46	11,85	16,92					
40	4,73	11,83	16,56	23,66					
50	6,11	15,28	21,39	30,56					
60	7,51	18,78	26,29	37,56					
100	13,27	33,18	46,45	66,36					

Примечание: Δt_c – температура отверждения, или конечная температура тампонирующей смеси, в интервале тампонирования после сжатия (curing temperature or the final temperature of the plugging mixture in the plugging interval after compression).



Puc. 2. Зависимость прироста температуры от давления продавливания *Fig. 2.* Dependence of temperature increase on the squeezing presser

Таблица 4.	Зависимость	температуры	тампонирую-
	щей смеси от	содержания от	зердителя

Table 4.	Dependence	of the	plugging	mixture	tempera-
	ture on the c	ontent o	of the hard	lener	

			5							
Время начала интенсивного отвержения, мин, при со-										
	держании отвердителя, мас. %									
Δt_c	Time of the beginning of intensive curing, min, with the									
	content of the hardener, wt. %									
	0,1	0,15	0,3	0,6	1,0					
0	-	-	-	50	27					
5	-	-	66	30	18					
10	-	56	38	22	13					
15	52	36	26	16	8,5					
20	34	26	20	12	6					
28	21	16,5	13,1	8,5	3,4					
30	19	15	11,5	7,5	3,2					
33	16,5	13,3	10	5	2,8					
37	13,6	10	7	4	2					
40	11,8	8,5	6	3	1,5					
42	10,5	7,8	5	2,5	1,2					
50	7	5	3	1,4	0,8					
60	4,5	3,3	1,8	0,8	0,4					

В табл. 4 и на рис. 3 приведены экспериментальные данные, характеризующие зависимость времени начала интенсивного отверждения газожидкостной тампонирующей смеси от температуры при различном содержании отвердителя.

Приведенные данные соответствуют отверждаемой смеси, имеющей следующее соотношение компонентов, мас. %: карбамидо-формальдегидная смола КФ-МТ (по ГОСТ 14231-78) 71; пенообразователь (сульфанол) 0,37; отвердитель (щавелевая кислота) 0,1...1,0; вода; остальное.

На рис. 4 отражена зависимость сроков схватывания смеси от содержания отвердителя. Полимеризация смеси интенсивно происходит при содержании отвердителя: 5–10 %, достигая при этом значений σ_{cx} 100 кг/см² (табл. 5). В практике бурения достаточной прочностью является $\sigma_{cx}=60$ кг/см² [18]. Таким образом, в зависимости от глубины скважины и содержания отвердителя можно варьировать временем схватывания тампонажной смеси.



Puc. 3. Зависимость времени начала отверждения от температуры отвердителя *Fig. 3.* Dependence of the hardening starting time on the hardener temperature

Таблица 5.	Параметры тампонажной смеси
Table 5.	Grouting mixture parameters

Смесь смола/вода, г	Кол-во отвердителя, %	Температура среды, °С	Сроки поли Polymeriza	меризации ation time, 1	σ через 24 час, кг/см ²	
Resin/water mixture, g	Amount of hardener, %	Medium temperature, °C	Загустевание	Начало	Конец	σ after 24 hours, kg/cm ²
			Thickening	Start	End	
565/435	10	18-20	12	15	22	100



Рис. 4. Зависимость времени полимеризации от содержания отвердителя в смеси

Технология тампонирования

Необходимо затампонировать интервал закарстованных пород на глубине 885-890 м. На основании опытных данных для этого интервала объем ОГЖС составляет 3 м³, а максимальное давление продавливания тампонирующей смеси составляет Р=3,0 МПа. Начальная температура тампонирующей смеси на устье скважины T₁=25 °C. Оптимальное газожидкостное соотношение отверждаемой ГЖС для данных условий составляет Ka=20-70, а допустимое время нагнетания и продавливания до начала интенсивного отверждения смеси 18 мин. По данным табл. 2 или рис. 2, которые получены по формуле (3), определяем, что для P₁=3,0 МПа, Ка=20-70 и T₁=25 °С прирост температуры тампонирующей смеси указанной рецептуры (dtT °C) составит 3,39...11,8 °C соответственно, а ее конечная температура по формуле (4) будет находиться в пределах 28-37 °С соответственно. Далее, исходя из необходимого объема закачиваемой ОГЖС (3м³) и продавочной жидкости, а также технической характеристики нагнетательного оборудования (рис. 5), находим необходимое время нагнетания и продавливания смеси.

Fig. 4. Dependence of the polymerization time on the content of the hardener in the mixture

Используемый дожимной насос НБ4-320/63 при диаметре плунжера 80 мм обеспечивает подачу 125, 180 и 15320 дм³/мин. Для нагнетания 3м³ ОГЖС на 3-й ступени подачи необходимое время составит 9,4 мин, а для нагнетания продавочной жидкости (0,885 м³ при внутреннем объеме 1 м бурильных труб, равном 1 дм³) на 1-й ступени подачи – 7,1 мин. Общее время нагнетания и продавливания ОГЖС для данных условий составляет не менее 16,5 мин. Таким образом, необходимо выбрать такое сочетание Ка и содержание отвердителя в тампонирующей смеси, чтобы время начала ее интенсивного отверждения и деформационного разупрочнения (табл. 4), определяемое по кривым кинетики отверждения для температурного интервала 28-37 °C, т. е. с учетом повышения температуры от сжатия газовой фазы, было равным или несколько превышало общее время нагнетания и продавливания ОГЖС (16,5 мин) (рис. 3).

По данным табл. 3, 4 (или рис. 2, 3) этому условию отвечает Ка=20 и концентрация отвердителя (щавелевой кислоты) в ОГЖС 0,15 мас. %, а также Ка=50 и концентрация отвердителя 0,1 мас. %.

С учетом обеспечения минимального расхода компонентов ОГЖС, который уменьшается с увеличением Ка, принимаем Ка=50 и концентрацию отвердителя 0,1 мас. %. Тогда необходимый объемный расход воздуха при расходе жидкой фазы ОГЖС Vж.ф=10 дм³/мин составит Vв=Ka* V=50*10 дм³/мин= =500 дм³/мин.

Тампонирование по предлагаемому способу после расчета необходимых данных осуществляют следующим образом.



Рис. 5. Схема тампонирования ОГЖС: 1 – емкость со смолой; 2 – емкость с раствором кислого отвердителя; 3 – емкость с продавочной жидкостью; 4, 5 – краны; 6 – подпорный насос; 7 – дожимной насос; 8 – компрессор; 9 – кислотный насос; 10 – бурильные трубы; 11 – тампонируемый пакер; 12 – расходомер воздуха

Fig. 5. Tamponing scheme of HGLM: 1 – container with resin; 2 – container with acidic hardener solution; 3 – container with displacement liquid; 4, 5 – cranes; 6 – booster pump; 7 – jokey pump; 8 – compressor; 9 – acid pump; 10 – drill pipes; 11 – plugged packer; 12 – air flow meter

В емкости 1 (рис. 5) приготавливается раствор смолы (КФ-МТ) и пенообразователя (сульфонол), в

емкости 2 – раствор кислого отвердителя, и в емкости 3 – продавочная жидкость. Кран – 4 открыт, а кран – 5 закрыт. Производится включение подпорного насоса – 6, дожимного насоса – 7, компрессора – 8 и кислотного насоса – 9. Подача подпорного насоса – 6 и кислотного насоса – 9 отрегулирована из расчета обеспечения суммарной подачи жидкой фазы ОГЖС (Vж.ф), включая раствор смолы, пенообразователя и кислотного отвердителя, 10 дм³/мин при соотношении подачи (концентрации) отвердителя 0,1 мас. % от Vж.ф Расход воздуха от компрессора расходомером -12 установлен на 500 дм³/мин, что обеспечивает требуемое газожидкостное соотношение закачиваемой ОГЖС (Ка=50). ОГЖС через колонну бурильных труб – 10, на конце которой смонтирован пакер – 11, поступает в тампонируемый интервал.

В течение расчетного времени 9,4 мин после закачивания требуемого объема ОГЖС (3 м³) выключают компрессор – 8, кислотный насос – 9 и подпорный насос – 6. Закрывают кран – 4, открывают кран – 5, и дожимным насосом – 7, включенным на подачу 125 дм³/мин, осуществляют в течение 7,1 мин продавливание ОГЖС из бурильной колонны в зону тампонирования. Затем выдерживают тампонирующую смесь под давлением в течение 1-4 ч. до окончательного формирования пространственной структуры пенопласта, после чего производится разгерметизация затрубного пространства открытием пакера и продолжаются дальнейшие работы на скважине. При этом происходит увеличение температуры воздушной фазы за счет сжатия пузырьков газа под избыточным давлением. При таком способе нагнетания происходит уплотнение пены до 30 %, соответственно уменьшается усадка тампонажного камня и увеличивается его прочность. Повышение температуры среды приводит к повышению пенообразующей способности. Добавки в тампонажную смесь частиц шлама или проппанта увеличивают ее стабильность и устойчивость [19].

Выводы

Пенопласты на основе карбамидных смол отвечают основным требованиям, предъявляемым к тампонирующим смесям [20]:

- хорошая текучесть и сохранение технологических свойств во времени, необходимом для закачки и продавливания в тампонирующий пласт;
- дополнительное сопротивление при движении в пористой среде и в зонах тампонирования с большим эффективным сечением (эффект Жамена), что приводит к уменьшению глубины проникновения в эти каналы и более равномерному заполнению пор в приствольной зоне ствола;
- устойчивость к разбавлению пластовыми водами при обладании вязкоупругими свойствами, пространственной структурой и регулируемыми параметрами;
- легко регулируемые сроки отверждения;
- способность отверждаться при нормальной, повышенной и пониженной температуре и давлении, повышенной влажности и в водной среде;

- легко разбуриваемый тампонажный камень;
- доступность и невысокая стоимость исходных реагентов;
- способность изменять свои свойства в меняющихся горно-геологических условиях;
- высокая адгезия и когезия в отвержденном состоянии;
- возможность применения других методов тампонирования, например, в комбинации с цементированием.

Применение структурированных пен с последующим переводом их в отверждаемые пены при бурении скважин в осложненных интервалах пород, без пре-

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Исследование составов для контроля потери циркуляции / М.В. Нуцкова, Е.Ю. Рудяева, В.Н. Кучин, А.А. Яковлев // Материалы молодежных технических сессий. Материалы 6-го Молодежного форума Всемирного нефтяного совета – Форум будущих лидеров. – СПб., 2019. – С. 394–398.
- Cook J., Growcock F., Guo Q. Stabilizing the wellbore to prevent lostcirculation // Oilfield Review Schlumberger. – Houston, Texas, 2012. – P. 26–35.
- A method to evaluate lost circulation materials investigation of effective wellbore strengthening 100 applications / S. Savari, L.D. Whitfill, E.D. Jamison, A. Kumar // SPE-167977 Drilling Conference and Exhibition. – Fort Worth, Texas, USA, 4–6 March 2014. – P. 7.
- Okland D., Gabrielsen G.K., Gjerde J. The importance of leak-off test data for combatting lostcirculation // SPE 78219. – 2002. – P. 9
- Устройство для бурения на экспандируемых трубах локального крепления скважин: пат. Рос. Федерация № 173662U1; заявл. 05.10.2016; опубл. 05.09.2017, Бюл. № 25. – 7 с.
- Расчет радиуса изоляционных экранов при ликвидации зон поглощения буровых растворов / С.Н. Горонович, П.Ф. Цыцымушкин, В.Н. Степанов, А.В. Ефимов // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2005. – № 6. – С. 29–32.
- Смолин Е.А., Заливин В.Г. Применение отверждаемых газожидкостных смесей при ликвидации поглощений // Геонауки-2013. Актуальные проблемы изучения недр: Материалы Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. Вып. 13. – Иркутск, 2013. – С. 349–354.
- Gray K.E., Yongcun Feng. Review on fundamental studies on lost circulation and wellbore strengthening // Journal of Petroleum Science and Engineering. – February 2017. – P. 12.
- Borehole Stability in Shales / G.M. Bol, S-W. Wong, C.J. Davidson, D.C. Woodland // SPE Drill & Completion. – 1994. – V. 9. – P. 87–94. DOI: 10.2118/24975-PA
- Bridges S., Robinson L. A practical handbook for drilling fluids processing // Elsevier Journals. – 2020. – V. 15. – P. 593–622.

кращения процесса бурения, обеспечивает высокие технико-экономических показатели процесса бурения, способствует сокращению сроков сооружения скважин и снижению их себестоимости. Пена обладает упругостью и является сжимаемой средой, поэтому целесообразно для уменьшения усадки и повышения прочности пенопласта создавать избыточное давление нагнетания. Предлагаемый способ доставки отверждаемой пены в зону осложнения под давлением и технологическая схема для его осуществления обеспечивает минимальную усадку пенопласта, лучшую адгезию и повышает его прочность.

- Wisnu Adi Nugroho. Design and application of aerated and foam drilling fluid, case study in drilling operation in Indonesia // 43rd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. – Kuala Lumpur, October 2018. – P. 31–40.
- Овчинников В.П. Специальные тампонажные материалы для низкотемпературных скважин. – М.: Недра, 2002. – 187 с.
- Пантелеев А.И., Заливин В.Г. Бескомпрессорный способ аэрации буровых растворов // Геонауки-2013. Актуальные проблемы изучения недр: Материалы Всероссийской научнотехнической конференции с международным участием. Вып. 13. – Иркутск, 2013. – С. 345–349.
- Soleymani M., Kamali M.R., Saeedabadian Y. Experimental investigation of physical and chemical properties of drilling foam and increasing its stability // Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering. – 2013. – V. 32. – № 3. – P. 127–132.
- Курта С.А., Федорченко С.В., Хабер М.В. Модификация карбамидоформальдегидных смол на стадии поликонденсации // Вопросы химии и хим. технологии. – 2002. – № 3. – С. 73–76.
- Заливин В.Г. Разработка композиций отверждаемых пен для тампонирования скважин // Науки о Земле и недропользование. – 2019. – Т. 42. – № 3. – С. 336–348.
- Заливин В.Г. Эффективные технологии применения отверждаемых пен при креплении скважин // Науки о Земле и недропользование. – 2019. – Т. 42. – № 4. – С. 511–528.
- Интегрированное решение по повышению качества крепления скважин в интервалах терригенных отложений / А.Ф. Галиев, И.Р. Рафиков, А.В. Самсыкин, Т.Р. Мардаганиев, Ф.А. Агзамов // Нефтяное хозяйство. – 2019. – № 9. – С. 29–33.
- Комилов Т.О., Махаматходжаев Д.Р. Усовершенствованный состав бурового раствора для предупреждения поглощения промывочных жидкостей // Нефтяное хозяйство. – 2021. – № 2. – С. 68–72.
- 20. Панкрушин А.А. Технологическая и экономическая целесообразность применения карбамидных пенопластов // Строительные материалы. 2004. № 5. С. 10–12.

Поступила 25.03.2022 г.

Информация об авторах

Заливин В.Г., кандидат технических наук, доцент кафедры нефтегазового дела Иркутского национального исследовательского технического университета. UDC 622.276:622.24

INCREASING WELL FASTENING BY APPLICATION OF CURING FOAMS

Vladimir G. Zalivin,

zalivinVG@yandex.ru

Irkutsk National Research Technical University, 83, Lermontov street, Irkutsk, 664074, Russia.

Increasing the support of the well is the creation of an artificial bridge in the borehole space of the well, filling voids in rocks (pores, cracks, cavities), fastening the structures of loosely bonded rocks and thereby contributing to the blockage of the channels of the drilling mud into the formation and preventing scree and collapses of unstable rocks. Composite materials of cured grouting foams, technology and conditions of their application are considered. In the proposed technology, it is supposed to drill on foams and transfer them to a solid state (foams) in complicated intervals of rocks, thereby clogging the channels of the drilling mud exit.

Relevance. The development of the domestic geological exploration industry makes it very relevant to develop scientific approaches to the compositions of drilling fluids that allow drilling cycles with high mechanical speed and simultaneous padding of absorption zones in areas of low reservoir pressure. From these positions, the use of gas–liquid mixtures as a cleaning agent and grouting material is most relevant. The loss of drilling fluid in the well occurs due to the excess of the bottom-hole pressure over the reservoir. The absorption intensity is determined by the presence of open porosity of rocks, intense fracturing and cavities. The development of technologies to improve the integrity of the well walls and the borehole space, allowing the drilling process to be carried out on foams and in complicated intervals of rocks to transfer them to a solid state, while significantly increasing the well support, is a very significant task.

The purpose of this article is to show the effectiveness of the use of foams in the well construction cycle when drilling on permafrost rocks, in circulation loss zones, in unstable and weakly cemented rocks (clay, sand, silt, soft clay shales). Curable foams with adjustable setting times allow you to increase the adhesion and strength of the grouting stone, create an impenetrable barrier when eliminating drilling mud losses.

Methods. To solve the tasks set, a methodology was used, including a review of literary and patent information sources, their scientific analysis; empirical studies of the functional properties of gas–liquid mixtures; laboratory and bench tests; approbation of the obtained dependencies in production conditions. The study uses foams based on urea resins, curing catalysts and their compositions, methods of delivery to the complication zone under excessive pressure while reducing the injection energy intensity.

Results. The author has developed the technology of drilling on foam compositions (of any multiplicity) and their transfer in the case of opening the absorbing horizon into foam, which will allow without stopping the drilling process passing the complicating horizon without an accident. The author developed and recommended a composition of the cured mixture with polymerization terms: 12-22 min and σ after 24 hours – 100 kg/cm², a composition of increased hydrophobicity and strength of urea foam with a modification of the cubic residue of the antioxidant FCH-16 TU 3830257-76. The technology of tamponing of complication zones is recommended, taking into account the temperature increase from adiabatic compression of the air phase at the pressure of injection and pushing.

Conclusions. The developed compositions of foams based on carbamide resins meet the basic requirements for tampon mixtures.

Key words: Elimination of drilling mud absorption, well wall anchoring, foams and curable foams (foams), grouting mixtures, carbamide resins.

REFERENCES

- Nutskova M.V., Rudyaeva E.Yu., Kuchin V.N., Yakovlev A.A. Issledovanie sostavov dlya kontrolya poteri tsirkulyatsii [Research of compositions for controlling circulation loss]. *Materialy molodezhnykh tekhnicheskikh sessiy. Materialy 6-go Molodezhnogo foruma Vsemirnogo neftyanogo soveta – Forum budushchikh liderov* [Materials of youth technical sessions. Materials of the 6th Youth Forum of the World Petroleum Council – Forum of Future Leaders]. St. Petersburg, 2019. pp. 394–398.
- Cook J., Growcock F., Guo Q. Stabilizing the wellbore to prevent lostcirculation. *Oilfield Review Schlumberger*. Houston, Texas, 2012. pp. 26–35.
- Savari S., Whitfill L.D., Jamison E.D., Kumar A. A method to evaluate lost circulation materials, investigation of effective wellbore strengthening 100 applications. SPE-167977. Drilling Conference and Exhibition. Fort Worth, Texas, USA, 4–6 March, 2014. 7 p.
- Okland D., Gabrielsen G.K., Gjerde J. The importance of leak-off test data for combatting lostcirculation, SPE 78219. 2002. pp. 9.
- Nazipov L.L., Baybatin A.R., Hasanov G.V. Ustroystvo dlya bureniya na ekspandiruemykh trubakh lokalnogo krepleniya skvazhin [Device for drilling on expandable pipes of local well attachment]. Patent RF, no. 173662U1, 2017.
- Goronovich S.N., Tsytsymushkin P.F., Stepanov V.N., Efimov A.V. Calculation of the radius of insulation screens during the elimination of absorption zones of drilling fluids. *Environmental protection in the oil and gas complex*, 2005, no. 6, pp. 29–32. In Rus.

- Smolin E.A., Zalivin V.G. Primenenie otverzhdaemykh gazozhidkostnykh smesey pri likvidatsii pogloshcheny [Application of cured gas-liquid mixtures in the elimination of absorption]. *Geonauki-2013. Aktualnye problemy izucheniya nedr. Materialy Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Materials of the All-Russian Scientific and Technical Conference with international participation Geosciences-2013. Actual problems of studying the subsurface]. Irkutsk, 2013. Iss. 13, pp. 349–354.
- Gray K.E., Yongcun Feng. Review on fundamental studies on lost circulation and wellbore strengthening. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2017, pp. 12.
 Bol G.M., Wong S-W., Davidson C.J., Woodland D.C. Borehole
- Bol G.M., Wong S-W., Davidson C.J., Woodland D.C. Borehole stability in shales. SPE Drill & Completion, 1994, vol. 9. pp. 87–94. DOI: 10.2118/24975-PA
- Bridges S., Robinson L. A practical handbook for drilling fluids processing. *Elsevier Journals*, 2020, vol. 15, pp. 593–622.
- Wisnu Adi Nugroho. Design and application of aerated and foam drilling fluid, case study in drilling operation in Indonesia. 43rd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Kuala Lumpur, October, 2018. pp. 31–40.
- Ovchinnikov V.P. Spetsialnye tamponazhnye materialy dlya nizkotemperaturnykh skvazhin [Special grouting materials for lowtemperature wells]. Moscow, Nedra Publ., 2002. 187 p.
- Panteleev A.I., Zalivin V.G. Beskompressorny sposob aeratsii burovykh rastvorov [Non-compression method of drilling mud aeration]. Geonauki-2013. Aktualnye problemy izucheniya nedr. Materialy Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii s mezhdu-

narodnym uchastiem [Materials of the All-Russian Scientific and Technical Conference with international participation. Geosciences-2013. Actual problems of studying the subsurface]. Irkutsk, 2013. Iss. 13, pp. 345–349.

- 14. Soleymani M., Kamali M.R., Saeedabadian Y. Experimental investigation of physical and chemical properties of drilling foam and increasing its stability. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 2013, vol. 32, no. 3, pp. 127–132.
- Kurta S.A., Fedorchenko S.V., Haber M.V. Modification of ureaformaldehyde resins at the polycondensation stage. *Questions of chemistry and chemical technology*, 2002, no. 3, pp. 73–76. In Rus.
- Zalivin V.G. Development of compositions of curable foams for plugging wells. *Geosciences and subsoil use*, 2019, vol. 42, no. 3, pp. 336–348. In Rus.
- Zalivin V.G. Effective technologies for using hardened foams for casing wells. *Earth Sciences and Subsoil Use*, 2019, vol. 42, no. 4, pp. 511–528. In Rus.
- Galiev A.F., Rafikov I.R., Samsykin A.V., Mardaganiev T.R., Agzamov F.A. An integrated solution to improve the quality of well casing in the intervals of terrigenous deposits. *Oil industry*, 2019, no. 9, pp. 29–33. In Rus.
- Komilov T.O., Makhamatkhodzhaev D.R. Improved mud composition to prevent absorption of drilling fluids. *Oil industry*, 2021, no. 2, pp. 68–72. In Rus.
- Pankrushin A.A. Technological and economic feasibility of using urea foams. *Building materials*, 2004, no. 5, pp. 10–12. In Rus.

Received: 25 March 2022.

Information about the authors

Vladimir G. Zalivin, Cand. Sc., associate professor, Irkutsk National Research Technical University.

УДК 556.531.4:550.84.094

ГИДРОГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ И ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ САМООЧИЩЕНИЯ ВОД ОБСКОГО БОЛОТА (ЗАПАДНАЯ СИБИРЬ)

Савичев Олег Геннадьевич¹,

OSavichev@mail.ru

Ян Хэн¹, 13698754927@163.com

Чжоу Дань¹,

929177582@qq.com

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

Актуальность. Хозяйственная деятельность на заболоченных территориях Западной Сибири в условиях изменения климата требует научного обоснования методики экологического мониторинга и природоохранных мероприятий. Один из эффективных способов такого обоснования с учетом дефицита наблюдений – математическое моделирование гидрогеодинамических и гидрогеохимических процессов в болотных экосистемах.

Цель: выявление механизмов природно-техногенного распределения концентраций СГ в водных вытяжках из торфов по глубине торфяной залежи.

Методы: полевой эксперимент, методы определения химического состава болотных вод и водных вытяжек из торфов и минеральных отложений, методы математического моделирования.

Результаты и выводы. Проведен эксперимент по изучению самоочищения евтрофного Обского болота на юге Томской области (выпуск на поверхность болота 50 л раствора NaCl с концентрацией 20 г/дм³) и установлен характер изменения концентраций Cl⁻ в торфяной залежи до и после выпуска раствора. Для объяснения выявленных фактов выполнены разработка и апробация математических моделей водного и геохимического режима участка торфяного болота. В результате показано, что: 1) болотные воды образуют общий поток с подземными водами в сторону реки Оби; на границе болота возможны периодические колебания напора подземных вод; 2) в нижней части торфяной залежи на исследуемом участке сформировался локальный водоупор, препятствующий распространению веществ по торфяной залежи; 3) распределение индикатора (Cl⁻) по торфяной залежи в значительной мере зависит не только от первоначальных объема и концентрации NaCl и наличия водоупора, но и от характера увлажнения болота. Даны рекомендации по использованию результатов моделирования.

Ключевые слова:

Математическое моделирование, химический состав, торфяная залежь, болотные воды, Обское болото, Западная Сибирь.

Введение

Загрязнение окружающей среды – одна из ключевых проблем современности. Весьма остро она стоит в Западно-Сибирском регионе – одном из важнейших нефтегазодобывающих регионов мира, особенностью которого является очень высокая заболоченность водосборных территорий [1-4]. Такие территории характеризуются сложными инженерно-геологическими и гидрологическими условиями. В ряде случаев их наличие может способствовать отклонениям фактического состояния технических систем от проектных требований вплоть до аварийных ситуаций, связанных со сбросом в болота и на заболоченные земли нефтегазоводяной эмульсии и минерализованных вод из систем поддержания пластового давления (ППД). Причем во многих случаях наибольший вред окружающей среде наносит именно сброс минерализованных вод [5-8].

С учетом этого в Томском политехническом университете (ТПУ) в 2021 г. проведен эксперимент по изучению условий распространения в болотной среде загрязняющих веществ (раствор NaCl, основной индикатор – содержание CГ) и самоочищения евтрофной болотной экосистемы на примере Обского болота, расположенного на юго-востоке Западной Сибири, в левобережной части долины реки Обь (преимущественно – на первой надпойменной террасе), в виде полосы длиной около 104 км и шириной 1,5–7,0 км [9]. Указанное болото характеризуется средней глубиной торфяной залежи около 3,2 м, максимальной – 6 м и распространением низинных торфов со степенью разложения 34 % и зольностью 28–29 %. Более подробная информация об Обском болоте приведена в работах [9–13]. Использование именно раствора NaCl обусловлено сходством по составу с водами системы ППД и высокой миграционной способностью хлоридов, что позволяет оценить максимальные размеры зоны распространения.

18 марта 2021 г. на Обском болоте (юг Томской области) в районе с. Нащеково (Шегарский административный район Томской области) пробурено пять скважин (Н1, Н2, Н3, Н4, Н5), отобраны пробы болотных вод в деятельном горизонте торфяной залежи и торфов через 0,25 м. Четыре скважины расположены в виде вершин квадрата со стороной 100 м. В середине квадрата на поверхности болота 19.03.2021 г. (скважина Н3) выполнен выпуск 50 л раствора NaCl с концентрацией 20 г/дм³ (рис. 1). Повторные бурение и отбор проб болотных вод и торфов проведены 16.10.2021 г. Работы выполнены с учетом требований и рекомендаций [14–18].



- Рис. 1. Схема расположения скважин на Обском болоте у с. Нащеково в левобережной части долины р. Обь при проведении эксперимента; «←» – направление течения в р. Обь и снижения высотных отметок Обского болота [9]
- Fig. 1. Boreholes layout on the Obskoe fen at Nashchekovo village in a left-bank part of the Ob river valley;
 «←» is a direction of current in the Ob river and reductions in high-altitude marks of the Obskoe fen [9]



Рис. 2. Изменение концентраций СГ в водных вытяжках из торфов в скважинах H1–H5 18 марта (а) и 16 октября (b) 2021 г.; h_i/h_p – отношение средней глубины отбора пробы (по интервалу 0,25 м) к глубине торфяной залежи

Fig. 2. Change of Cl^- concentration in water extracts from peats in borehole from H1 to H5 on 18 March (a) and 16 October (b) 2021; h_t/h_p is the ratio of the average sampling depth (over an interval of 0,25 m) to the depth of the peat deposit

Было показано, что с 19 марта по 16 октября 2021 г. непосредственно в месте выпуска раствора NaCl в интервале глубин 1,50-2,00 м сформировались относительно повышенные концентрации Na⁺ (до 11,5 мг/дм³) и Cl⁻ (до 22,4 мг/дм³). В прочих скважинах (на удалении около 70 м от выпуска) значимые изменения значений рН, удельной электропроводности EC, концентраций Na⁺ и Cl⁻ в болотных водах и водных вытяжках из торфов, связанные с выпуском раствора NaCl, не выявлены, что свидетельствует о значительной способности болотной экосистемы к самоочищению. Более подробно методика и результаты эксперимента охарактеризованы в работе [9]. Ниже рассмотрены причины выявленных изменений, а точнее – повышенных концентраций Cl⁻ в нижней части торфяной залежи до выпуска раствора и локализации раствора NaCl непосредственно в месте его выпуска в интервале глубин до 2,00 м (рис. 2).

Методика исследования

Основной подход к объяснению характера изменений концентраций Cl⁻ в водных вытяжках из торфов до и после выпуска раствора NaCl заключается в подборе математической модели распределения Cl⁻ с учетом режима подземных и болотных вод. Соответственно, методика исследования одновременно является и ее результатом. Поэтому далее отметим только основные подходы к разработке модели и источники информации для оценки ее параметров.

Для описания геомиграции в подземных водах обычно используется система уравнений сохранения количества движений, неразрывности водного потока и неразрывности потока вещества, растворенного или взвешенного в потоке, с учетом равномерного или неравномерного, установившегося или неустановившегося движения, жесткого или упругого режима фильтрации и ряда допущений, составляющих содержание типизации (гидродинамического районирования с выделением однотипных районов) и схематизации (упрощения природной обстановки и факторов в пределах выделенных районов) гидрогеологических и гидрогеохимических условий [19–24].

Очевидно, что аналогичный подход может быть использован и для изучения геомиграции в торфяном болоте [10, 25], в структуре которого обычно выделяют деятельный и инертный горизонты [26, 27]. Первый (деятельный горизонт) расположен в верхней части торфяной залежи (до 0,5-1,0 м), примерно соответствует корнеобитаемому слою и характеризуется доступом кислорода, сезонным изменением уровней болотных вод и более интенсивной (по сравнению с остальной частью торфяной залежи) фильтрацией преимущественно в горизонтальном направлении. В условиях неполного водонасыщения этого слоя в меженный период обычно рассматривают влагоперенос, характеризующийся коэффициентами влагопереноса k_w в зависимости от коэффициентов фильтрации k_f (при полном насыщении) и относительной влажности π [21], например, по формуле С.Ф. Аверьянова [28]:

$$k_w = k_f \cdot \left(\frac{\omega - \omega_0}{n - \omega_0}\right)^{3,5},\tag{1}$$

где ω – влажность; ω_0 – связанная влага; n – пористость грунта (все в долях единицы). При этом скорость поступления влаги к горизонту болотных вод I_{fw} может быть описана уравнением (2) с учетом модели инфильтрации Грина–Эмптона [29]:

$$I_{fw} \approx k_w \cdot \left(1 + \frac{x_{ef} + x_{sw}}{h_f}\right), \tag{2}$$

где h_f – глубина залегания болотных вод, м; X_{sw} – слой сточных вод, м/сут (в расчете, что инфильтрация 50 л раствора происходит одномоментно на поверхности залежи площадью примерно 1 м²); X_{ef} – эффективное атмосферное увлажнение (м/сут); расчет месячных значений X_{ef} (мм/мес) проводится по уравнениям (3)–(10):

$$X_{ef,t} = X_{r,t} + X_{sm,t} - E_{wp,t},$$
 (3)

$$X_{r,t} = \begin{cases} X_t, I_{atm,t} > I_{atm,l} \\ 0, T_{atm,t} \le T_{atm,l} \end{cases},$$
(4)

$$X_{sn,t} = X_t - X_{r,t},\tag{5}$$

$$X_{sm,t} = \begin{cases} X_{S,t-1} - X_{S,t}, \ X_{S,t-1} - X_{S,t} \ge 0\\ 0, X_{S,t-1} - X_{S,t} < 0 \end{cases},$$
(6)

$$X_{s,t} = \begin{cases} X_{s,t-1} + X_{sn,t} - E_{cp,t} - X_{sp,t}, \\ X_{s,t-1} + X_{sn,t} - E_{cp,t} - X_{sp,t} > 0; \\ 0, X_{s,t-1} + X_{sn,t} - E_{cp,t} - X_{sp,t} \le 0, \end{cases}$$
(7)

$$Y = k \cdot T \cdot M$$
(8)

$$\Lambda_{sp,t} - \kappa_{sp} \cdot I_{atm(>0)} \cdot M_t, \tag{8}$$

$$E_{cp,t} = k_{cp} \cdot d_{atm,t} \cdot M_t, \qquad (9)$$

$$E_{wp,t} = E_{wpy} \cdot \frac{d_{atm,t}}{\sum_{T_{atm,t>0}} d_{atm,t}},$$
(10)

где X_t – атмосферные осадки в месяц t, мм/мес; $X_{r,t}$ и $X_{sn,t}$ – атмосферные осадки в виде дождя и снега, соответственно, мм/мес; T_{atm,t} - среднемесячная температура приземных слоев атмосферного воздуха в месяц t, °C; $T_{atm,l}$ – расчетная температура атмосферного воздуха, выше которой атмосферные осадки преимущественно в жидком состоянии (условно принято 0 °C); $X_{S,t}$ – влагозапасы в снежном покрове, мм; $X_{sp,t}$ – потенциально возможная водоотдача из снежного покрова (принята ориентировочно как потенциальная интенсивность снеготаяния, вычисленная при коэффициенте стаивания k_{sp} =5 мм/сут), мм/мес; $X_{sm,t}$ – расчетная водоотдача из снежного покрова, мм/мес; M_t количество суток в месяце t; E_{cp,t} – испарение с поверхности водосбора в холодный период в месяц t (при *T_{atm.1}*<0; расчет по формуле П.П. Кузьмина с учетом значения эмпирического коэффициента k_{cp}=0,34 [30]); E_{wpy} и $E_{wp,t}$ – испарение с поверхности водосбора за весь холодный период и месяц t, мм/мес; значение Е_{*wpy*} вычислялось по разнице испарения за год и за холодный период; годовое испарение рассчитывалось по модифицированной формуле Шрайбера [31]; $d_{atm,t}$ и $\sum_{T_{atm,t>0}} d_{atm,t}$ – среднемесячный дефицит влажности атмосферного воздуха за месяц t и их сумма за теплый период, гПа. Расчетная мощность деятельного горизонта принята в размере 0,5 м с учетом уменьшения фильтрационных свойств и отложения малорастворимых соединений примерно на глубине 0,75 м [12, 13].

Второй (инертный) расположен ниже, коэффициенты фильтрации k_f резко уменьшаются с глубиной h, причем в случае низинных болот это снижение ориентировочно описывается уравнением Б.С. Маслова [32]:

$$k_{f(h)} = k_{f(0,5)} \cdot \exp(-1.3 \cdot (h - 0.5)), \tag{11}$$

где $k_t(h)$ и $k_t(0,5)$ – коэффициенты фильтрации (м/сут) на глубине h и в верхнем слое на глубине 0,5 м. Также следует отметить, что, согласно [33], в торфяной залежи верхового участка Васюганского болота отмечены два геохимических барьера - на границе деятельного горизонта и в нижней части торфяной залежи. Верхний барьер приурочен к резкому снижению скорости адвективного переноса, нижний - к практически полному отсутствию диффузионного переноса. В обоих случаях выявлено возможное взаимовлияние осаждения малорастворимых соединений и уменьшения коэффициентов фильтрации (на верхнем барьере - преимущественно гидроксиды железа, на нижнем сульфиды и карбонаты металлов, глинистые минералы). Похожая по некоторым признакам картина ранее была выявлена и на низинном Обском болоте, но с рядом отличий - значительно большие значения минерализация и рН болотных вод, более высокая амплитуда колебаний содержаний железа и окисляемости и так далее [12], что, с одной стороны, и послужило дополнительным аргументом для изучения гидрогеодинамических условий на этом объекте. С другой стороны, многими исследователями констатировался факт влияния на Обское болото подземных вод [10, 34]. Распределение торфов по залежи принято по [34] с учетом [10] и материалов собственных исследований [9, 11-13], коэффициенты фильтрации и пористость – по данным [35] с учетом типа торфа.

Для решения указанной выше системы уравнений, описывающих состояние подземных и болотных вод, в последние годы достаточно широко используются численные методы, что было сделано, например, и авторами работы [10]. Но при этом необходимо отметить отсутствие данных режимных наблюдений за уровнями подземных и болотных вод на исследуемом участке Обского болота. Принимая во внимание в целом невысокую гидрогеологическую изученность, это приводит к многовариантности выводов (о степени взаимосвязей между водными объектами) и их, скорее, качественном, а не количественном характере в случае выяснения причин зафиксированных изменений содержаний Cl⁻ с 19 марта по 16 октября 2021 г.

По этой причине и с учетом данных [10, 34] нами был использован подход, в соответствии с которым: 1) подземные и болотные воды образуют единый поток от водораздела в сторону реки Обь; 2) их водный режим можно рассматривать как цепь из стационарных состояний, каждое из которых соответствуют месячному интервалу; 3) структура модели разрабатывается и апробируется для элементов месячного водного баланса в среднем за многолетний период (по имеющимся многолетним данным наблюдений на гидрогеологической скважине 63р и реке Обь у п. Победа [36]) и для периода с 18 марта по 16 октября 2021 г. с приблизительным выделением месячных интервалов (пересчет среднемноголетних значений уровней подземных вод с поправкой на фактическое эффективное увлажнение); 4) внутри потока выделяются три характерных участка: L₁) суходол, прилегающий к границе Обского болота со стороны водораздела Обь-Иртыш; L_2) участок Обского болота; L_3) участок поймы реки Обь от границы Обского болота до уреза речных вод; 5) расход воды при установившемся движении в любой точке профиля оценивается по уравнениям (12), (13); 6) уровень болотных вод в месяц t на границе болота с водоразделом описывается (с учетом данных эпизодических наблюдений на исследуемом участке Обского болота) выражением (14), в точке перегиба кривой поверхности болота – (15), на границе болота с рекой Обь – (16), на участке $L_1 - (17)$, на участке $L_2 - (18)$, на участке $L_3 - (19)$:

$$q_{x,t} = q_{1,t} + I_{f,t} \cdot x,$$
 (12)

$$q_{1,t} = k_{f1} \cdot \frac{Z_{g_0,t}^2 - Z_{f1,t}^2}{2 \cdot L_1} - I_{f,t} \cdot \frac{L_1}{2},$$
(13)

$$Z_{f1,t} = (Z_{sf1} - \Delta Z_f) + (Z_{go,t} - Z_{go,a}),$$
(14)
$$Z_{f2,t} = (Z_{sf2} - \Delta Z_f) + X_{of,t},$$
(15)

$$f_{f2,t} = (Z_{sf2} - \Delta Z_f) + X_{ef,t},$$
 (15)

$$Z_{f3,t} = \sqrt{Z_r^2 + \frac{2 \cdot L_3}{k_{f3}} \cdot \left(q_{1,t} + I_{f,t} \cdot x\right) + I_{f,t} \cdot \frac{L_3}{2}}, (16)$$

$$Z_{1x,t} = \sqrt{Z_{g0,t}^2 - (Z_{g0,t}^2 - Z_{f1,t}^2)\frac{x_1}{L_1} + \frac{I_{f,t}}{k_{f1}}(L_1 - x_1)x_1}, \quad (17)$$
$$Z_{2x,t} = Z_{2(x,1),t} - (q_{1,t} + I_{f,t}x) \times$$

$$\times \frac{\Delta x}{\left(k_{fg,xa,t}m_{g,xa,t} + k_{fip,xa,t}m_{ip,xa,t} + k_{fap,xa,t}m_{ap,xa,t}\right)}, (18)$$

$$Z_{3x,t} = \sqrt{Z_{f3,t}^2 - \left(Z_{f3,t}^2 - Z_{r,t}^2\right)\frac{x_3}{L_3} + \frac{I_{f,t}}{k_{f3}}(L_3 - x_3)x_3},$$
(19)

где *I_{f,t}* – скорость инфильтрации за месяц *t*, м/сут; для среднемноголетнего периода определена в работе [13], а для периода с 18 марта по 16 октября 2021 г. - с поправкой на фактическое месячное эффективное увлажнение (если эффективное увлажнение (дождь + водоотдача из снежного покрова - испарение) в месяце t отрицательное, то проводится перераспределение из месяца с предыдущим максимальным увлажнением на месяцы с отрицательными значениями так, чтобы минимум не был меньше нуля с учетом того, что влага накапливается на поверхности и в приповерхностном слое, а потом расходуется на испарение и инфильтрацию); q_{x,t} – удельный расход воды за месяц $t, M^2/сут; Z_{f1,t}, Z_{f2,t}, Z_{f3,t}$ – среднемесячные уровни болотных вод в опорных точках в месяц t, м (в Балтийской системе высот); $Z_{1x,t}$, $Z_{2x,t}$, $Z_{3x,t}$ – среднемесячные уровни подземных и болотных вод между опорными точками в месяц *t*, м (в Балтийской системе высот); *x*, *x*₁, *x*₃ – расстояние от условного начала или соответствующего участка, м; L, L₁, L₂, L₃ – общая длина и длина каждого из участков, м; Δx – длина приращения между расчетными точками по профилю, м.

Начало первого участка принято по условной линии, проходящей через гидрогеологическую скважину 63р у с. Мельниково параллельно реке Обь (нулевая отметка в условном поперечном профиле долины реки Обь), до отметки 1500 м (граница болота). Второй участок расположен между отметками 1500 и 4730 м, третий – между 4730 и 4800 м (4800 м – расстояние до среднемноголетнего уреза реки Обь). Опорные точки на болоте соответствуют отметкам 1500 и 1686 м от условного начала. На первом участке средневзвешенный коэффициент фильтрации водоносного горизонта составляет 9,97 м/сут, на третьем – 10,6 м/сут (коэффициенты фильтрации в минеральных грунтах определены по зависимости от мощности рассматриваемого горизонта [13]). В пределах болота общий водоносный горизонт рассматривался как три взаимосвязанных (в разной степени) горизонта: 1) водоносные отложения, сложенные минеральными грунтами (средневзвешенный коэффициент фильтрации 10,72 м/сут); 2) инертный горизонт торфяной залежи (средневзвешенный коэффициент фильтрации в зависимости от типа торфов по данным [35]); 3) деятельный горизонт торфяной залежи (средневзвешенные коэффициенты фильтрации подбираются средствами MS Excel с использованием метода общего понижающего градиента) с целевой функцией в виде модификации критерия Нэша-Сатклифа [37]:

$$\frac{s}{\sigma} = \sqrt{1 - R^2} = \sqrt{\frac{\sum (y_{o,i} - y_{s,i})^2}{\sum (y_{o,i} - y_{oa})^2}},$$
(20)

где R^2 – квадрат корреляционного отношения; $y_{o,i}$ и y_{s,i} – измеренные и расчетные значения характеристики у; у_{оа} – среднее арифметическое измеренных значений.

По результатам апробации изложенного выше подхода уточнялась структура моделей взаимодействия подземных и болотных вод и распространения Cl по торфяной залежи с использованием метода наименьших квадратов при условии (21) согласно [38] и метода общего понижающего градиента с целевой функцией (20) или (22):

$$|r| \ge 0.7; \frac{|r|}{\delta_r} \ge 2; \ \frac{|k_r|}{\delta_k} \ge 2, \tag{21}$$

$$f = \frac{100 \cdot |y_{o,i} - y_{s,i}|}{y_{o,i}},$$
 (22)

где *r* и δ_r – коэффициент корреляции и погрешность его определения; k_r и δ_k – коэффициент регрессии и погрешность его определения. Расчеты выполнены в MS Excel.

Результаты исследования и их обсуждение

Апробация модели (1)-(19) показала удовлетворительную сходимость (критерий (20) менее 0,1) с наблюдаемым состоянием Обского болота по состоянию на 18 марта и 16 октября 2021 г. в пунктах опробования торфяной залежи и в узловых точках расчетного профиля. Один из выводов, который можно сделать по результатам анализа расчетного профиля в разные месяцы гидрологического года (как в 2021 г.,

 Z_t

так и в среднем за многолетний период), заключается в том, что поверхность Обского болота в целом соответствует кривой депрессии подземных вод (рис. 3; термин «кривая депрессии» употребляется согласно [19, 21] для описания поверхности подземных вод на территории, дренируемой водоком). Следовательно, эволюция болотной экосистемы контролируется условиями взаимодействия подземных, речных и болотных вод.



- Рис. 3. Расчетный профиль Обского болота; Z(sf) высотная отметка земной поверхности; Z(bt) – отметка дна болота; Z(rw; 18.03) и Z(rw; 16.10) – уровень воды реки Обь в створе расчетного профиля; Z(fw; 18.03) и Z(fw; 16.10) – расчетный уровень болотных вод
- Fig. 3. Calculated profile of the Obskoe fen; Z(sf) is the elevation of the Earth's surface; Z(bt) is the mark of the bottom of the fen; Z(rw; 18.03) and Z(rw; 16.10) are water levels of the Ob river in the cross-section of the calculated profile; Z(fw; 18.03) and Z(fw; 16.10) are calculated levels of fen waters

Другой, не менее важный, вывод заключается в том, что на границе Обского болота с суходолом возможны разнонаправленные движения болотных вод как в сторону Оби, так и в сторону водораздела, что формально соответствует отрицательным значениям проводимости деятельного горизонта торфяной залежи. Последнее обстоятельство, в свою очередь, приводит к выводу о том, что в ряде случаев возможны колебательные изменения уровня болотных вод при решении уравнения подпертой фильтрации. Так, если принять, согласно [21, 39], что изменение удельного расхода воды описывается уравнением (23), то при переменной проводимости потока $k_{fa} \cdot m_a$ в водоносных отложениях изменение уровней воды соответствует уравнению (24). Его решением, согласно [40, 41], при комплексных значениях корней характеристического уравнения будет выражение (25) с периодом колебаний $\tau = \frac{2 \cdot \pi}{\beta}$ и параметрами γ и β (26), (27):

$$\frac{dq_t}{dx} = \frac{k_{fn}}{m_n} \cdot \left(Z_t - Z_{fw,t} \right),\tag{23}$$

$$\frac{\partial^2 Z_t}{\partial x^2} + \left(\frac{1}{k_{fg} \cdot m_g} \cdot \frac{d k_{fg} \cdot m_g}{dx}\right) \frac{\partial Z_t}{\partial x} - \left(\frac{k_{fn}}{m_n \cdot k_{fg} \cdot m_g}\right) \times \left(\frac{Z_t}{\partial x} - \frac{Z_t}{\partial x}\right) = 0$$
(24)

$$= Z_{fwt} + e^{-\gamma \cdot x} (Z_1 \cos(\beta x) + Z_2 \sin(\beta x)), \quad (25)$$

$$\gamma = \frac{1}{2 \cdot k_{fg} \cdot m_g} \cdot \frac{d \, k_{fg} \cdot m_g}{dx},\tag{26}$$

$$\beta = \sqrt{\left(\frac{k_{fn}}{m_n \cdot k_{fg} \cdot m_g}\right) - \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{1}{k_{fg} \cdot m_g} \cdot \frac{d k_{fg} \cdot m_g}{dx}\right)^2}, \qquad (27)$$

где q_t – удельный расход воды через торфяную залежь (по аналогии с относительно водонепроницаемым слоем) мощностью m_n и с коэффициентом фильтрации k_{fn} ; Z_t и $Z_{fw,t}$ – уровни подземных и болотных вод.

Уточненный профиль пограничного участка Обского болота представлен на рис. 4. Его интерпретация заключается в констатации возможности поступления подземных вод с более высокой минерализацией и содержанием СГ в разные месяцы гидрологического года и в разных частях Обского болота, что в общих чертах и подтверждается результатами гидрогеохимических наблюдений, приведенных в [9].



- **Рис. 4.** Уточненный расчетный профиль участка Обского болота на границе с суходолом по состоянию на 18.03.2021 г.; Z(bt) отметка дна болота; Z(sf) отметка поверхности болота; Z(fw) уровень болотных вод; Z(sl) напорный уровень подземных вод
- Fig. 4. Updated design profile of the Obskoe fen site on the border on 18.03.2021; Z(bt) is fen bottom mark; Z(sf) is fen surface mark; Z(fw) is fen water level; Z(sl) is groundwater pressure level

В то же время необходимо отметить потенциальный характер указанного выше взаимодействия болотных и подземных вод. Фактически влияние подземных вод ограничено нижней частью торфяной залежи (рис. 2, *a*), что может объясняться характером изменения фильтрационных свойств торфов (рис. 5; фактическое изменение коэффициента фильтрации, предположительно, происходит с большей амплитудой), благодаря чему: 1) накопление хлоридов 18 марта 2021 г. приурочено к интервалу 3,50–4,25 м, сложенному низинным древесным переувлажненным торфом; 2) собственно расчет распространения индикаторных веществ по торфяной залежи можно ограничить участком торфяной залежи от ее поверхности до глубины 3 м, сформированным преимущественно низинным осоково-гипновым торфом; 3) в пределах этого участка адвективный перенос значим (с учетом уровней болотных вод у средней поверхности болота) в основном в слое очеса, а основной механизм переноса загрязняющих веществ по торфяной залежи – диффузионный с учетом процессов сорбции и растворения – осаждения [42]; 4) участок торфяной залежи от 3,0 до 3,5 м, сложенный низинным осоковым торфом, можно рассматривать как локальный водоупор (примечание – только в расчетном профиле Обского болота, что не исключает более значительных фильтрационных свойств осокового торфа и отсутствие указанного водоупора на других участках Обского болота), в пределах которого преобладает взаимодействие «вода – органическое вещество – газ – минеральные включения» с практически отсутствием адвективного переноса и минимальным диффузионным переносом.



Puc. 5. Расчетное изменение коэффициента фильтрации торфов по глубине торфяной залежи Обского болота **Fig. 5.** Calculated change in the peat filtration factor by the depth of the peat deposit of the Obskoe fen

С учетом указанных выше допущений и фактического распределения СГ в узловых точках (рис. 1, 2) для изучения распространения индикаторного вещества в водных вытяжках из торфов на исследуемом участке была использована одномерная стационарная модель диффузионного распространения вещества с концентрацией *С* в месяц *t* по торфяной залежи от поверхности до глубины z=3,0 м в виде (28) с частным аналитическим решением (29):

$$\frac{\partial^2 C_t}{\partial z^2} + \left(\frac{k_C}{D_m}\right) \cdot \left(C_{e,t} - C_t\right) = 0, \qquad (28)$$

$$C_{z,t} = C_{e,t} + \left(C_{0,t} - C_{e,t}\right) \cdot \exp\left(-\frac{k_C}{D_m} \cdot z\right), \quad (29)$$

где k_c – удельная скорость изменения концентрации вещества C в месяц t на глубине z, сут⁻¹; D_m – коэффициент диффузии, м²/сут; $C_{0,t}$ – начальная концентрация в месяц t, переходящая из предыдущего месяца, оцениваемая по уравнению (30); $C_{e,t}$ – концентрация, соответствующая равновесию в системе «болотная вода – торф – газ – минеральные отложения» с учетом процессов сорбции–десорбции и растворения–осаждения в соответствии с уравнением (31); фактически эта величина ($C_{e,t}$) определена методом общего понижающего градиента по минимуму относительной ошибки (22):

$$C_{0,t} = \frac{dm_t}{dV_t} = \frac{m_{t-1} + c_{atm,t} \frac{D_m}{\Delta z} (c_{z1(0,125),t-1} - c_{0,t-1}) + c_{atm,t} \cdot x_{ef,t}}{V_{t-1} + x_{ef,t}}, \quad (30)$$

$$C_{e,t} = \frac{k_{pM} \cdot C_p + k_s \cdot S}{k_{pM} + k_s \cdot k_{cs} \cdot (S_m - S)},$$
(31)

где dm_t и dV_t – изменение массы и объема вещества на поверхности болота в месяц t, начальная масса и объем в марте 2021 г. определены как сумма показателей содержаний Cl⁻ в исходном растворе NaCl и эффективных месячных атмосферных осадков; Catm,t - концентрация индикатора в месяце t (по наблюдениям в 2021 г. содержание СГориентировочно принято в талых снеговых водах 12,3 мг/дм3, в дождевых – 6,1 мг/дм³); Δz – интервал опробования (0,25 м); k_{pM} , k_s, k_{cs} – коэффициенты, характеризующие условия взаимодействия воды с торфом и минеральными отложениями; С_р – концентрация вещества в воде (водной вытяжке), соответствующая локальному равновесию; S и S_m – фактическая и максимально возможная концентрация вещества в грунте (кислотной вытяжке); более подробная информация о структуре и параметрах уравнения (31) приведена в [43].

Значение критерия (20) по вычисленным и измеренным поинтервальным содержаниям СГ в водных вытяжках их торфов составило 0,04, что может свидетельствовать об удовлетворительном описании конечного состояния торфяной залежи. При этом получена достаточно неожиданная картина распределения концентраций СГ по глубине торфяной залежи по месяцам. Так, резкое снижение содержаний отмечается уже в апреле. Однако в последующие месяцы при отсутствии дополнительного поступления раствора наблюдаются заметные колебания, связанные с «подтягиванием» наверх водной массы при увеличении дождевых осадков и «опусканием» вниз при преобладании испарения (рис. 6).



Рис. 6. Расчетные изменения концентраций СГ в водных вытяжках из торфов по глубине торфяной залежи в скважине H3 с 19.03.2021 до 16.10.2021 гг.

Fig. 6. Calculated changes in C^T concentration in water extracts from peat at the depth of the peat deposit in borehole H3 from 19.03.2021 to 16.10.2021

Заключение

В результате выпуска 50 л раствора NaCl с концентрацией 20 г/дм³ на поверхность евтрофного Обского болота 19 марта 2021 г. (дата выпуска индикаторного раствора; исходное распределение по торфяной залежи оценено 18 марта) по состоянию на 16 октября 2021 г. произошло формирование непосредственно в этом месте (скважина НЗ, рис. 1) относительно повышенных содержаний Cl в деятельном горизонте торфяной залежи и в интервале глубин 1,50-1,75 м. До выпуска раствора NaCl выявлено наличие линзы болотных вод с повышенным содержанием Cl⁻ в интервале глубин 3,5-4,5 м [9]. Выполнены разработка и апробация математических моделей водного и геохимического режима участка торфяного болота, показавшие, что отмеченные факты связаны со следующими обстоятельствами: 1) болотные воды образуют общий поток с подземными водами в сторону реки Оби, но на границе болота возможны разнонаправленные перемещения болотных вод и периодические колебания напора подземных вод; 2) в нижней части торфяной залежи на исследуемом участке сформировался локальный водоупор в виде осокового слоя с относительно низкими фильтрационными свойствами (по сравнению с другими слоями), препятствующий распространению подземных вод с более высокой, чем у болотных, минерализацией, по всей глубине торфяной залежи; 3) этот же водоупор препятствует и распространению индикаторного раствора NaCl, поступившего на поверхность болота 18.03.2021 г.; 4) распределение индикатора (Cl[¬]) по торфяной залежи в значительной мере зависит не только от первоначальных объема и концентрации NaCl и наличия водоупора, но и от характера увлажнения болота.

Указанные выводы получены на участке Обского болота у с. Нащеково, который является весьма типичным для заболоченных частей долин больших рек в таежной зоне Западной Сибири [1, 2]. По этой причине они могут быть распространены и на другие евтрофные болотные экосистемы и учтены при проведении экологического мониторинга. В частности, повышенные концентрации минеральных солей в водах и водных вытяжках низинных болот в ряде случаев могут быть связаны не с загрязнением, а с особенностями взаимосвязей болотных и подземных вод и водным режимом болота. Кроме того, перспективным природоохранным мероприятием для предотвращения загрязнения подземных вод на заболоченных территориях представляется организация локальных водоупоров в торфяной залежи путем уплотнения торфа и/или ввода глинистого раствора.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ БРИКС_Т № 18-55-80015.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 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.
- 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. V. 190 / Eds. J.T.A. Verhoeven, B. Beltman, R. Bobbink, D.F. Whigham. – Berlin: Heidelberg: Springer-Verlag, 2006. – P. 315–341.
- Global wetlands: potential distribution, wetland loss, and status / S. Hu, Zh. Niu, Y. Chen, L. Li, H. Zhang // Science of the Total Environment. – 2017. – V. 586. – P. 319–327. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.02.001.
- Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской федерации за 2020 г. / отв. ред. Г.М. Черногаева. – М.: Росгидромет, 2021. – 205 с. URL: http://downloads.igce.ru/ publications/reviews/review2020.pdf (дата обращения 15.01.2022).
- Охрана окружающей среды в территориальном Западно-Сибирском комплексе / В.А. Шишов, В.Ю. Шеметов, В.И. Рябченко, В.П. Парфенов. – М.: ВНИИОЭНГ, 1988. – 50 с.
- Солнцева Н.П. Добыча нефти и геохимия природных ландшафтов. – М.: Изд-во МГУ, 1998. – 376 с.
- 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.
- Московченко Д.В., Бабушкин А.Г., Убайдулаев А.А. Солевое загрязнение поверхностных вод на нефтяных месторождениях Ханты-Мансийского автономного округа – Югры // Водные ресурсы. – 2017. – Т. 44. – № 1. – С. 91–102. DOI: 10.7868/S0321059617010102.
- Эксперимент по оценке самоочищения Обского болота (Западная Сибирь, Томская область) / О.Г. Савичев, Н.В. Гусева, А.А. Хващевская, А.Ю. Иванов, Ян Хэн, Чжоу Дань // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг reopecypcoв. 2022. Т. 333. № 1. С. 73–84. DOI: 10.18799/24131830/2022/1/3514.
- 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. – V. 193. – P. 131–145. DOI: 10.1007/s11258-006-9253-x.
- 11. 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.
- 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. - V. 492. - P. 1. - P. 320-322. DOI: 10.1134/S1028334X20050219.
- Савичев О.Г., Ян Хэнь. Гидрогеологические и гидрологические условия функционирования Обского и Баксинского болот (юго-восток Западно-Сибирской равнины) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов 2021 Т. 332. № 4. С. 43–56. DOI: 10.18799/24131830/2021/04/3147.
- ГОСТ 17644-83. Торф. Методы отбора проб из залежи и обработки их для лабораторных испытаний. – М.: Изд-во стандартов, 1983. – 12 с.
- Требования к производству и результатам многоцелевого геохимического картирования масштаба 1:200 000 / отв. ред. Э.К. Буренков. – М.: ИМГРЭ, 2002. – 92 с.
- Weight W.D. Hydrogeology field manual. 2nd ed. USA: The McGraw-Hill Companies, Inc., 2008. – 751 p.

- Manual on stream gauging. V. I. Fieldwork. WMO. No. 1044. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, 2010. – 252 p.
- Coldewey W.G., Gobel P. Hydrogeologische Gelande- und Kartiermethoden. – Berlin: Springer Spektrum, 2015. – 221 p. DOI: 10.1007/978-3-8274-2728-1.
- Основы гидрогеологии. Гидрогеодинамика / И.К. Гавич, И.С. Зекцер, В.С. Ковалевский, Л.С. Язвин, Е.В. Пиннекер, С.С. Бондаренко, Л.В. Боревский, А.А. Дзюба / под ред. И.С. Зекцера. – Новосибирск: Наука, 1983. – 241 с.
- 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.
- 21. Шестаков В.М. Гидрогеодинамика. М.: КДУ, 2009. 334 с.
- Martin H., Pohl R. Technische Hydromechanik. Hydraulische und numerische Modelle. – Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2015. – 406 p.
- Румынин В.Г. Теория и методы изучения загрязнения подземных вод. СПБ.: Наука, 2020. 559 с.
- 24. Research progress on the migration and diffusion of pollutants at the sediment-water interface / Lei Pei, Zhang Hong, Wang Chao, Pan Ke // Lake Science. – 2018. – V. 30. – № 6. – P. 1489–1508.
- A numerical study of the effect of wetland shape and inlet-outlet configuration on wetland performance / N. Sabokrouhiyeh, A. Bottacin-Busolinb, J. Savickis, H. Nepf, A. Marion // Ecological Engineering. – 2017. – V. 105. – P. 170–179. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2017.04.062.
- ГОСТ 19179-73. Гидрология суши. Термины и определения. М.: Госстандарт СССР, 1988. – 47 с.
- Иванов К.Е. Водообмен в болотных ландшафтах. Л.: Гидрометеоиздат, 1975. – 280 с.
- Монин А.С. О математическом моделировании процессов гидрологии суши // Теория и методы управления ресурсами вод суши. – М.: Наука, 1982. – С. 20–28.
- Дунин Ф.Х. Моделирование инфильтрации в приближении к полевым условиям // Грани гидрологии / под ред. Дж.К. Родда. – Л.: Гидрометеоиздат, 1980. – С. 241–275.
- Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 15. Алтай и Западная Сибирь. Вып. 2. Средняя Обь. – Л.: Гидрометеоиздат, 1972. – 408 с.
- Савичев О.Г. Гидроэкологическое обоснование водохозяйственных решений. – Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2021. – 167 с.
- Мелиорация и водное хозяйство. В 5 т. Т. 3. Осушение / под ред. Б.С. Маслова. – М.: Агропромиздат, 1985. – 447 с.
- Geochemical barriers in oligotrophic peat bog (Western Siberia) / O. Savichev, E. Soldatova, M. Rudmin, A. Mazurov // Applied Geochemistry. – 2020. – V. 113. – 104519. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2019.104519.
- Альбом аэрофотоснимков растительного покрова торфяных месторождений центральной части Западной Сибири. – М.: Геолторфразведка, 1973. – 83 с.
- 35. Емельянова Т.Я., Крамаренко В.В. Характеристики фильтрационных свойств торфов Томской области // Обской вестник. – 2001. – № 1. – С. 36–39.
- 36. Льготин В.А., Савичев О.Г., Макушин Ю.В. Многолетние изменения среднесезонных и среднегодовых уровней и температуры подземных вод верхней гидродинамической зоны в Томской области // Геоэкология. – 2010. – № 1. – С. 23–29.
- Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models. P. I. A discussion of principles // Journal of Hydrology. – 1970. – № 10 (3). – P. 282–290.
- СП 33-101-2003. Свод правил по проектированию и строительству. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. – М.: Госстрой России, 2004. – 72 с.
- Рекомендации по методике оценки и прогноза гидрогеологических условий при подтоплении городских территорий. – М.: Стройиздат, 1983. – 194 с.
- Korn G.A., Korn Th.M. Mathematical handbook for scientists and engineers: definitions, theorems, and formulas for reference and review. Originally publ. – New York: Mc Graw-Hill, 1968. – Reprint in the US by Courier Corporation, 2013. – 1152 p.
- Зельдович Я.Б., Мышкис А.Д. Элементы прикладной математики. – М.: Наука, 1972. – 592 с.

- Лиштван И.И., Базин Е.Т., Косов В.И. Физические процессы в торфяных залежах. – Минск: Наука и техника, 1989. – 287 с.
 Савичев О.Г., Чжоу Дань. Способ оценки допустимых кон-
- Савичев О.Г., Чжоу Дань. Способ оценки допустимых концентраций загрязняющих веществ с учетом состояния донных отложений // Известия Томского политехнического универси-

тета. Инжиниринг георесурсов – 2021. – Т. 332. – № 6. – С. 107–117. DOI 10.18799/24131830/2021/06/3241.

Поступила 02.02.2022 г.

Информация об авторах

Савичев О.Г., доктор географических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Ян Хэн, аспирант отделения геологии инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Чжоу Дань, аспирант отделения геологии инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета. UDC 556.531.4:550.84.094

HYDROGEODYNAMIC AND HYDROGEOCHEMICAL CONDITIONS OF SELF-CLEARANCE OF THE OBSKOE FEN WATER (WESTERN SIBERIA)

Oleg G. Savichev¹, OSavichev@mail.ru

Yang Heng¹, 13698754927@163.com

Zhou Dan¹,

929177582@qq.com

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

Relevance. Economic activity in the wetlands of Western Siberia in the conditions of climate change requires scientific justification of both methods of environmental monitoring and environmental protection measures. One of the effective ways of such justification, taking into account the lack of observations, is mathematical modeling of hydrogeodynamical and hydrogeochemical processes in fen ecosystems. **The aim** of the research is to identify the mechanisms of natural-technogenic distribution of CI⁻-concentrations in water extracts from peat over the depth of peat deposits.

Methods: field experiment, methods of definition of a chemical composition of peat and water, methods of mathematical modeling. **Results and conclusions.** An experiment was conducted to study the self-purification of the eutrophic Obskoe fen in the south of the Tomsk region (release of 50 liters of NaCl solution with a concentration of 20 g/dm³ to the fen surface), and the nature of changes in Cl-concentrations in peat deposits before and after the release of the solution was established. To explain the revealed facts, mathematical models of the water and geochemical regime of the peat fen site were developed and tested. As a result, it is shown that: 1) fen waters form a common flow with groundwater towards the Ob river; periodic fluctuations in groundwater pressure are possible at the border of the fen; 2) in the lower part of the peat deposit, a local water barrier has formed in the study area, preventing the spread of substances in a peat deposit; 3) distribution of the indicator (Cl-) over the peat deposit largely depends not only on the initial volume and concentration of NaCl and the presence of a water barrier, but also on the nature of the wetness of the fen. Recommendations on the use of simulation results are given.

Key words:

Mathematical modeling, chemical composition, peat deposit, fen waters, the Obskoe fen, Western Siberia.

The research was financially supported by the RFBR grant no. 18-55-80015.

REFERENCES

- Liss O.L., Abramova L.I., Avetov N.A. *Bolotnye sistemy Zapadnoy Sibiri i ikh prirodookhrannoe znachenie* [Bog of Western Siberia and their conservation value]. Tula, Grif i K° Publ., 2001. 584 p.
- 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*. Vol. 190. Eds. J.T.A. Verhoeven, B. Beltman, R. Bobbink, D.F. Whigham. Berlin Heidelberg, Springer-Verlag, 2006. pp. 315–341.
- 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.
- 4. Obzor sostoyaniya i zagryazneniya okruzhayushchey sredy v Rossiyskoy federatsii za 2020 g. [Overview of the state and pollution of the environment in the Russian Federation for 2020]. Ed. ed. G.M. Chernogaeva. Moscow, Rosgidromet Publ., 2021. 205 p.
- Shishov V.A., Shemetov V.Yu., Ryabchenko V.I., Parfenov V.P. Okhrana okruzhayushchey sredy v territorialnom Zapadno-Sibirskom komplekse [Environmental protection in the territorial West Siberian complex]. Moscow, VNIIOENG Publ., 1988. 50 p.
- Solntseva N.P. Dobycha nefti i geokhimiya prirodnykh landshaftov [Oil mining and geochemical transformation of landscapes]. Moscow, Moscow State University Press, 1998. 376 p.
- 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.

- Moskovchenko D.V., Babushkin A.G., Ubaidulaev A.A. Solevoe zagryaznenie poverkhnostnykh vod na neftyanykh mestorozhdeniyakh Khanty-Mansiyskogo avtonomnogo okruga – Yugry [Salt pollution of surface waters at the oil fields of the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug – Yugra]. *Vodnye resursy*, 2017, vol. 44, no. 1, pp. 91–102. DOI: 10.7868/S0321059617010102.
- Savichev O.G., Guseva N.V., Khvashchevskaya A.A., Ivanov A.Yu., Heng Y., Dan Zh. Experiment for estimating self-cleaning of the Obskoe fen (Western Siberia, Tomsk region). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 1, pp. 73–84. DOI: 10.18799/24131830/2022/1/3514.
- 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.
- 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. DOI: 10.18799/24131830/2020/3/2530.
- 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.

- Savichev O.G., Yang Heng. Hydro-geological and hydrological conditions of functioning of the Obskoe and Baksinskoe fens (the southeast of the Western Siberian plain. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 4, pp. 43–56. DOI: 10.18799/24131830/2021/04/3147.
- GOST 17644-83. Torf. Metody otbora pro iz zalezhi i obrabotki ikh dlya laboratornykh ispytany [SS 17644-83. Peat. Methods of sampling from deposit and preparation of samples for laboratory tests]. Moscow, Izdatelstvo standartov, 1983. 12 p.
- Trebovaniya k proizvodstvu i rezultatam mnogotselevogo geokhimicheskogo kartirovaniya masshtaba 1:200000 [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.
- Weight W.D. Hydrogeology field manual. 2nd ed. USA, The McGraw-Hill Companies, Inc., 2008. 751 p.
- Manual on stream gauging. Vol. I. Fieldwork. WMO. No. 1044. Geneva, Switzerland, World Meteorological Organization, 2010. 252 p.
- Coldewey W.G., Gobel P. Hydrogeologische Gelande- und Kartiermethoden [Hydrogeological terrain and mapping methods]. Berlin, Springer Spektrum, 2015. 221 p. DOI: 10.1007/978-3-8274-2728-1.
- Gavich I.K., Zektser I.S., Kovalevsky V.S., Yazvin L.S., Pinneker E.V., Bondarenko S.S., Borevsky L.V., Dzyuba A.A. Osnovy gidrogeologii. Gidrogeodinamika [Fundamentals of hydrogeology. Hydrogeodynamics]. Ed. by I.S. Zeccer. Novosibirsk, Nauka Publ., 1983. 241 p.
- 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.
- Shestakov V.M. *Gidrogeodinamika* [Hydrogeodynamics]. Moscow, KDU Publ., 2009. 334 p.
- Martin H., Pohl R. Technische Hydromechanik. Hydraulische und numerische Modelle [Technical hydromechanics. Hydraulic and numerical models]. Berlin, Beuth Verlag GmbH, 2015. 406 p.
- Rumynin V.G. *Teoriya i metody izucheniya zagryazneniya podzemnykh vod* [Theory and methods of studying groundwater pollution]. St. Petersburg, Nauka Publ., 2020. 559 p.
- Lei Pei, Zhang Hong, Wang Chao, Pan Ke. Research progress on the migration and diffusion of pollutants at the sediment-water interface. *Lake Science*, 2018, vol. 30, no. 6, pp. 1489–1508.
- Sabokrouhiyeh N., Bottacin-Busolinb A., Savickis J., Nepf H., Marion A. A numerical study of the effect of wetland shape and inlet-outlet configuration on wetland performance. *Ecological Engineering*, 2017, vol. 105, pp. 170–179. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2017.04.062.
- GOST 19179-73. *Gidrologiya sushi. Terminy i opredeleniya* [Land hydrology. Terms and definitions]. Moscow, Gosstandart of the USSR Publ., 1988. 47 p.
- Ivanov K.E. Vodoobmen v bolotnykh landschaftakh [Water exchange in mire landscapes]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1975. 280 p.
- Monin A.S. O matematicheskom modelirovanii protsessov gidrologii sushi [On mathematical modeling of land hydrology processes]. *Teoriya i metody upravleniya resursami vod sushi* [Theory and Methods of Land Water Resource Management]. Moscow, Nauka Publ., 1982. pp. 20–28.
- Dunin F.Kh. Modelirovanie infiltratsii v priblizhenii k polevym usloviyam [Modeling of infiltration in approximation to field conditions]. *Grani gidrologii* [Facets of hydrology]. Ed. by J.K. Rod-

da. Translated from English. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1980. pp. 241–275.

- Resursy poverkhnostnykh vod SSSR. T. 15. Altay i Zapadnaya Sibir. Vyp. 2. Srednyaya Ob [Surface water resources of the USSR. Vol. 15. Altai and Western Siberia. Iss. 2. Middle Ob]. Ed. by O.N. Panin. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1972. 408 p.
- Savichev O.G. Gidroekologicheskoe obosnovanie vodokhozyaystvennykh resheniy [Hydroecological substantiation of water management decisions]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. House, 2021. 167 p.
- Melioratsiya i vodnoe khozyaystvo. T. 3. Osushenie [Melioration and water management. Vol. 3. Drainage]. Ed. by B.S. Maslov. Moscow, Agropromizdat Publ., 1985. 447 p.
- 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.
- 34. Albom aerofotosnimkov rastitelnogo pokrova torfyanykh mestorozhdeniy tsentralnoy chasti Zapadnoy Sibiri [Album of photographs of the vegetation cover of peat deposits in the central part of Western Siberia]. Moscow, Geoltorfrazvedka Publ., 1973. 83 p.
- Emelyanova T.Ya., Kramarenko V.V. Kharakteristiki filtratsionnykh svoystv torfov Tomskoy oblasti [Characteristics of the filtration properties of peats of the Tomsk region]. *Obskoy vestnik*, 2001, no. 1, pp. 36–39.
- 36. Lgotin V.A., Savichev O.G., Makushin Yu.V. Mnogoletnie izmeneniya srednesezonnykh i srednegodovykh urovney i temperatury podzemnykh vod verkhney gidrodinamicheskoy zony v Tomskoy oblasti [Long-term changes in the average seasonal and average annual levels and temperature of groundwater in the upper hydrodynamic zone in the Tomsk region]. *Geoecology*, 2010, no. 1, pp. 23–29.
- Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models. P. I. A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 1970, no. 10 (3), pp. 282–290.
- SP 33-101-2003. Svod pravil po proektirovaniyu i stroitelstvu. Opredelenie osnovnykh raschetnykh gidrologicheskikh kharakteristik [Code of rules for design and construction. Determination of the main calculated hydrological characteristics]. Moscow, Gosstroy of Russia Publ., 2004. 72 p.
- 39. Rekomendatsii po metodike otsenki i prognoza gidrogeologicheskikh usloviy pri podtoplenii gorodskikh territoriy [Recommendations on the methodology for assessing and forecasting hydrogeological conditions during flooding of urban areas]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1983. 194 p.
- 40. Korn G.A., Korn Th.M. Mathematical handbook for scientists and engineers: definitions, theorems, and formulas for reference and review. Originally publ. New York, Mc Graw-Hill, 1968. Reprint in the US by Courier Corporation, 2013. 1152 p.
- Zeldovich Ya.B., Myshkis A.D. *Elementy prikladnoy matematiki* [Elements of applied mathematics]. Moscow, Nauka Publ., 1972. 592 p.
- Lishtvan I.I., Bazin E.T., Kosov V.I. Fizicheskie protsessy v torfyanykh zalezhakh [Physical processes in peat deposits]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1989. 287 p.
- 43. Savichev O.G., Zhou Dan. Method for assessing allowable concentrations of polluting substances with conditions of river sediments. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering, 2021, vol. 332, no. 6, pp. 107–117. In Rus. DOI: 10.18799/24131830/2021/06/3241.

Received: 2 February 2022.

Information about the authors

Oleg G. Savichev, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University. *Yang Heng*, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University. *Zhou Dan*, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 551.435.627

ПРИМЕНЕНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ НА ОСНОВЕ ГИС ДЛЯ ОЦЕНКИ ПОТЕНЦИАЛЬНОГО РАЗВИТИЯ ОПОЛЗНЕЙ В РАЙОНЕ ШАПА, ВЬЕТНАМ

Зыонг Ван Бинь^{1,2}, duongvanbinh@humg.edu.vn

duongvanbinn@nung.edu.vii

Фоменко Игорь Константинович²,

ifolga@gmail.com

Нгуен Чунг Киен³, kien.mgri@gmail.com

Ви Тхи Хонг Лиен³, vyhonglien2003@yahoo.com

Зеркаль Олег Владимирович⁴, igzov@mail.ru

Ву Хонг Данг⁵,

hongdangbg@gmail.com

- ¹ Ханойский горно-геологический университет, Вьетнам, 100000, г. Ханой, ул. Вьен, 18.
- ² Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе, Россия, 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 23.
- ³ Вьетнамская академия наук и технологий, Вьетнам, 100000, г. Ханой, ул. Чуаланг, 84.
- ⁴ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Россия, 119991, г. Москва, Ленинские горы, 1.
- ⁵ Вьетнамский институт геонаук и минеральных ресурсов, Вьетнам, 100000, г. Ханой, ул. Тьентханг, 67.

Актуальность. Прогнозирование и минимизация последствий стихийных бедствий являются важнейшими задачами для правительств во всем мире, включая Вьетнам. Оползни являются одним из наиболее распространенных видов стихийных бедствий во Вьетнаме, особенно в северных горных провинциях, что приводит к значительным человеческим жертвам и материальному ущербу. В этом исследовании для оценки потенциального развития оползней в районе Шапа, провинция Лаокай, применялись статистические методы, с использованием геоинформационных систем (ГИС). Для решения поставленной задачи было отобрано девять факторов, определяющих оползневую восприимчивость на рассматриваемой территории: высота над уровнем моря, расстояние до дорог, крутизна склонов, расстояние от разломов, среднемесячное количество осадков, вертикальное расчленение рельефа, землепользование, тот коры выветривания и расстояние до эрозионной сети.

Основная цель исследования заключается в подготовке карт потенциального развития оползней для района Шапа. Кроме того, выполненные работы продемонстрировали эффективность использованных статистических методов при оценке восприимчивости территории к оползневому процессу.

Объектом исследования является оползневая восприимчивость в районе Шапа провинции Лаокай (Вьетнам).

Методы: статистические методы с использованием ГИС, включая метод соотношения частотностей (англ. Frequency Ratio method – FR), метод анализа оползневой восприимчивости (англ. Landslide Susceptibility Analysis method – LSA) и метод статистического индекса (англ. Statistical Index method – SI).

Результаты. Были построены карты потенциального развития оползней для исследуемой территории, которая была разделена на пять зон: очень низкого потенциала, низкого потенциала, среднего потенциала, высокого потенциала и очень высокого потенциала. Площадь под кривой ошибок была использована для оценки достоверности этих моделей. Проценты успеха моделей для тренировочных данных составляют 74,60 % (FR), 70,82 % (LSA) и 76,36 % (SI). Проценты прогнозирования моделей для данных тестирования составляют 77,01 % (FR), 74,36 % (LSA) и 78,11 % (SI). Оценка эффективности моделей показала, что все три метода являются эффективными для оценки потенциального развития оползневого процесса в районе исследования. Результаты исследований имеют исключительно важное значение для планирования землепользования и экономического развития, а также для минимизации ущерба от оползней.

Ключевые слова:

Оползневая восприимчивость, потенциальное развитие оползней, метод соотношения частотностей, метод анализа оползневой восприимчивости, метод статистического индекса, ГИС, район Шапа, Вьетнам.

Введение

Оползни являются одним из наиболее опасных стихийных бедствий в мире, приводящих к значительному экономическому ущербу и человеческим жертвам [1-3]. Согласно исследованию [4], выполненному на основе данных из 128 стран за два десятилетия (1995-2014 гг.), в результате 3876 оползней во всем мире погибло 163658 человек и 11689 человек получили ранения. Общее число оползней со смертельным исходом, зарегистрированных в мире в период с 2004 по 2016 гг. (включительно), составило 4862, исключая случаи, вызванные землетрясениями, и большинство оползней произошло в Азии (75 %) [5]. Во Вьетнаме, особенно в северных горных провинциях, оползни часто приводили к значительным человеческим жертвам и материальным потерям [6-8]. На возникновение и активизацию оползней влияют геологические и геоморфологические особенности территории, а также количество осадков и антропогенное воздействие [9]. Для минимизации ущерба от оползней необходимо проведение детального изучения факторов, определяющих развитие оползневых процессов с учетом механизма их развития, а также анализ полученных значений оползневой восприимчивости.

Оползневая восприимчивость, опасность и риск развития оползней являются тремя основными компонентами исследования склоновых процессов [10]. Оползневая восприимчивость-это пространственная вероятность оползней, происходящих в данном районе, в зависимости от локальных топографических условий, указывающая, «где» могут произойти оползни [11, 12]. Следует отметить, что в работах российских исследователей понятие «оползневая восприимчивость» также трактуется как «предрасположенность территории к развитию оползней».

Картирование оползневой восприимчивости (LSM -Landslide Susceptibility Mapping) - это процесс определения пространственного распределения и классификации единиц территории на основе их склонности к образованию оползней. На это влияют топография, геология, характеристики свойств грунтов, климат, растительность и техногенное воздействие [13]. Пространственный анализ с использованием ГИС проясняет связи между различными элементами устойчивости литотехнических систем и развитием оползневых процессов, являясь эффективным методом для оценки оползневой восприимчивости [14-17]. Модели на основе ГИС успешно использовались в различных исследованиях оползневой восприимчивости во Вьетнаме [18-22]. Подходы к оценке оползневой восприимчивости можно разделить на качественные и количественные [23-27]. В последние годы наблюдается значительное увеличение числа количественных оценок оползневой восприимчивости. Это связано с тем, что количественные подходы обеспечивают более точные результаты. Однако качественные подходы все ещё не потеряли своей актуальности при оценке оползневой восприимчивости на больших территориях или в тех случаях, когда количественные подходы неосуществимы из-за отсутствия данных.

Статистические методы широко применяются для оценки оползневой восприимчивости [28–32] благодаря следующим преимуществам [33]:

- Поскольку математические операции фиксированы, результаты повторяемы.
- Благодаря независимому анализу каждой из карт факторов развития оползневых процессов результаты легко объяснить.
- Экспертное мнение может быть включено в анализ, поскольку конкретные комбинации переменных могут быть рассмотрены и оценены на предмет их значимости в возникновении оползней.
- 4) Точность полученных карт может быть проверена с использованием данных о пространственном распределении оползней, особенно когда оценка основана на распределении исторических оползней и сравнивается с пространственным распределением проявлений современных оползневых процессов.

В этом исследовании для оценки оползневой восприимчивости и создания карт потенциального развития оползней в районе Шапа провинции Лаокай (Вьетнам) были использованы три статистических метода: метод соотношения частотностей (англ. Frequency Ratio method – FR), метод анализа оползневой восприимчивости (англ. Landslide Susceptibility Analysis method – LSA) и метод статистического индекса (англ. Statistical Index method – SI). В результате выполненного анализа исследуемая территория был разделена на пять зон по степени потенциального развития оползневого процесса – очень низкая, низкая, средняя, высокая и очень высокая.

Достоверность полученных моделей была оценена с применением AUCROC (площадь под кривой ошибок) анализа.

ROC-кривая, или кривая ошибок (англ. Receiver Operating Characteristic), – график, позволяющий оценить качество бинарной классификации, показывает зависимость количества верно классифицированных положительных примеров от неверно классифицированных отрицательных примеров.

Площадь под ROC-кривой AUC (Area Under Curve) является агрегированной характеристикой качества классификации, не зависящей от соотношения величин ошибок. Чем больше значение AUC, тем качественнее полученная модель классификации.

Важные характеристики района исследования

Лаокай – одна из северных провинций Вьетнама, наиболее подверженная оползневым процессам из-за горной местности, сложной геологии и тропического муссонного климата с высоким среднегодовым количеством осадков [34]. Расположенный на ее северозападе район Шапа находится примерно в 38 км от центра города Лаокай и в 376 км от Ханоя (рис. 1). Район исследования покрывает площадь 675,8 км² и имеет высоту над уровнем моря от 150 м до более чем 3000 м. В геологическом строении района исследований принимают участие осадочные, метаморфические и магматические породы различных возрастов.



Puc. 1. Pacnoлoжение района исследования Fig. 1. Location of study area

Район Шапа, по сравнению с другими районами северного Вьетнама, вследствие сельскохозяйственного освоения и развития туризма, столкнулся с проблемой активизации оползневых и эрозионных процессов [35].

В последние годы в Шапе наблюдается увеличение количества оползней. Оползни наиболее часты в

сезон дождей и являются причиной значительного социального и экономического ущерба. Оползень Монгсен (рис. 2, *a*), активизировавшийся в 1998, 2000, 2002, 2009 гг., является наиболее известным оползнем в районе исследования. Он расположен на национальной дороге 4D, соединяющей город Лаокай и район Шапа.



Puc. 2. Активизация оползневых процессов в коммунах: Монгсен (a), Хаутхао (b) и оползня Чунгчай (c) *Fig. 2.* Photo of the Mong Sen landslide (a), the landslide site in Hau Thao commune (b) and the landslide site in Trung Chai commune (c)

5 августа 2019 г. на км 9+100 провинциальной дороги 152, соединяющей районный центр Шапа с коммуной Хаутхао, произошел оползень, в результате которого погиб один человек (рис. 2, *b*). 19 августа 2020 г. в результате оползня в деревне Тачунгхо коммуны Банхо также погиб один человек.

Наряду с осадками техногенная деятельность (перенаправление систем поверхностного дренажа, земляные работы на склонах в процессе дорожного строительства) способствует активизации оползней в районе исследования. Примером является оползневой массив вдоль провинциальной дороги 152, на км 12+600-км 12+900, в районе коммуны Чунгчай (рис. 2, *c*). На момент обследования в пределах оползневого массива наблюдались трещины и смещения.

Материалы и методы исследования

Метод соотношения частотностей

При прогнозировании оползней целесообразно предположить, что их возникновение определяется причинными факторами и что будущие оползни могут происходить в тех же условиях, что и предыдущие [36]. Исходя из этого предположения, можно установить взаимосвязь между районами, где произошли оползни, и факторами активизации оползней, которая может быть определена на основе метода соотношения частотностей, согласно которому каждый причинный фактор подразделяется на несколько классов, и значение частоты (FR) для каждого класса факторов (табл. 1) определяется с использованием следующего уравнения (1) [37]:

$$FR = \frac{\binom{N_i}{N}}{\binom{P_i}{P}},\tag{1}$$

где N_i – количество точек (пикселей) оползней в классе факторов i; N – общее количество точек (пикселей) оползней на карте района исследования; P_i – количество точек (пикселей) в классе факторов i; P – общее количество точек (пикселей) на карте района исследования.

Индекс оползневой восприимчивости (*LSI*) при данном подходе рассчитывается по следующему уравнению (2):

$$LSI = \sum FR_i,$$
 (2)

где LSI – индекс оползневой восприимчивости; FR_i – значение FR класса фактора *i*.

Среднее значение FR равно 1,0. Когда значение FR превышает 1,0, наблюдается более сильная корреляция между частотностью оползней и факторами оползневой восприимчивости. Когда значение FR меньше 1,0, это подразумевает более слабую связь между частотностью оползней и оползневыми факторами [38].

Метод анализа оползневой восприимчивости

Анализ оползневой восприимчивости – это простой и эффективный метод для оценки влияния различных факторов на возникновение оползней. В рамках этого метода для анализа влияния каждого фактора используются весовые коэффициенты, которые сравнивают оценочную плотность с общей плотностью в рассматриваемом районе [39]. Для определения значения веса класса факторов в методе *LSA* (табл. 1) используется следующее уравнение [3, 29, 39] (3):

$$W_{LSA} = 1000 (D_{ij} - D) = 1000 (\frac{N_i}{P_i} - \frac{N}{P}),$$
 (3)

где D_{ij} – плотность оползней в классе *i* фактора *j*; D – плотность оползней на карте района исследования; N_i – количество точек (пикселей) оползней в классе фактора *i*; N – общее количество точек (пикселей) оползней на карте района исследования; P_i – количество точек (пикселей) в классе фактора *i*; P – общее количество точек (пикселей).

Индекс оползневой восприимчивости (LSI) при этом подходе рассчитывается по следующему уравнению (4):

$$LSI = \sum W_i, \tag{4}$$

где LSI — индекс оползневой восприимчивости; W_i — значение W_{LSA} класса фактора *i*.

Метод статистического индекса

Метод статистического индекса, или метод оползневого индекса, был впервые предложен Ван Вестеном (Van Westen) в [40] и применялся во многих исследованиях для картирования оползневой восприимчивости [29, 31, 41]. В рамках рассматриваемого метода значение веса каждого класса (табл. 1) рассчитывается по натуральному логарифму плотности оползней в классе, деленному на общую плотность оползней в районе исследования (5) [40]:

$$W_{SI} = \ln \frac{D_{ij}}{D} = \ln \left(\frac{N_i}{P_i} \times \frac{P}{N} \right), \tag{5}$$

где D_{ij} – плотность оползня в классе *i* фактора *j*; D – плотность оползня на карте района исследования; N_i – количество точек (пикселей) оползня в классе фактора *i*; N – общее количество точек (пикселей) оползня на карте района исследования; P_i – количество точек (пикселей) в классе фактора *i*; P – общее количество точек (пикселей) на карте района исследования.

Индекс оползневой восприимчивости (LSI) при этом подходе рассчитывается по следующему уравнению (6):

$$LSI = \sum W_i, \tag{6}$$

где LSI – индекс оползневой восприимчивости; W_i – значение W_{SI} класса фактора *i*.

Карта инвентаризации оползней

Карта инвентаризации оползней-это карта, на которой показано распределение существующих проявлений оползневых процессов [23]. При составлении инвентаризационных карт оползней (LIM – Landslide Inventory Mapping) внимание фокусируется на определении границы оползней и игнорирует особенности оползневых деформаций. LIM является важнейшим элементом в оценке риска оползней [42]. Наряду с изображением пространственного распределения оползней карта инвентаризации оползней может включать другие виды информации, такие как геометрические характеристики оползня (размеры, площадь, глубина захвата склонового массива оползневыми деформациями), особенности геологического строения (литология, структура, свойства грунтов) и гидрогеологических условий [43]. Методы, применяемые при создании карты инвентаризации оползней, можно разделить на три группы [43]:

- методы, основанные на визуальной интерпретации;
- полуавтоматические методы;
- автоматические методы, основанные на глубоком обучении.

При выполнении настоящих работ карта инвентаризации оползней была составлена с использованием результатов полевых наблюдений и данных тематической обработки материалов дистанционного зондирования.

В районе исследования было выявлено в общей сложности 130 оползней, при этом наименьшая площадь оползня составила 395,6 м², а самая большая площадь оползня –70447,4 м². Большинство оползней было зафиксировано в коммуне Чунгчай, в центре района Шапа, в коммунах Лаочай, Таван и Банхо. Для оценки потенциала развития оползней местоположения склоновых деформаций были случайно разделены на две группы: 70 % (91 местоположения оползней) использовались для обучения моделей, а 30 % (39 местоположений оползней) – для проверки достоверности моделей.

Факторы, вызывающие оползни

Разработка карты оползневой восприимчивости зависит от сложной взаимосвязи между образованиями оползней и оползневыми причинными факторами. Переменные, которые способствовали составлению карт оползневой восприимчивости, были выбраны на основе обзора литературы и подробных полевых исследований [44]. Характеристики геоморфологических и орографических условий, типы строения верхней части геологического разреза, рассматриваемые либо совместно, либо раздельно, виды землепользования и описание гидрологических условий формируют основные группы входной информации, необходимой для оценки оползневой восприимчивости [45].

В настоящей работе, исходя из имеющихся данных, особенностей оползней и взаимосвязи между образованием склоновых деформаций и факторами, вызывающими оползни, для составления карт оползневой восприимчивости и потенциального развития оползней были выбраны девять факторов, связанных с оползнями, - высота над уровнем моря, расстояние до дорог, крутизна склонов, расстояние от разломов, среднемесячное количество осадков, вертикальное расчленение рельефа, землепользование, тип коры выветривания, расстояние до эрозионной сети. Карты высоты над уровнем моря, крутизны склонов и вертикального расчленения рельефа были составлены с использованием цифровой модели рельефа (ЦМР) с разрешением 10 м. Расстояние от разломов, расстояние до дорог и расстояние до эрозионной сети были оценены с помощью инструмента Евклидово расстояние в ArcGIS. Карта среднемесячного количества осадков была составлена путем интерполяции данных о количестве осадков с метеорологических станций в провинции Лаокай. Остальные данные были собраны в Институте геологических наук Вьетнамской академии наук и технологий. После этого карты были трансформированы в растровый формат с тем же размером пикселей (разрешение 10×10 м) для расчета весов классов и факторов и создания карт оползневой восприимчивости (рис. 3).

Валидация модели

После подготовки карт оползневой восприимчивости и потенциального развития оползней крайне важно оценить достоверность результатов, полученных по трём моделям. Эта задача выполняется путем сравнения этих карт с картой инвентаризации оползней. С помощью метода ROC [46] точность полученных карт оценивалась по площади под кривой (AUC) рабочей характеристики приемника (ROC). Для данного набора пороговых или предельных значений кривая ROC отображает долю верных положительных результатов (TPR – True Positive Rate), указывающую, что классификатор правильно определяет место оползней, и долю ложно положительных результатов (FPR – False Positive Rate), указывающую, что оползни идентифицируются в местах, где они не существуют. Чувствительность (Se - Sensitivity) и специфичность (Sp - Specificity) обозначаются TPR и 1-FPR, соответственно [47]. Значения АUC для кривых процента успеха и процента прогнозирования были рассчитаны с использованием 70 % (данные обучения) и 30 % (данные проверки) данных от общего количества данных по оползням соответственно.

Результаты исследования и обсуждение

В настоящей работе была проанализирована взаимосвязь между факторами, вызывающими оползни, и фактическим возникновением оползней в районе проводимых исследований. Соотношения частотностей и значения веса были определены с использованием моделей FR, LSA и SI, соответственно (табл. 1). Для рассматриваемой территории значения LSI при подготовке карт индекса оползневой восприимчивости были рассчитаны по уравнениям (2), (4) и (6). Значения LSI варьировали от 11,3 до 98,9 (FR), от -15,2 до 34,9 (LSA) и от -58,7 до 19,4 (SI). После этого были получены карты потенциального развития оползней на основе значений LSI с использованием метода классификации естественных границ в ArcGIS. Район исследования был разделен на пять зон по потенциалу развития оползней: очень низкая, низкая, средняя, высокая и очень высокая.

Результат анализа FR показал, что зоны с очень низким, низким, средним, высоким и очень высоким потенциалом развития оползней составляют: 21,02; 22,26; 20,39; 16,36 и 19,97 % площади изученной территории, соответственно. В результате анализа LSA оценка показала, что 25,01; 20,95; 17,16; 19,52 и 17,37 % площади района исследования находится в зонах очень низкого, низкого, среднего, высокого и очень высокого потенциала развития оползней, соответственно. По результатам анализа SI зоны очень низкого, низкого, среднего, высокого и очень высокого потенциала развития оползней составляют: 19,26; 18,54; 24,14; 19,33 и 18,73 % площади территории работ (табл. 2).



Рис. 3. Карты факторов: а) высоты над уровнем моря; b) расстояния до дорог; c) крутизны склонов; d) расстояния от разломов; e) количества осадков; f) вертикального расчленения рельефа; g) землепользования; h) типа кор выветривания; i) расстояния до эрозионной сети

Fig. 3. Maps of factors: a) elevation; b)distance to roads; c) slope; d) distance to faults; e) precipitation; f) relative relief; g) land use; h) crust weathering; i) distance to drainage

Таблица 1. Анализ связи между факторами, вызывающими оползни, и распределением оползней с использованием моделей FR, LSA и SI

Table 1.	Analysis of the	relation	between	landslide	causative	factors	and	landslide	distribution	using	FR,	LSA,	and SI
	models												

Фактор Factor	Класс Class	площадь класса class area	ощадь lacca landslide area		W _{LSA}	W _{SI}	
	Chast	%					
	<800	9,69	31,03	3,2	2,45	1,16	
	800-1100	13,19	30,92	2,34	1,5	0,85	
Высота над уровнем моря, м	1100-1400	22,43	11,86	0,53	-0,52	-0,64	
Elevation, m	1400-1700	23,83	15,45	0,65	-0,39	-0,43	
	1700-2000	16,61	10,47	0,63	-0,41	-0,46	
	>2000	14,26	0,27	0,02	-1,09	-3,98	
	0-200	30,78	74,23	2,41	1,57	0,88	
~	200-400	14,33	7,3	0,51	-0,55	-0,67	
Расстояние до дорог, м	400-600	9,04	1,78	0,2	-0,89	-1,62	
Distance to roads, m	600-800	6,52	2,77	0,42	-0,64	-0,86	
	800-1000	4,95	1,13	0,23	-0,86	-1,48	
	> 1000	34,38	12,79	0,37	-0,/	-0,99	
	0-10	4,41	11,29	2,56	1,/3	0,94	
10	10-20	14,34	15,61	1,09	0,1	0,09	
Крутизна склонов, град.	20-30	29,01	25,39	0,88	-0,14	-0,13	
Stope, deg.	30-40	33,37	29,83	0,89	-0,12	-0,11	
	40-48	13,19	11,6	0,88	-0,13	-0,13	
	>48	5,69	6,28	1,1	0,12	0,1	
	0-1000	32,12	32,8	1,04	0,72	0,5	
P	1000-2000	20,72	8,88	0,43	-0,64	-0,85	
Расстояние от разломов, м	2000-3500	17,45	9,72	0,50	-0,49	-0,58	
Distance to faults, m	5000-5000	12,12	12,0/	1,05	0,05	0,04	
	> 7000	5.69	8,47	0,71	-0,32	-0,34	
	>/000	5,08	7,45	1,31	0,35	0,27	
	240-280	11,94	8,0	0,72	-0,51	-0,33	
	200-320	16,31	7,94	0,40	-0,38	-0,75	
Average monthly precipitation mm	360,400	13,23	20,37	1,55	0,39	0,5	
Average monumy precipitation, min	400 440	24,00	19.12	1,20	0,31	0,24	
	400-440	15.27	13,13	0.85	0,14	0,12	
	<340	0.80	18.26	1.86	-0,10	-0,10	
	340-430	9,80	20.87	1,00	0,90	0,02	
Beptukati uoo pacutououuo patu $aba w/kw^2$	430-520	28.93	37.61	1,05	0,00	0.26	
Relative relief m/km ²	520-610	20,95	15.6	0.7	-0.33	-0.36	
Relative feller, likkli	610-700	12.88	3.38	0.26	-0.82	-1.34	
	700-990	6.31	4.28	0.68	-0.36	-0.39	
	Вола/Water	0.24	0	0	-1.11	-2.89	
	Лес/Forest	80.72	59.9	0.74	-0.29	-0.3	
	Трава/Grass	0.12	0.2	1.67	0.7	0.49	
	Сельское хозяйство	0.44	5.00	0.62	0.40	0.47	
2	Agriculture	8,44	5,28	0,63	-0,42	-0,47	
Land use	Кустарник Shrub	7,73	24,46	3,16	2,41	1,15	
	Площадь застройки Build area	2,7	10,16	3,76	3,07	1,33	
	Голая земля Bare land	0,05	0	0	-1,11	-1,22	
	Caпролит Saprolite	2,6	0	0	-1,11	-5,28	
	Сиалит/Sialite	8,26	2,42	0,29	-0,79	-1,23	
Kopa выветривания Weathering crust	Сиалферит Sialferite	62,62	86,87	1,39	0,43	0,33	
	Феросиалит Ferosialite	26,52	10,71	0,4	-0,66	-0,91	
	0-200	28,02	50,7	1,81	0,9	0,59	
	200-400	22,99	24,59	1,07	0,08	0,07	
Расстояния до эрозионной сети, м	400-600	19,11	14,87	0,78	-0,25	-0,25	
Distance to drainage, m	600-800	14,32	5,67	0,4	-0,67	-0,93	
	800-1100	11,84	2,85	0,24	-0,85	-1,43	
	>1100	3.73	1.33	0.36	-0.72	-1.03	



Рис. 4. Карта оползневой восприимчивости (а), карта потенциального развития оползней (b) с применением метода соотношения частотностей





Рис. 5. Карта оползневой восприимчивости (а), карта потенциального развития оползней (b) с применением метода анализа оползневой восприимчивости

Fig. 5. Landslide susceptibility map (a), landslide potential map (b) using Landslide susceptibility analysis method



Рис. 6. Карта оползневой восприимчивости (а), карта потенциального развития оползней (b) с применением метода статистического индекса

Mетод Method	Класс/Class	Класс/Class		Низкая Low	Средняя Moderate	Высокая High	Очень высокая Very high
	Площадь класса/Class	area, %	21,02	22,26	20,39	16,36	19,97
FR	Площадь оползня	Обучение Training	3,17	3,78	13,47	13,02	66,56
	Landslide area, %	Проверка Testing	0	5,80	10,57	10,39	73,24
Площадь класса/Class		area, %	25,01	20,95	17,16	19,52	17,37
LSA	Площадь оползня Landslide area, %	Обучение Training	2,98	9,07	6,20	13,47	68,28
		Проверка Testing	4,12	5,72	1,82	17,46	70,87
	Площадь класса/Class	area, %	19,26	18,54	24,14	19,33	18,73
SI	Площадь оползня	Обучение Training	0,48	3,36	15,49	13,43	67,23
	Landslide area, %	Проверка Testing	0	3,06	11,88	12,83	72,22

 Таблица 2. Статистика распределения оползней по классам потенциального развития оползней

 Table 2.
 Statistics of landslide distribution in landslide potential classes

Зоны с высоким и очень высоким потенциалом развития оползней, определенные методами FR и LSA, в основном распределены в коммунах Чунгчай, Хаутхао, г. Шапа, Лаочай, Шупан, Тханьфу, на севере коммун Банхо и Намшай. Северные и южные районы исследования являются зонами с низким и очень низким потенциалом развития оползней. Согласно оценке по методу SI, в пределах территории работ наблюдается увеличение зон высокого и очень высокого потенциала развития оползней. Зоны низкого и очень низкого потенциала развития оползней расположены в коммунах Тазянгфинь, Банхоанг, Таван, Шапа и на юго-западе района исследования. Достоверность моделей для данных обучения составляет: 74,60 % (FR), 70,82 % (LSA) и 76,36 % (SI). Процент прогнозирования моделей для данных проверки составляет: 77,01 % (FR), 74,36 % (LSA) и 78,11 % (SI). Необходимо отметить, что для всех использованных моделей была получена достаточно высокая величина достоверности результатов, превышающая 75 %. Вместе с тем значение AUC показало, что метод SI даёт лучшую точность для картирования оползневой восприимчивости и потенциала развития оползней в районе исследования.

Территории распространения (зоны распределения) кор выветривания сиалферита и феросиалита имеют высокий и очень высокий потенциал развития оползней. Оползни чаще встречаются в сельскохозяйственных районах и жилых районах. Кроме того, развитие дорожной сети в районе исследования приводит к увеличению потенциала их развития. Сочетание земляных работ на склонах и большого количества осадков увеличивает опасность возникновения оползня на рассматриваемой территории.



Рис. 7. График, иллюстрирующий достоверность (a) и прогнозирование (b) моделей FR, LSA и SI по ROC Fig. 7. Success (a) and prediction (b) curve of FR, LSA and SI models by ROC curve

Заключение

Оценка оползневой опасности является важнейшим компонентом национальной стратегии предотвращения и уменьшения последствий стихийных бедствий во Вьетнаме. Районирование территории по потенциалу развития оползневого процесса является основой для оценки оползневой опасности связанных с этим рисков и проектирования систем раннего предупреждения. Исходя из этой идеи, был выполнен анализ потенциала развития оползневого процесса в районе Шапа, на северо-западе Вьетнама. Для составления карт оползневой восприимчивости и карт потенциала развития оползней были использованы три статистические модели (на основе ГИС), позволившие определить значимость каждого параметра, влияющего на развитие оползневых процессов. В дальнейшем оценка восприимчивости и потенциала развития оползней была произведена путем агрегирования результата анализа выбранных факторов с использованием пространственных аналитических уравнений. Район исследования

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Tiranti D., Cremonini R. Editorial: landslide hazard in a changing environment // Frontiers in Earth Science. – 2019. – V. 7. – Iss. 3. URL: https://doi.org/10.3389/feart.2019.00003 (дата обращения 15.02.2022).
- Mandal S., Mondal S. Statistical approaches for landslide susceptibility assessment and prediction. – Switzerland: Springer International Publishing, 2019. – 200 p.
- Landslide susceptibility mapping based on the combination of bivariate statistics and modified analytic hierarchy process methods: a case study of Tinh Tuc Town, Nguyen Binh District, Cao Bang Province, Vietnam / N.T. Kien, T.V. Tran, V.T.H. Lien, P.L.H. Linh, N.Q. Thanh // Journal of Disaster Researslide – 2021. – V. 16. – Iss. 4. – P. 521–528. URL: https://doi.org/10.20965/jdr.2021.p0521 (дата обращения 15.02.2022).
- The human cost of global warming: deadly landslides and their triggers (1995–2014) / U. Haque, P.F. da Silva, G. Devoli, J. Pilz, B. Zhao, A. Khaloua, W. Wilopo, P. Andersen, P. Lu, J. Lee, T. Yamamoto, D. Keellings, J.-H. Wu, G.E. Glass // Science of The Total Environment. – 2019. – V. 682. – P. 673–684. URL: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.415 (дата обращения 15.02.2022).

был разделен на пять зон по степени потенциального развития оползней: очень низкая, низкая, средняя, высокая и очень высокая. Достоверность полученных моделей была оценена с применением AUC ROC (площадь под кривой ошибок) анализа, который показал высокую результативность всех трех используемых моделей, при этом наиболее точные результаты были получены с помощью SI модели. Результаты проведенных исследований крайне важны для оценки оползневой опасности и рисков, планирования устойчивого землепользования и уменьшения ущерба от оползней на рассматриваемой территории. Благодаря высокой производительности использованные модели могут быть применены для оценки потенциала развития оползней в различных регионах Вьетнама.

Исследование профинансировано Институтом геологических наук Вьетнамской академии наук и технологий в рамках национального научно-технического проекта, грант № ФТФL.CN-81/21.

- Froude M.J., Petley D.N. Global fatal landslide occurrence 2004 to 2016 // Natural Hazards and Earth System Sciences. – 2018. – V. 18. – Iss. 8. – P. 2161–2181. URL: https://doi.org/10.5194/ nhess-18-2161-2018 (дата обращения 15.02.2022).
- Spatial prediction of rainfall-induced landslides for the Lao Cai area (Vietnam) using a hybrid intelligent approach of least squares support vector machines inference model and artificial bee colony optimization / D. Tien Bui, T.A. Tuan, N.-D. Hoang, N.Q. Thanh, D.B. Nguyen, N. Van Liem, B. Pradhan // Landslides. – 2017. – V. 14. – Iss. 2. – P. 447–458. URL: https://doi.org/10.1007/ s10346-016-0711-9 (дата обращения 15.02.2022).
- Le T., Kawagoe S. Impact of the landslide for a relationship between rainfall condition and land cover in North Vietnam // Journal of Geological Resource and Engineering. – 2018. – V. 6. – P. 239–250. URL: https://doi.org/10.17265/2328-2193/2018.06.002 (дата обращения 15.02.2022).
- Rainfall-induced catastrophic landslide in Quang Tri Province: the deadliest single landslide event in Vietnam in 2020 / P. Van Tien, L.H. Luong, D.M. Duc, P.T. Trinh, D.T. Quynh, N.C. Lan, D.T. Thuy, N.Q. Phi, T.Q. Cuong, K. Dang, D.H. Loi // Landslides. – 2021. – V. 18. – Iss. 6. – P. 2323–2327. URL: https://doi.org/ 10.1007/s10346-021-01664-y (датаобращения 15.02.2022).

- Physical and anthropogenic factors related to landslide activity in the Northern Peloponnese, Greece / H.D. Skilodimou, G.D. Bathrellos, E. Koskeridou, K. Soukis, D. Rozos // Land. – 2018. – V. 7. – Iss. 3. URL: https://doi.org/10.3390/land7030085 (дата обращения 15.02.2022).
- Shano L., Raghuvanshi T.K., Meten M. Landslide susceptibility evaluation and hazard zonation techniques–a review // Geoenvironmental Disasters. – 2020. – V. 7. – Iss. 1. URL: https://doi.org/10.1186/s40677-020-00152-0 (дата обращения 15.02.2022).
- Probabilistic landslide hazard assessment at the basin scale / F. Guzzetti, P. Reichenbach, M. Cardinali, M. Galli, F. Ardizzone // Geomorphology. – 2005. – V. 72. – Iss. 1. – Р. 272–299. URL: https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.06.002 (дата обращения 15.02.2022).
- A review of statistically-based landslide susceptibility models / P. Reichenbach, M. Rossi, B.D. Malamud, M. Mihir, F. Guzzetti // Earth-Science Reviews. – 2018. – V. 180. – P. 60–91. URL: https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.03.001 (дата обращения 15.02.2022).
- Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning / R. Fell, J. Corominas, C. Bonnard, L. Cascini, E. Leroi, W. Z. Savage // Engineering Geology. – 2008. – V. 102. – Iss. 3. – P. 85–98. URL: https://doi.org/10.1016/j.enggeo. 2008.03.022 (дата обращения 15.02.2022).
- McColl S.T. Chapter 2. Landslide causes and triggers // Landslide hazards, risks and disasters / Eds. J.F. Shroder, T. Davies. – Boston: Academic Press, 2015. – P. 17–42. URL: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-396452-6.00002-1 (дата обращения 15.02.2022).
- Nefeslioglu H.A., Duman T.Y., Durmaz S. Landslide susceptibility mapping for a part of tectonic Kelkit Valley (Eastern Black Sea region of Turkey) // Geomorphology. – 2008. – V. 94. – Iss. 3. – P. 401–418. URL: https://doi.org/10.1016/j.geomorph. 2006.10.036 (дата обращения 15.02.2022).
- GIS-based landslide susceptibility mapping for land use planning and risk assessment / A. Roccati, G. Paliaga, F. Luino, F. Faccini, L. Turconi // Land. – 2021. – V. 10. – Iss. 2. URL: https:// doi.org/10.3390/land10020162 (дата обращения 15.02.2022).
- Van Westen C.J., Van Asch T.W.J., Soeters R. Landslide hazard and risk zonation – why is it still so difficult? // Bulletin of engineering geology and the environment. – 2006. – V. 65. – Iss. 2. – P. 167–184. URL: https://doi.org/10.1007/s10064-005-0023-0 (дата обращения 15.02.2022).
- Developing a landslide susceptibility map using the analytic hierarchical process in Ta Van and Hau Thao Communes, Sapa, Vietnam / T.T.T. Le, T.V. Tran, V.H. Hoang, V.T. Bui, T.K.T. Bui, H.P. Nguyen // Journal of Disaster Researslide – 2021. – V. 16. – Iss. 4. – P. 529–538. URL: https://doi.org/10.20965/jdr.2021.p0529 (дата обращения 15.02.2022).
- GIS based frequency ratio method for landslide susceptibility mapping at Da Lat City, Lam Dong province, Vietnam / D.Q. Thanh, D.H. Nguyen, I. Prakash, A. Jaafari, V.T. Nguyen, T.V. Phong, B.T. Pham // Vietnam Journal of Earth Sciences. – 2020. – V. 42. – Iss. 1. – P. 55–66. URL: https://doi.org/10.15625/ 0866-7187/42/1/14758 (дата обращения 15.02.2022).
- Landslide susceptibility modeling using different artificial intelligence methods: a case study at Muong Lay district, Vietnam / T.V. Phong, T.T. Phan, I. Prakash, S.K Singh., A. Shirzadi, K. Chapi, H.-B. Ly, L.S. Ho, N.K. Quoc, B.T. Pham // Geocarto International. – 2021. – V. 36. – Iss. 15. – Р. 1685–1708. URL: https://doi.org/10.1080/10106049.2019.1665715 (дата обращения 15.02.2022).
- Региональная оценка оползневой опасности модифицированным методом анализа иерархий в геоинформационной системе (на примере района Шапа провинции Лаокай Вьетнама) / В.Б. Зыонг, И.К. Фоменко, Х.Д. Ву, Т.Х. Нгуен, О.Н. Сироткина // Инженерная геология. – 2021. – Т. XVI. – № 2. – С. 6–20. URL: https://doi.org/10.25296/1993-5056-2021-16-2-6-20 (дата обращения 15.02.2022).
- 22. Spatial prediction of landslides along National Highway-6, Hoa Binh province, Vietnam using novel hybrid models / H.T. Hang, H. Tung, P.D. Hoa, N.V. Phuong, T.V. Phong, R. Costache, H.D. Nguyen, M. Amiri, H.-A. Le, H.V. Le, I. Prakash, B.T. Pham // Geocarto International. – 2021. URL: https://doi.org/10.1080/ 10106049.2021.1912195 (дата обращения 15.02.2022).

- Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy / F. Guzzetti, A. Carrara, M. Cardinali, P. Reichenbach // Geomorphology. – 1999. – V. 31. – I. 1. – P. 181–216. URL: https://doi.org/10.1016/ S0169-555X(99)00078-1 (дата обращения 15.02.2022).
- Gaidzik K., Ramírez-Herrera M.T. The importance of input data on landslide susceptibility mapping // Scientific Reports. – 2021. – V. 11. – Iss. 1. URL: https://doi.org/10.1038/s41598-021-98830-y (дата обращения 15.02.2022).
- Mersha T., Meten M.GIS-based landslide susceptibility mapping and assessment using bivariate statistical methods in Simada area, northwestern Ethiopia // Geoenvironmental Disasters. – 2020. – V. 7. – Iss. 1. URL: https://doi.org/10.1186/s40677-020-00155-x (дата обращения 15.02.2022).
- 26. A GIS-based comparative study of frequency ratio, analytical hierarchy process, bivariate statistics and logistics regression methods for landslide susceptibility mapping in Trabzon, NE Turkey / A. Yalcin, S. Reis, A.C. Aydinoglu, T. Yomralioglu // CATENA. – 2011. – V. 85. – I. 3. – P. 274–287. URL: https:// doi.org/10.1016/j.catena.2011.01.014 (дата обращения 15.02.2022).
- Пендин В.В., Фоменко И.К. Методология оценки и прогноза оползневой опасности. – М.: ЛЕНАНД, 2015. – 320 с.
- Assessment of landslide susceptibility using statistical- and artificial intelligence-based FR-RF integrated model and multiresolution DEMs / A. Arabameri, B. Pradhan, K. Rezaei, C.-W. Lee // Remote Sensing. – 2019. – V. 11. – Iss. 9. URL: https://doi.org/10.3390/rs11090999 (дата обращения 15.02.2022).
- Berhane G., Tadesse K. Landslide susceptibility zonation mapping using statistical index and landslide susceptibility analysis methods: a case study from Gindeberet district, Oromia Regional State, Central Ethiopia // Journal of African Earth Sciences. – 2021. – V. 180. URL: https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2021.104240 (дата обращения 15.02.2022).
- 30. Landslides susceptibility assessment based on GIS statistical bivariate analysis in the hills surrounding a metropolitan area / P. Sestraş, Ş. Bilaşco, S. Roşca, S. Naş, M.V. Bondrea, R. Gâlgău, I. Vereş, T. Sălăgean, V. Spalević, S.M. Cîmpeanu // Sustainability. – 2019. – V. 11. – Iss. 5. URL: https://doi.org/ 10.3390/su11051362 (дата обращения 15.02.2022).
- Landslides hazard mapping in Rwanda using bivariate statistical index method / L. Nahayo, C. Mupenzi, G. Habiyaremye, E. Kalisa, M. Udahogora, V. Nzabarinda, L. Li // Environmental Engineering Science. – 2019. – V. 36. – Iss. 8. – Р. 892–902. URL: https://doi.org/10.1089/ees.2018.0493 (дата обращения 15.02.2022).
- 32. Landslide susceptibility zonation mapping using bivariate statistical frequency ratio method and GIS: a case study in part of SH 37 Ghat Road, Nadugani, Panthalur Taluk, The Nilgiris / S.E. Saranaathan, S. Mani, V. Ramesh, S.P. Venkatesh // Journal of the Indian Society of Remote Sensing. 2021. V. 49. Iss. 2. P. 275–291. URL: http://dx.doi.org/10.1007/s12524-020-01207-3 (дата обращения 15.02.2022).
- Naranjo J., Westen C.J., Soeters R. Evaluating the use of training areas in bivariate statistical landslide hazard analysis – a case study in Colombia // ITC Journal. – 1994. – Iss. 3. – P. 292–300. URL: https://filetransfer.itc.nl/pub/westen/PDF_files/1994% 20ITC%20Journal%20Naranjo%20et%20al.pdf (дата обращения 15.02.2022).
- 34.Developing recognition and simple mapping by UAV/SfM for local resident in mountainous area in Vietnam –a case study in Po Xi Ngai Community, Laocai Province / N.K. Thanh, T. Miyagi, S. Isurugi, D. van Tien, L.H. Luong, D.N. Ha / Understanding and reducing landslide disaster risk. V. 2. From mapping to hazard and risk zonation / Eds. F. Guzzetti, A.S. Mihalić et al. WLF 2020. – Cham: Springer International Publ., 2021. – P. 103–109. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-60227-7_10 (дата обращения 15.02.2022).
- 35. Modelling and mapping natural hazard regulating ecosystem services in Sapa, Lao Cai province, Vietnam / K.B. Dang, B. Burkhard, F. Müller, V.B. Dang // Paddy and Water Environment. – 2018. – V. 16. – Iss. 4. – Р. 767–781. URL: https://doi.org/10.1007/s10333-018-0667-6 (дата обращения 15.02.2022).
- Lee S., Pradhan B.Probabilistic landslide hazards and risk mapping on Penang Island, Malaysia // Journal of Earth System Science. – 2006. – V. 115. – Iss. 6. – P. 661–672. URL:

https://doi.org/10.1007/s12040-006-0004-0 (дата обращения 15.02.2022).

- 37. Kose D.D., Turk T.GIS-based fully automatic landslide susceptibility analysis by weight-of-evidence and frequency ratio methods // Physical Geography. 2019. V. 40. Iss. 5. P. 481–501. URL: https://doi.org/10.1080/02723646.2018.1559583 (дата обращения 15.02.2022).
- Oh H.-J., Lee S., Hong S.-M. Landslide susceptibility assessment using frequency ratio technique with iterative random sampling // Journal of Sensors. – 2017. – V. 2017. URL: https://doi.org/ 10.1155/2017/3730913 (дата обращения 15.02.2022).
- Süzen M.L., Doyuran V. A comparison of the GIS based landslide susceptibility assessment methods: multivariate versus bivariate // Environmental Geology. – 2004. – V. 45. – Iss. 5. – Р. 665–679. URL: https://doi.org/10.1007/s00254-003-0917-8 (дата обращения 15.02.2022).
- Van Westen C.J. Statistical landslide susceptibility analysis. ILWIS 2.1 for Windows application guide. – Enschede: ITC Publ., 1997. – P. 73–84.
- Long N.T., De Smedt F. Analysis and mapping of rainfall-induced landslide susceptibility in a Luoi District, Thua Thien Hue Province, Vietnam // Water. – 2019. – V. 11. – Iss. 1. URL: https://doi.org/10.3390/w11010051 (дата обращения 15.02.2022).
- 42. Landslide inventory mapping from bitemporal images using deep convolutional neural networks / T. Lei, Y. Zhang, Z. Lv, S. Li, S. Liu, A.K. Nandi // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. – 2019. – V. 16. – Iss. 6. – Р. 982–986. URL: http:// doi.org/10.1109/LGRS.2018.2889307 (дата обращения 15.02.2022).

- Deep convolutional neural network-based pixel-wise landslide inventory mapping / Z. Su, J.K. Chow, P.S. Tan, J. Wu, Y.K. Ho, Y.-H. Wang // Landslides. – 2021. – V. 18. – Iss. 4. – Р. 1421–1443. URL: https://doi.org/10.1007/s10346-020-01557-6 (дата обращения 15.02.2022).
- 44. Getachew N., Meten M. Weights of evidence modeling for landslide susceptibility mapping of Kabi-Gebro locality, Gundomeskel area, Central Ethiopia // Geoenvironmental Disasters. – 2021. – V. 8. – Iss. 1. URL: https://doi.org/10.1186/ s40677-021-00177-z (дата обращения 15.02.2022).
- 45. Soeters R., Van Westen C.J. Slope instability recognition analysis and zonation // Landslides, investigation and mitigation. Special report (National Research Council (U.S.). Transportation Research Board) /Eds. A.K. Turner, R.L. Schuster. – Washington, D.C.: National Academy Press, 1996. – P. 129–177. URL: https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/sr/sr247/sr247.pdf (дата обращения 15.02.2022).
- 46. Swets J.A. Measuring the accuracy of diagnostic systems // Science. – 1988. – V. 240. – Iss. 4857. – Р. 1285–1293. URL: http://dx.doi.org/10.1126/science.3287615 (дата обращения 15.02.2022).
- 47. A ROC analysis-based classification method for landslide susceptibility maps / I. Cantarino, M.A. Carrion, F. Goerlich, V. Martinez Ibañez // Landslides. – 2019. – V. 16. – I. 2. – Р. 265–282. URL: https://doi.org/10.1007/s10346-018-1063-4 (дата обращения 15.02.2022).

Поступила 25.03.2022 г.

Информация об авторах

Зыонг Ван Бинь, преподаватель кафедры инженерной геологии факультета наук о Земле и геологической инженерии Ханойского горно-геологического университета; аспирант кафедры инженерной геологии Гидрогеологического факультета Российского государственного геологоразведочного университета им. Серго Орджоникидзе.

Фоменко И.К., доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры инженерной геологии Гидрогеологического факультета Российского государственного геологоразведочного университета им. Серго Орджоникидзе.

Нгуен Чунг Киен, старший научный сотрудник отдела развития технологий и экологической инженерии института геологических наук Вьетнамской академии наук и технологий.

Ви Тхи Хонг Лиен, старший научный сотрудник отдела развития технологий и экологической инженерии института геологических наук Вьетнамской академии наук и технологий.

Зеркаль О.В., кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией инженерной геодинамики и обоснования инженерной защиты территорий, ведущий научный сотрудник кафедры инженерной и экологической геологии Геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова.

Ву Хонг Данг, научный сотрудник отдела гидрогеологии и инженерной геологии Вьетнамского института геонаук и минеральных ресурсов.

UDC 551.435.627

APPLICATION OF GIS-BASED BIVARIATE STATISTICAL METHODS FOR LANDSLIDE POTENTIAL ASSESSMENT IN SAPA, VIETNAM

Van B. Duong^{1,2},

duongvanbinh@humg.edu.vn

Igor K. Fomenko², ifolga@gmail.com

Trung K. Nguyen³, kien.mgri@gmail.com

ThiHong L. Vi³, vyhonglien2003@yahoo.com

Oleg V. Zerkal⁴, igzov@mail.ru

Hong D. Vu⁵,

hongdangbg@gmail.com

- ¹ Hanoi University of Mining and Geology, 18, Vien street, Hanoi, 100000, Vietnam.
- ² Ordzhonikidze Russian State Geological Prospecting University, 23, Miklukho-Maklay street, Moscow, 117997, Russia.
- ³ Institute of Geological Sciences, Vietnam Academy of Science and Technology, 84, Chua Lang street, Hanoi, 100000, Vietnam.
- ⁴ Lomonosov Moscow State University,
 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia.
- ⁵ Vietnam Institute of Geosciences and Mineral Resources, 67, Chien Thang street, Hanoi, 100000, Vietnam.

The relevance. Predicting and minimizing the impact of natural disasters are critical tasks for governments worldwide, including Vietnam. Landslides are one of the most frequent types of natural disasters in Vietnam, especially in the northern mountainous provinces, resulting in significant loss of life and property. In this study, the GIS-based bivariate statistical methods were applied for assessing landslide potential in Sapa district, Laocai province, Vietnam. For assessing landslide susceptibility, nine landslide-related factors were selected, including elevation, distance to roads, slope, distance to faults, average monthly precipitation, relative relief, land use, crust weathering, and distance to drainage.

The main aim of this study is to prepare landslide potential maps for the study area. In addition, the study also demonstrated the effectiveness of bivariate statistical methods for landslide susceptibility assessment.

Object of the study is the landslide susceptibility in Sapa district, Laocai province, Vietnam.

Methods: GIS-based bivariate statistical methods including frequency ratio, landslide susceptibility analysis, and statistical index.

Results. Landslide potential maps were prepared using GIS-based bivariate statistical methods. The study area is divided into five landslide potential zones: very low, low, moderate, high, and very high. The area under the curve of the receiver operating characteristic (AUCROC) was used to evaluate the performance of these models. The success rates of the models for the training data are 74,60 % frequency ratio, 70,82 % landslide susceptibility analysis and 76,36 % statistical index. The prediction rates of the models for the testing data are 77,01 % frequency ratio, 74,36 % landslide susceptibility analysis and 78,11 % statistical index. The performance evaluation of the models revealed that all three techniques are efficient in assessing landslide potential in the study area. Study results are critical for land use planning and economic development, as well as minimizing landslide-related damage.

Key words:

Landslide susceptibility, landslide potential, frequency ratio, landslide susceptibility analysis, statistical index, GIS, Sapa, Vietnam.

The research was financed by the Institute of Geological Sciences of Vietnam Academy of Sciences and Technologies within the national development project, grant no. DTDL.CN-81/21.

REFERENCES

- Tiranti D., Cremonini R. Editorial: landslide hazard in a changing environment. *Frontiers in Earth Science*, 2019, vol. 7, Iss. 3. Available at: https://doi.org/10.3389/feart.2019.00003 (accessed 15 February 2022).
- Mandal S., Mondal S. Statistical approaches for landslide susceptibility assessment and prediction. Switzerland, Springer International Publ., 2019. 200 p.
- 3. Kien N.T., Tran T.V., Lien V.T.H., Linh P.L.H., Thanh N.Q. Landslide susceptibility mapping based on the combination of

bivariate statistics and modified analytic hierarchy process methods: a case study of Tinh Tuc Town, Nguyen Binh District, Cao Bang Province, Vietnam. *Journal of Disaster Research*, 2021, vol. 16, Iss. 4, pp. 521–528. Available at: https://doi.org/ 10.20965/jdr.2021.p0521 (accessed 15 February 2022).

- Haque U., Da Silva P.F., Devoli G., Pilz J., Zhao B., Khaloua A., Wilopo W., Andersen P., Lu P., Lee J., Yamamoto T., Keellings D., Wu J.-H., Glass G.E. The human cost of global warming: Deadly landslides and their triggers (1995–2014). *Science of The Total Environment*, 2019, vol. 682, pp. 673–684. Available at: https:// doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.415 (accessed 15 February 2022).
- Froude M. J., Petley D.N. Global fatal landslide occurrence 2004 to 2016. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2018, vol. 18, Iss. 8, pp. 2161–2181. Available at: https://doi.org/10.5194/nhess-18-2161-2018 (accessed 15 February 2022).
- Tien Bui D., Tuan T.A., Hoang N.-D., Thanh N.Q., Nguyen D.B., Van Liem N., Pradhan B. Spatial prediction of rainfall-induced landslides for the Lao Cai area (Vietnam) using a hybrid intelligent approach of least squares support vector machines inference model and artificial bee colony optimization. *Landslides*, 2017, vol. 14, Iss. 2, pp. 447–458. Available at: https://doi.org/10.1007/s10346-016-0711-9 (accessed 15 February 2022).
- Le T., Kawagoe S. Impact of the landslide for a relationship between rainfall condition and land cover in North Vietnam. *Journal of Geological Resource and Engineering*, 2018, vol. 6, pp. 239–250. Available at: https://doi.org/10.17265/2328-2193/2018.06.002 (accessed 15 February 2022).
- Van Tien P., Luong L.H., Duc D.M., Trinh P.T., Quynh D.T., Lan N.C., Thuy D.T., Phi N.Q., Cuong T.Q., Dang K., Loi D.H. Rainfall-induced catastrophic landslide in Quang Tri Province: the deadliest single landslide event in Vietnam in 2020. *Landslides*, 2021, vol. 18, Iss. 6, pp. 2323–2327. Available at: https:// doi.org/10.1007/s10346-021-01664-y (accessed 15 February 2022).
- Skilodimou H.D., Bathrellos G.D., Koskeridou E., Soukis K., Rozos D. Physical and anthropogenic factors related to landslide activity in the Northern Peloponnese, Greece. *Land*, 2018, vol. 7, Iss. 3. Available at: https://doi.org/10.3390/land7030085 (accessed 15 February 2022).
- Shano L., Raghuvanshi T.K., Meten M. Landslide susceptibility evaluation and hazard zonation techniques–a review. *Geoenvironmental Disasters*, 2020, vol. 7, Iss. 1, pp. 18. Available at: https://doi.org/10.1186/s40677-020-00152-0 (accessed 15 February 2022).
- Guzzetti F., Reichenbach P., Cardinali M., Galli M., Ardizzone F. Probabilistic landslide hazard assessment at the basin scale. *Geomorphology*, 2005, vol. 72, Iss. 1, pp. 272–299. Available at: https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.06.002 (accessed 15 February 2022).
- Reichenbach P., Rossi M., Malamud B.D., Mihir M., Guzzetti F. A review of statistically-based landslide susceptibility models. *Earth-Science Reviews*, 2018, vol. 180, pp. 60–91. Available at: https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.03.001 (accessed 15 February 2022).
- Fell R., Corominas J., Bonnard C., Cascini L., Leroi E., Savage W.Z. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. *Engineering Geology*, 2008, vol. 102, Iss. 3, pp. 85–98. Available at: https://doi.org/10.1016/ j.enggeo.2008.03.022 (accessed 15 February 2022).
- McColl S.T. Chapter 2. Landslide causes and triggers. Landslide hazards, risks and disasters. Eds. J.F. Shroder, T. Davies. Boston, Academic Press Publ., 2015. pp. 17–42. Available at: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-396452-6.00002-1 (accessed 15 February 2022).
- Nefeslioglu H.A., Duman T.Y., Durmaz S. Landslide susceptibility mapping for a part of tectonic Kelkit Valley (Eastern Black Sea region of Turkey). *Geomorphology*, 2008, vol. 94, Iss. 3, pp. 401–418. Available at: https://doi.org/10.1016/ j.geomorph.2006.10.036 (accessed 15 February 2022).
- Roccati A., Paliaga G., Luino F., Faccini F., Turconi L. GIS-based landslide susceptibility mapping for land use planning and risk assessment. *Land*, 2021, vol. 10, Iss. 2. Available at: https://doi.org/10.3390/land10020162 (accessed 15 February 2022).
- 17. Van Westen C.J., Van Asch T.W.J., Soeters R. Landslide hazard and risk zonation - why is it still so difficult? *Bulletin of*

engineering geology and the environment, 2006, vol. 65, Iss. 2, pp. 167–184. Available at: https://doi.org/10.1007/s10064-005-0023-0 (accessed 15 February 2022).

- Le T.T.T., Tran T.V., Hoang V.H., Bui V.T., Bui T.K.T., Nguyen H.P. Developing a landslide susceptibility map using the analytic hierarchical process in Ta Van and Hau Thao Communes, Sapa, Vietnam. *Journal of Disaster Research*, 2021, vol. 16, Iss. 4, pp. 529–538. Available at: https://doi.org/10.20965/jdr.2021.p0529 (accessed 15 February 2022).
- Thanh D.Q., Nguyen D.H., Prakash I., Jaafari A., Nguyen V.T., Phong T.V., Pham B.T. GIS based frequency ratio method for landslide susceptibility mapping at Da Lat City, Lam Dong province, Vietnam. *Vietnam Journal of Earth Sciences*, 2020, vol. 42, Iss. 1, pp. 55–66. Available at: https://doi.org/10.15625/ 0866-7187/42/1/14758 (accessed 15 February 2022).
- Phong T.V., Phan T.T., Prakash I., Singh S.K., Shirzadi A., Chapi K., Ly H.-B., Ho L.S., Quoc N.K., Pham B.T. Landslide susceptibility modeling using different artificial intelligence methods: a case study at Muong Lay district, Vietnam. *Geocarto International*, 2021, vol. 36, Iss. 15, pp. 1685–1708. Available at: https://doi.org/ 10.1080/10106049.2019.1665715 (accessed 15 February 2022).
- 21. Duong V.B., Fomenko I.K., Vu H.D., Nguyen T.H., Sirotkina O.N. Regional assessment of landslide hazard using modified analytic hierarchies process method in geoinformation system (a study of the Sa Pa District, Lao Cai Province, Vietnam). *Engineering Geology World*, 2021, vol. XVI, no. 2, pp. 6–20. In Rus. Available at: https://doi.org/10.25296/1993-5056-2021-16-2-6-20 (accessed 15 February 2022).
- 22. Hang H.T., Tung H., Hoa P.D., Phuong N.V., Phong T.V., Costache R., Nguyen H.D., Amiri M., Le H.-A., Le H.V., Prakash I., Pham B.T. Spatial prediction of landslides along National Highway-6, Hoa Binh province, Vietnam using novel hybrid models. *Geocarto International*, 2021. Available at: https://doi. org/10.1080/10106049.2021.1912195 (accessed 15 February 2022).
- Guzzetti F., Carrara A., Cardinali M., Reichenbach P. Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology*, 1999, vol. 31, Iss. 1, pp. 181–216. Available at: https://doi.org/ 10.1016/S0169-555X(99)00078-1 (accessed 15 February 2022).
- Gaidzik K., Ramírez-Herrera M.T. The importance of input data on landslide susceptibility mapping. *Scientific Reports*, 2021, vol. 11, Iss. 1. Available at: https://doi.org/10.1038/s41598-021-98830y(accessed 15 February 2022).
- Mersha T., Meten M. GIS-based landslide susceptibility mapping and assessment using bivariate statistical methods in Simada area, northwestern Ethiopia. *Geoenvironmental Disasters*, 2020, vol. 7, Iss. 1. Available at: https://doi.org/10.1186/s40677-020-00155-x (accessed 15 February 2022).
- 26. Yalcin A., Reis S., Aydinoglu A.C., Yomralioglu T. A GIS-based comparative study of frequency ratio, analytical hierarchy process, bivariate statistics and logistics regression methods for landslide susceptibility mapping in Trabzon, NE Turkey. *CATENA*, 2011, vol. 85, Iss. 3, pp. 274–287. Available at: https://doi.org/10.1016/ j.catena.2011.01.014 (accessed 15 February 2022).
- Pendin V.V., Fomenko I.K. Metodologiya otsenki i prognoza opolznevoy opasnosti [Methodology for landslide hazard assessment and prediction]. Moscow, LENAND Publ., 2015. 320 p.
- Arabameri A., Pradhan B., Rezaei K., Lee C.-W. Assessment of landslide susceptibility using statistical- and artificial intelligencebased FR–RF integrated model and multiresolution DEMs. *Remote Sensing*, 2019, vol. 11, Iss. 9. Available at: https://doi.org/ 10.3390/rs11090999 (accessed 15 February 2022).
- Berhane G., Tadesse K. Landslide susceptibility zonation mapping using statistical index and landslide susceptibility analysis methods: a case study from Gindeberet district, Oromia Regional State, Central Ethiopia. *Journal of African Earth Sciences*, 2021, vol. 180. Available at: https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci. 2021.104240 (accessed 15 February 2022).
- Sestraş P., Bilaşco Ş., Roşca S., Naş S., Bondrea M.V., Gâlgău R., Vereş I., Sălăgean T., Spalević V., Cîmpeanu S.M. Landslides susceptibility assessment based on GIS statistical bivariate analysis in the hills surrounding a metropolitan area. *Sustainability*, 2019, vol. 11, Iss. 5. Available at: https://doi.org/10.3390/ su11051362 (accessed 15 February 2022).

- Nahayo L., Mupenzi C., Habiyaremye G., Kalisa E., Udahogora M., Nzabarinda V., Li L. Landslides hazard mapping in Rwanda using bivariate statistical index method. *Environmental Engineering Science*, 2019, vol. 36, Iss. 8, pp. 892–902. Available at: https://doi.org/10.1089/ees.2018.0493 (accessed 15 February 2022).
- 32. Saranaathan S.E., Mani S., Ramesh V., Venkatesh S.P. Landslide susceptibility zonation mapping using bivariate statistical frequency ratio method and GIS: a case study in part of SH 37 Ghat Road, Nadugani, Panthalur Taluk, The Nilgiris. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 2021, vol. 49, Iss. 2, pp. 275–291. Available at: http://dx.doi.org/10.1007/s12524-020-01207-3 (accessed 15 February 2022).
- Naranjo J., Westen C.J., Soeters R. Evaluating the use of training areas in bivariate statistical landslide hazard analysis – a case study in Colombia. *ITC Journal*, 1994, Iss. 3, pp. 292–300. Available at: https://filetransfer.itc.nl/pub/westen/PDF_files/1994% 20ITC%20Journal%20Naranjo%20et%20al.pdf (accessed 15 February 2022).
- 34. Thanh N.K., Miyagi T., Isurugi S., Van Tien D., Luong L.H., Ha D.N. Developing recognition and simple mapping by UAV/SfM for local resident in mountainous area in Vietnam – a case study in Po Xi Ngai Community, Laocai Province. Understanding and reducing landslide disaster risk. Vol. 2. From mapping to hazard and risk zonation. Eds. F. Guzzetti, S. Mihalić Arbanas. WLF 2020. Cham, Springer International Publ., 2021. pp. 103–109. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-030-60227-7_10 (accessed 15 February 2022).
- 35. Dang K.B., Burkhard B., Müller F., Dang V.B. Modelling and mapping natural hazard regulating ecosystem services in Sapa, Lao Cai province, Vietnam. *Paddy and Water Environment*, 2018, vol. 16, Iss. 4, pp. 767–781. Available at: https://doi.org/10.1007/ s10333-018-0667-6 (accessed 15 February 2022).
- Lee S., Pradhan B. Probabilistic landslide hazards and risk mapping on Penang Island, Malaysia. *Journal of Earth System Science*, 2006, vol. 115, Iss. 6, pp. 661–672. Available at: https://doi.org/10.1007/s12040-006-0004-0 (accessed 15 February 2022).
- Kose D.D., Turk T. GIS-based fully automatic landslide susceptibility analysis by weight-of-evidence and frequency ratio methods. *Physical Geography*, 2019, vol. 40, Iss. 5, pp. 481–501. Available at: https://doi.org/10.1080/02723646.2018.1559583 (accessed 15 February 2022).
- Oh H.-J., Lee S., Hong S.-M. Landslide susceptibility assessment using frequency ratio technique with iterative random sampling. *Journal of Sensors*, 2017, vol. 2017. Available at: https://doi.org/10.1155/2017/3730913 (accessed 15 February 2022).

- Süzen M.L., Doyuran V. A comparison of the GIS based landslide susceptibility assessment methods: multivariate versus bivariate. *Environmental Geology*, 2004, vol. 45, Iss. 5, pp. 665–679. Available at: https://doi.org/10.1007/s00254-003-0917-8 (accessed 15 February 2022).
- Van Westen C.J. Statistical landslide susceptibility analysis. *ILWIS* 2.1 for Windows application guide. Enschede, ITC Publ., 1997. pp. 73–84.
- 41. Long N.T., De Smedt F. Analysis and mapping of rainfall-induced landslide susceptibility in a Luoi District, Thua Thien Hue Province, Vietnam. *Water*, 2019, vol. 11, Iss. 1. Available at: https://doi.org/10.3390/w11010051 (accessed 15 February 2022).
- 42. Lei T., Zhang Y., Lv Z., Li S., Liu S., Nandi A.K. Landslide inventory mapping from bitemporal images using deep convolutional neural networks. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2019, vol. 16, Iss. 6, pp. 982–986. Available at: http://doi.org/10.1109/LGRS.2018.2889307 (accessed 15 February 2022).
- Su Z., Chow J.K., Tan P.S., Wu J., Ho Y.K., Wang Y.-H. Deep convolutional neural network–based pixel-wise landslide inventory mapping. *Landslides*, 2021, vol. 18, Iss. 4, pp. 1421–1443. Available at: https://doi.org/10.1007/s10346-020-01557-6 (accessed 15 February 2022).
- 44. Getachew N., Meten M. Weights of evidence modeling for landslide susceptibility mapping of Kabi-Gebro locality, Gundomeskel area, Central Ethiopia. *Geoenvironmental Disasters*, 2021, vol. 8, Iss. 1.Available at: https://doi.org/10.1186/s40677-021-00177-z (accessed 15 February 2022).
- 45. Soeters R., Van Westen C.J. Slope instability recognition analysis and zonation. Landslides, investigation and mitigation. Special report (National Research Council (U.S.). Transportation Research Board). Eds. A.K. Turner, R.L. Schuster. Washington, D.C., National Academy Press Publ., 1996. pp. 129–177. Available at: https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/sr/sr247/sr247.pdf (accessed 15 February 2022).
- 46. Swets J.A. Measuring the accuracy of diagnostic systems. *Science*, 1988, vol. 240, Iss. 4857, pp. 1285–1293. Available at: http://dx.doi.org/10.1126/science.3287615 (accessed 15 February 2022).
- Cantarino I., Carrion M.A., Goerlich F., Martinez Ibañez V. A ROC analysis-based classification method for landslide susceptibility maps. *Landslides*, 2019, vol. 16, Iss. 2, pp. 265–282. Available at: https://doi.org/10.1007/s10346-018-1063-4 (accessed 15 February 2022).

Received: 25 March 2022.

Information about the authors

Van B. Duong, lecturer, Hanoi University of Mining and Geology; postgraduate student, Ordzhonikidze Russian State Geological Prospecting University.

Igor K. Fomenko, Dr. Sc., professor, Ordzhonikidze Russian State Geological Prospecting University.

Trung K. Nguyen, senior researcher, Institute of Geological Sciences, Vietnam Academy of Science and Technology.

Thi Hong L. Vi, senior researcher, Institute of Geological Sciences, Vietnam Academy of Science and Technology. *Oleg V. Zerkal*, Cand. Sc., head of the Laboratory of Engineering Geodynamics and Substantiation of Engineering Protection of Territories and Leading Research Scientist, Lomonosov Moscow State University.

Hong D. Vu, research scientist, Vietnam Institute of Geosciences and Mineral Resources.

УДК 621.18

ЦИФРОВАЯ МОДЕЛЬ ИЗНОСА КОНВЕКТИВНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТЕПЛООБМЕНА ПЫЛЕУГОЛЬНОГО КОТЛА

Тюрина Элина Александровна^{1,2},

tyurina@isem.irk.ru

Медников Александр Станиславович1,

mednikov@isem.irk.ru

- ¹ Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Россия, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130.
- ² Иркутский национальный исследовательский технический университет, Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью использования непроектных углей на действующем оборудовании TЭC. Как известно, использование таких углей может негативно сказаться на работе, в первую очередь, угольного котла. **Цель:** определить межремонтный период, а также скорость низкотемпературной коррозии и абразивного износа конвективных поверхностей (воздухоподогревателя и водяного экономайзера), вызванных использованием различных углей (Азейского, Мугунского, Переясловского и Ирбейского месторождений) и их смесей.

Методы: математическое моделирование и комплексная технико-экономическая оптимизация параметров моделей с применением автоматизированной системы машинного построения программ, которая предназначена для генерации математических моделей исследуемых установок на основании математических моделей отдельно взятых элементов, информации о технологических связях между ними, целях расчета. Данный комплекс разработан в Институте систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН.

Результаты. Для оценки последствий использования непроектного топлива разработана достаточно точная математическая модель парового котла БКЗ-420-140. Проведены исследования на математической модели котла с целью определения оптимальных составов топлива для минимизации эксплуатационных издержек, связанных с изменением топлива, и увеличения межремонтного периода конвективных поверхностей нагрева для повышения надежности работы котельного агрегата. Построены аппроксимационные зависимости скорости низкотемпературной коррозии металла от средней температуры стенки труб и сернистости сжигаемого топлива. Получены технико-экономические показатели работы котлоагрегата на углях Азейского, Мугунского, Переясловского и Ирбейского месторождений, а также на угольных смесях (Азейский уголь (7 %) + Ирбейский уголь (93 %), Азейский уголь (23 %) + Переясловский уголь (77 %), Переясловский уголь (80 %) + Мугунский уголь (20 %), Ирбейский уголь (95 %) + Мугунский уголь (5 %)).

Ключевые слова:

Угольный котел, абразивный износ, низкотемпературная коррозия, непроектный уголь, математическое моделирование, межремонтный период.

Введение

Топливно-энергетический комплекс нашей страны обладает значительными разведанными и прогнозными запасами угля [1]. За последнее десятилетие объем добычи угля вырос в 1,3 раза и превышает 440 млн т в год. За этот период продолжилось развитие Кузнецкого, Канско-Ачинского, Минусинского и Горловского бассейнов, а также новых месторождений в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке [2].

В 2020 г. на угольные ТЭС России для выработки энергии было поставлено около 93 млн т угля, из которых 73,4 млн т – с российских месторождений. Необходимо отметить, что угольная энергетика играет важную роль в экономике России, особенно в восточных регионах страны [2].

Доля топливной составляющей в себестоимости энергии превышает 50 % [3–9]. Истощение запасов проектного топлива, закрытие нерентабельных мест угледобычи, рост цен на привозное топливо – причины, по которым на протяжении нескольких лет на ряде существующих ТЭС возникла необходимость в сжигании непроектных углей [10–13].

Использование на ТЭС непроектных углей может негативно влиять на надежность котельного оборудования, а именно более остро стоят проблемы износа, шлакования и загрязнения поверхностей нагрева, снижения надёжности работы теплообменных поверхностей, изменения межремонтного периода [10, 14].

В настоящее время в данном направлении ведутся исследования как в нашей стране, так и за рубежом, но большинство работ посвящены проблемам шлакования и загрязения поверхностей нагрева [10, 11, 13–21].

В работе [11] представлена оценка влияния физико-химических свойств углей, сжигаемых на тепловых электростанциях Иркутской области, на эксплуатационные характеристики котельных агрегатов. Авторы представили результаты расчетов показателей, определяющих шлакующие и загрязняющие свойства твердых топлив, а также предложили мероприятия, позволяющие уменьшить цикличность очистки поверхностей нагрева котельных агрегатов.

Е.А. Бойко и И.В. Загородний рассмотрели проблемы шлакования и загрязнения поверхностей нагрева БКЗ-420-140 с твердым шлакоудалением Абаканской ТЭЦ. Расчетно-экспериментально определили факторы шлакования поверхностей нагрева котельного агрегата при сжигании углей переменного качества с различными техническими характеристиками и составами минеральной части [10].

П.В. Росляков и др. на основании эксплуатационных данных, режимной карты, нормативных документов и экологических требований определили критерии оценки работы оборудования с позиций надежности, эффективности и экологической безопасности. По данным критериям анализировали результаты расчетных рабочих параметров котельной установки при сжигании сланца и угля в различных сочетаниях [16].

В статье [17] авторы опытным путем определили, что использование жеронского угля приводит к шлакованию радиационного пароперегревателя, конвективной шахты, неудовлетворительному выходу шлака на минимальной нагрузке и увеличению механического недожога на котлоагрегатах БКЗ-420-140.

М. Пронобис и др. [18] представили математический метод выбора оптимального помола угля при изменении характеристик топлива для пылевидных котлов. Этот метод основан на экономических критериях и учитывает изменения нагрузки энергоблока, а также мощность и срок службы мельниц.

Дж. Мбабази и др. [19] разработали математическую модель для определения влияния скорости и угла удара частиц золы на абразивный износ поверхностей из низкоуглеродистой стали.

Р. Нагараджан и др. [20] определяли влияние физических свойств частиц золы и траектории их движения на абразивный износ трех различных марок низколегированной стали газовоздушного тракта котла.

Ч. Ванг и др. [21] исследовали процессы загрязнения и шлакования, связанные с сжиганием углей с высоким содержанием натрия.

Данная работа направлена на оценку износа (абразивного и низкотемпературной коррозией) конвективных поверхностей (воздухоподогревателя и водяного экономайзера) и обусловленного этим изменения их межремонтного периода. Проведено математическое моделирование отдельных элементов и котлоагрегата с учетом абразивного износа и низкотемпературной коррозии. Определены скорости износа конвективных поверхностей нагрева котлоагрегата, получены оптимальные смеси поставляемых углей, определен межремонтный период в зависимости от состава угольной смеси.

Методика проведения исследований котлоагрегатов угольных ТЭС при использовании непроектного топлива

Одним из основных принципов, позволяющих производить непосредственное сопоставление сложных технических систем, в том числе вариантов наборов оборудования, входящего в состав энергетических установок, является принцип оптимальности, в соответствии с которым каждый из рассматриваемых вариантов должен быть приведен к оптимальным условиям [22–28]. Этим, в частности, вызвана необходимость проведения оптимизации параметров для каждого из рассматриваемых в работе вариантов рабочих параметров котлоагрегата.

В качестве основного инструмента в данной работе используется программно-вычислительный комплекс математического моделирования и оптимизации теплоэнергетических установок СМПП-ПК (система машинного построения программ), предназначенный для генерации математических моделей исследуемых установок на основании математических моделей отдельно взятых элементов, информации о технологических связях между ними, целях расчета. Данный комплекс разработан в Институте систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН и за время его применения в исследованиях теплоэнергетических установок была создана база математических моделей отдельных узлов и элементов, использование которой позволяет достаточно эффективно создавать математические модели установок различной сложности для расчетов различной направленности.

Работа посвящена исследованию использования непроектных углей на действующем оборудовании, поэтому математические модели котлоагрегатов, разработанные с применением СМПП-ПК и используемые для проведения комплексных оптимизационных исследований, были идентифицированы путем настройки коэффициентов тепловой эффективности теплообменных поверхностей, коэффициентов механического и химического недожога и др., что позволило достичь соответствия параметров работы котлоагрегатов, рассчитанных с применением данных моделей, параметрам работы действующего оборудования. Результаты исследований показали хорошее соответствие рассчитываемых параметров паровых котлов экспериментальным данным. Относительные отклонения параметров работы установки в различных режимах составляют: паропроизводительность -0,06...0,1 % (0,03...0,08 т/ч), давление перегретого пара – 0,3 – 0,5 % (0,11... 0,21 кгс/см²), температура перегретого пара – 0,33...0,65 % (1,4...2,8 °С), температура уходящих газов – 0,8 ...1,4 % (0,9... 1,65 °С), КПД котлоагрегата брутто – 0,03... 0,06 %.

С целью оценки экономической эффективности рассматриваемых в работе вариантов за основу принята методика, разработанная в Институте систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН [29], позволяющая наиболее полно учесть последствия от использования непроектного топлива по всем элементам котлоагрегата. Данная методика доработана с целью учета межремонтного периода конвективных поверхностей котельного агрегата, обусловленного их абразивным износом и низкотемпературной коррозией.

В основе методики лежит определение части суммарных эксплуатационных издержек по ТЭС, связанных с эксплуатацией котельного агрегата при использовании непроектного топлива. Задача оптимизации сформулирована как задача минимизации суммарных ежегодных эксплуатационных затрат, связанных с использованием непректного топлива

$$\min Z \begin{pmatrix} x^{p}, x^{k}, y, U^{\mathsf{T}}, U^{\mathsf{T}. \operatorname{ckn}}, U^{p \operatorname{ckn}}, U^{p. \operatorname{kot}}, U^{\mathsf{J}. \operatorname{vj}}, U^{\mathsf{p}. \operatorname{3. yj}}, \\ U^{\mathfrak{3. ya}}, U^{\mathfrak{p}. \mathfrak{3. yj}}, U^{\mathfrak{3. xp}}, U^{\mathfrak{3. sko}}, U^{\mathfrak{3. baloop}}, U^{\mathfrak{SO}_{2} \operatorname{balop}} \end{pmatrix}$$

при условиях

$$H(x, y) = 0;$$

$$G(x, y) \ge 0;$$

$$x_{\min} \le x \le x_{\max}$$

где $U^{\rm T}$ – затраты на покупку и перевозку топлива, р.; *x^p* – вектор независимых оптимизируемых параметров (входные расчетные параметры, определяющие режим работы котлоагрегата; x^{k} – вектор конструктивных параметров; у – вектор зависимых вычисляемых параметров; Х – вектор ограничений-равенств (уравнения материального, энергетического балансов, теплопередачи и др.); G – вектор ограниченийнеравенств (ограничения на соблюдение технологических требований к работе котлоагрегата); x_{min}, *x*_{max} – векторы граничных значений оптимизируемых параметров, определяющих режим работы котлоагрегата; U^{т. скл} – затраты на разгрузку, складирование и подачу топлива, р.; U^{р. скл} – затраты на ремонт систем разгрузки, складирования и подачи топлива, р.; U^{р. кот} – затраты на ремонт основного и вспомогательного котельного оборудования, р.; U^{3. ул} – затраты на золоулавливание, р.; U^{р. з. ул} – затраты на ремонт систем золоулавливания, р.; $U^{3. ya}$ – затраты на золошлакоудаление, р.; U^{р. з. уд} – затраты на ремонт систем золошлакоудаления, р.; $U^{3, xp}$ – затраты на хранение золы и шлака, р.; $U^{3. \text{ выбр}}$ – плата за выбросы золы, р.; $U^{SO_2 \text{ выбр}}$ – плата за выбросы SO₂, р.

Результатом решения задачи является минимальное в заданных условиях значение суммарных ежегодных затрат для каждого из рассматриваемых вариантов, связанных с абразивным износом и низкотемпературной коррозией конвективных поверхностей котлоагрегата.

Математическое моделирование котлоагрегата БКЗ-420-140

С целью оценки последствий использования непроектного топлива разработана математическая модель парового котла БКЗ-420-140 (рис. 1), позволяющая с достаточной точностью описывать происходящие в котлоагрегате процессы. Принятые на рисунке обозначения: КПП – конвективный пароперегреватель, ВЭК – водяной экономайзер, ВЗП – воздухоподогреватель.

Котлоагрегат БКЗ-420-140 предназначен для факельного сжигания угольной пыли (каменных и бурых углей) с твердым шлакоудалением. Номинальная производительность котлоагрегата 420 т/ч, рабочее давление и температура перегретого пара 13,8 МПа и 550 °C соответственно.



Рис. 1. Базовая расчетная схема котлоагрегата БКЗ-420-140 **Fig. 1.** Basic design diagram of the BKZ-420-140 boiler unit

Материальные и энергетические потоки учтены связями между соответствующими элементами схемы. Каждой связи между элементами схемы соответствует информационная связь между моделями. Связь между элементами осуществляется:

- по воздуху: между дутьевым вентилятором, воздухоподогревателем и топкой котла; связь характеризуется температурой, давлением и расходом;
- по дымовым газам: между элементами газового тракта (топка котла, ширмы, конвективные паро-

перегреватели, конвективные поверхности нагрева ВЭК и ВЗП, дымосос); связи осуществляются по давлению, температуре и расходу каждого компонента уходящих газов;

 по воде (пароводяной смеси, пару): между элементами пароводяного тракта (водяной экономайзер, конденсатор впрыска, барабан, топочные экраны, ширмы, конвективные пароперегреватели, конвективные поверхности нагрева ВЭК и ВЗП); связь характеризуется энтальпией, давлением и расходом. В качестве конструктивных информационновходных параметров используются: наружные и внутренние диаметры труб поверхностей нагрева, их шаги и количество, марка стали, расположение труб в пучке; схема движения теплоносителя; ширина и глубина топки; ширина и глубина газохода в разных сечениях; площадь поверхности теплообменников и т. п. [21].

Режимными информационно-входными параметрами являются: состав твердого топлива, его теплота сгорания, расход, температура питательной воды, воздуха, требуемая температура пара.

Разработанная математическая модель настроена в соответствии с экспериментальными данными, полученными в результате опытного сжигания, и позволяет определять характеристики и параметры котла при работе на твердом топливе различного состава и при различных нагрузках, требуемые для оценки технологических и экологических последствий использования топлива различного состава.

Математическая модель котлоагрегата дополнена расчетом скорости протекания низкотемпературной коррозии и расчетом скорости абразивного износа конвективных поверхностей котлоагрегата.

Наиболее сильно абразивные свойства золы дымовых газов проявляются в зоне температур газового потока ниже 600 °С – то есть в верхней части конвективного газохода частицы теряют поверхностную пластичность. Золовой износ конвективных поверхностей, температура стенки которых ниже 350 °С, рассматривается обычно как чисто механический процесс, а свойства материала подвергающейся износу поверхности считаются неизменными. Поэтому применительно к золовому износу конвективных поверхностей нагрева коэффициент износа принимается равным коэффициенту абразивности золы, определенному относительно материала, из которого поверхности нагрева изготовлены.

Величина золового износа ступеней водяного экономайзера и воздухоподогревателя котлоагрегата определяется в соответствии с [30].

Величина абразивного износа стенки труб водяного экономайзера (мм) определяется из уравнения

$$J^{\text{BЭK}} = 9,5 \cdot 10^3 \frac{ak_P k_\mu \mu \tau M}{(\vartheta + 273)^{0.35}} \left(\frac{k_W}{k_D} w \frac{\sigma_1 - 1}{\sigma_1}\right)^3 \left(\frac{R_{90}}{d}\right)^{0.5},$$

где a – коэффициент абразивности золы, м²/H; k_P – коэффициент, учитывающий влияние поперечного шага труб (шахматные гладкотрубные и мембранные $\sigma_1 \leq 2, 8 - k_p = 3, 5;$ 2,8 < $\sigma_1 < 5, 4 - k_p = 4, 8/(\sigma_1 - 1, 4);$ пучки: $\sigma_1 \ge 5, 4 - k_P = 1, 2;$ коридорные гладкотрубные пучки – *k*_{*P*}=1,2); µ – концентрация золы в газах в рассчитываемом сечении пакета, г/м³; т – срок службы труб, ч; *w* – скорость газов на входе в поверхность нагрева, м/с; R_{90} – остаток золы на сите 90 мкм, %; d – диаметр трубы, мм; 9 – температура газов, °С; М – коэффициент истираемости металла труб: для углеродистых труб *М*=1, для легированных *М*=0,7; *k*_W и *k*_µ - коэффициенты неравномерности соответственно полей скоростей газов и концентраций золы: при П- и Т-образной компоновке котла для поверхностей за поворотной камерой $k_W=1,45$ и $k_{\mu}=1,25$; при повороте газов перед пакетом на 180° $k_W=1,6$ и $k_{\mu}=1,6$; при башенной компоновке $k_W=1,2$ и $k_{\mu}=1,1$; k_D – отношение расчетной скорости газов при номинальной нагрузке котельного агрегата к скорости газов при среднеэксплуатационной нагрузке: для котлов $D\leq35$ кг/с $k_D=1,15$; для котлов D=14-20 кг/с $k_D=1,4-1,3$.

Золовой износ входных участков теплообменных труб трубчатого воздухоподогревателя (мм) определяется из уравнения:

$$J^{3\mathrm{BII}} = 37ak_{\mu}\mu\tau \left(\frac{k_{W}}{k_{D}}w\right)^{3}k_{3}\exp(0,041\beta),$$

где k_{μ} – коэффициент неравномерности распределения концентрации золы по сечению: для встроенного в конвективную шахту воздухоподогревателя $k_{\mu}=1,6;$ для воздухоподогревателя вынесенной компоновки *k*_{*и*}=2,0; *k*_{*W*}- коэффициент неравномерности распределения скорости по сечению: для встроенного в конвективную шахту воздухоподогревателя $k_W = 1,45$; для воздухоподогревателя вынесенной компоновки *k*_W=2,0; *k*₃ – коэффициент защиты: для ячейковой защиты и наставок большого диаметра k₃=0,25; при плавном входе в трубу $k_3=0,6$; для вставок $k_3=0,5$; если защиты нет, то k₃=1,0; β – угол (градусы) между вектором скорости набегающего на трубную доску потока продуктов сгорания и продольными осями теплообменных труб.

На основе данных, изложенных в [31], построены аппроксимационные зависимости скорости низкотемпературной коррозии металла от средней температуры стенки труб и приведенной сернистости сжигаемого топлива (рис. 2). Указанные зависимости были использованы в расчетах для определения низкотемпературной коррозии конвективных поверхностей ВЗП.

Необходимые температуры газов и их объемы, значения скоростей, концентрации серы, золы и т. д. для проведения исследований абразивного износа и низкотемпературной коррозии конвективных поверхностей нагрева определялись в результате поверочного расчета с использованием математической модели котлоагрегата.

Результаты исследования

На основе вышеизложенного материала проведены исследования на математической модели котла с целью определения оптимальных составов топлива для минимизации эксплуатационных издержек, связанных с изменением топлива, и увеличения межремонтного периода конвективных поверхностей нагрева ВЭК и ВЗП для повышения надежности работы котельного агрегата.

Исходя из полученных результатов поверочных расчетов на математической модели котла в номинальном режиме работы котла при сжигании различных топлив, используемых на ТЭЦ, в табл. 1 представлены итоговые параметры работы котлоагрегата.

Из результатов расчета (рис. 3, табл. 1) видно, что при номинальных нагрузках по паропроизводитель-
ности и давлению острого пара, при использовании разных углей, существенно отличаются расходы топлива, а также скорости коррозии, скорости абразивного износа ВЭК и ВЗП. Как следствие, отличается наработка поверхностей нагрева до износа и, соответственно, суммарные затраты на ремонт конвективных поверхностей нагрева. На рис. 3 показано, что ВЭК 2 ступени характеризуется более высоким абразивным износом, обусловленым большей площадью проходного сечения по газам и, как следствие, несколько большей средней скоростью газов в трубках ВЗП 1 ступени, по сравнению с ВЗП 2 ступени.



Рис. 2. Зависимость скорости низкотемпературной коррозии ВЗП от приведенного содержания серы в исходном топливе и средней температуры стенки





Puc. 3. Скорости коррозии и абразивного износа водяных экономайзеров и воздухоподогревателя *Fig. 3.* Rates of corrosion and abrasive wear of water economizers and air heater

Ценьенорацию наромотра		Уголь/Coal				
Паимснование параметра	Азейский	Мугунский	Переясловский	Ирбейский		
r arameter	Azeisky	Mugunsky	Pereyaslovsky	Irbeysky		
Расход топлива, кг/c/Coal consumption, kg/s	20,3	18,8	20,3	17,4		
Паропроизводительность, кг/c/Steam capacity, kg/s	117					
Расход питательной воды, кг/c/Feed water consumption, kg/s	120,8	120,3	120,2	121,4		
Температура уходящих газов/Flue gas temperature, °C	144,5	143,4	150,8	133,7		
КПД котлоагрегата/Boiler efficiency, %	91,5	91,52	90,5	93,6		
Температура точки росы/Dew point temperature, °C	111,0	121,6	93,1	109,1		
Наработка до износа, лет/Operating time before wear, years	2,18	1,96	3,3	3,6		
Суммарные эксплуатационные затраты, связанные						
с использованием углей разного состава, тыс. р.	200001	262702	142501	106500		
Total operating costs associated with the use of different coal	500901	502702	142301	190300		
composition, thousand rubles						

Таблица 1. Итоговые технико-экономические показатели работы котлоагрегатаTable 1.Technical and economic indicators of the boiler unit operation

Из табл. 1 видно, что экономически неэффективно использовать угли Азейского и Мугунского месторождений, но необходимо отметить, что Азейский уголь является проектным углем для котла БКЗ-420-140, а остальные угли используются энергетической компанией в качестве непроектных углей в смеси. Наибольший интерес представляет использование угля Переясловского месторождения в чистом виде с точки зрения эксплуатационных затрат. Наблюдаются существенные изменения эксплуатационных затрат, включающие затраты на ремонт ВЭК и ВЗП, а также межремонтного интервала, связанные с жиганием углей разного состава. Поэтому проведены исследования с использованием смесей углей с целью усреднения эксплуатационных затрат и увеличения межремонтных периодов конвективных поверхностей котлоагрегата.

В табл. 2 даны результаты расчетов для смесей различных углей.

 Таблица 2. Показатели работы котлоагрегата на различных угольных смесях

 Table 2.
 Indicators of the boiler unit operation on various coal mixtures

	Уголь/Coal, %				
Наименорацие параметра	Азейский (7)+	Азейский (23)+	Переясловский (80)+	Ирбейский (95)+	
Паименование параметра	Ирбейский (93)	Переясловский (77)	Мугунский (20)	Мугунский (5)	
Parameter	Azeisky (7)+	Azeisky (23)+	Pereyaslovsky (80)+	Irbeysky (95)+	
	Irbeysky (93)	Pereyaslovsky (77)	Mugunsky (20)	Mugunsky (5)	
Расход топлива, кг/с	17.6	20.2	20	17.5	
Coal consumption, kg/s	17,0	20,5	20	17,5	
Паропроизводительность, кг/с			117		
Steam capacity, kg/s			117		
Расход питательной воды, кг/с	120.0	120.2	120.2	120.8	
Feed water consumption, kg/s	120,9	120,2	120,5	120,8	
Температура уходящих газов, °С	124.2	140.4	140.4	122.0	
Flue gas temperature, °C	134,2	149,4	149,4	155,9	
КПД котлоагрегата, %	02.8	90.1	00.2	02.7	
Boiler efficiency, %	92,8	90,1	90,2	92,1	
Температура точки росы, °С	109	98	102	110	
Dew point temperature, °C	109	98	102	110	
Наработка до износа, лет	2.28	2 4 2	2 30	23	
Operating time before wear, years	2,20	2,42	2,39	2,3	
Суммарные эксплуатационные затраты,					
связанные с использованием углей разного					
состава, тыс. р.	250650				
Total operating costs associated with the use	ise				
of different coal composition, thousand rubles					

Как видно из табл. 2, при средних эксплуатационных затратах, связанных с использованием углей разного состава, в том числе на ремонт ВЭК и ВЗП, в размере 250650 р. использование всех предлагаемых смесей приводит примерно к одинаковому межремонтному периоду. Наибольший КПД котла при работе на смесях Азейский уголь (7 %) + Ирбейский уголь (93 %) и Ирбейский уголь (95 %) + Мугунский уголь (5 %).

Заключение

На базе программно-вычислительного комплекса СМПП-ПК разработана математическая модель кот-

лоагрегата БКЗ-420-140, настроенная на выполнение оптимизационных расчетов. Разработанная и верифицированная математическая модель котлоагрегата позволяет достаточно точно описывать происходящие в нем процессы, чем достигается необходимая сходимость параметров его работы, рассчитанных с применением математической модели, с параметрами эксплуатируемого оборудования. Это обеспечивается полнотой исходных данных и позволяет производить любые исследования без вмешательства в технологический процесс. Модели позволяют проводить оптимизационные расчеты по критериям энергетической и экономической эффективности. Полученные результаты показывают существенные различия по суммарным затратам на ремонт конвективных поверхностей нагрева в результате использования непроектных углей. Наибольшую наработку до износа поверхностей нагрева котла показал режим работы на Переясловском угле, соответственно и наименьшие суммарные приведенные затраты на их ремонт. Наименьшая, в свою очередь, наработка получилась при работе на Мугунском угле, а также наибольшие затраты на ремонт поверхностей нагрева.

Получены результаты с использованием смесей углей, используемых на станции, с целью усреднения эксплуатационных затрат и повышения надежности работы котельного агрегата БКЗ-420-140. Экономия затрат при использовании вышеуказанных смесей ис-

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Kuandykova A.A., Lebedev V.M. On the perspective of transfer of Omsk thermal power plants to combustion of fired coals // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. – 2021. – № 14 (1). – P. 118–129. DOI: 10.17516/1999-494X-0292.
- Программа развития угольной промышленности России на период до 2035 года. URL: https://docs.cntd.ru/document/ 565123539 (дата обращения 14.02.2022).
- Рогалев Н.Д., Зубкова А.Г., Мастрова И.В. Экономика энергетики. – М.: ИД МЭИ, 2011. – 320 с.
- Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети. М.: ИД МЭИ, 2006. – 472 с.
- Dynamic feed-in tariffs with reduced complexity and their impact on the optimal operation of a combined heat and power plant / O. Selinger-Lutz, A. Groß, B. Wille-Haussmann, Slide Wittwer // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2020. – V. 118. – 105770. URL: https://doi.org/10.1016/j.ijepes. 2019.105770 (дата обращения 15.02.2022).
- Does district heating tariff motivate energy efficiency improvement? / I. Pakere, D. Blumberga, A. Kamenders, V. Vītoliņš. // Energy Reports. – 2021. – V. 7. – Supplement. 4. – P. 410–418. URL: https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.08.087 (дата обращения 15.02.2022).
- Stepanova E.L., Zharkov P.V. A technique for determining a relationship between the prices of heat and electricity generated by CHP // E3S Web of Conferences. – 2020. – V. 209. – 03025. – P. 1–5. URL: https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020903025 (дата обращения 15.02.2022).
- Kler A.M., Stepanova E.L., Zharkov P.V. Investigation of the operating modes of a cogeneration gas turbine plant with uncertainty in the prices of generated energy products and various climatic operating conditions // International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). – Владивосток, 2020. – Р. 1–5.
- Bartnik R., Buryn Z., Hnydiuk-Stefan A. Thermodynamic and economic analysis of effect of heat accumulator volume on the specific cost of heat production in the gas-steam CHP plant // Energy. – 2021. – V. 230. – 120828. URL: https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120828 (дата обращения 15.02.2022).
- Бойко Е.А., Загородний И.В. Комплексное исследование интенсивности шлакования поверхностей нагрева котлоагрегата при сжигании непроектных топлив // Известия высших учебных заведений. Проблемы Энергетики. – 2020. – Т. 22. – № 6. – С. 101–116. DOI: 10.30724/1998-9903-2020-22-6-101-116.
- Коваль Т.В., Кудряшов А.Н. Оценка шлакующих и загрязняющих свойств углей, сжигаемых на тепловых электростанциях ПАО «Иркутскэнерго» // Вестник иркутского государственного технического университета. 2020. Т. 24. № 3. С. 639–648.
- Кузьмин В.А., Заграй И.А., Десятков И.А. Определение плавкости золы торфа месторождений Кировской области // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2018. – № 20 (11–12). – С. 27–33.

пользуемых на станции углей максимально может доходить до 100 млн р. в год.

Предлагаемая методика определения техникоэкономической эффективности установки на основе расчета суммарных ежегодных затрат на ремонт и эксплуатацию оборудования представляется весьма универсальной, поскольку позволяет учесть широкую область возможных изменений в условиях работы котлоагрегата, зависящих от изменения состава сжигаемого топлива по всей технологической линии.

Работа выполнена в ИСЭМ СО РАН, номер темы FWEU-2021-0005, регистрационный номер: АААА-А21-121012190004-5, и ИРНИТУ по направлению подготовки магистров 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника».

- Тайлашева Т.С., Гиль А.В., Воронцова Е.С. Оценка условий сжигания высоковлажного непроектного топлива в камерной топке на основе численного моделирования // Известия томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – № 1 (327). – С. 128–135.
- Gil A.V., Zavorin A.S., Starchenko A.V. Numerical investigation of the combustion process for design and non-design coal in Tshaped boilers with swirl burners // Energy. – 2019. – V. 186. 115844. URL: https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.07.174 (дата обращения 15.02.2022).
- Сжигание непроектных марок угольного топлива на ТЭЦ / В.В. Васильев, М.Н. Назаров, А.А. Рубцов, С.Р. Янов // Новости теплоснабжения. – 2012. – № 05 (141).
- Use of coals for cocombustion with estonian shale oil / P.V. Roslyakov, M.N. Zaichenko, D.A. Melnikov, V.A. Vereshetin, R. Attikas // Thermal Engineering. – 2016. – V. 63. – № 3. – P. 188–196.
- Оценка возможности сжигания жеронского каменного угля на котлоагрегатах бкз-420-140 пт-2 усть-илимской тэц / А.Н. Кудряшов, Н.В. Кулагин, А.В. Синицкая, Ю.Д. Бибикова // Вестник иркутского государственного технического университета. – 2017. – Т. 21. – № 2 (121). – С. 106–117. DOI: 10.21285/1814-3520-2017-2-106-117.
- Optimisation of coal fineness in pulverised-fuel boilers / M. Pronobis, K. Mroczek, M. Tymoszuk, S. Ciukaj, R. Wejkowski, T. Janda, K. Jagodzińska // Energy. – 2017. – V. 139. – Р. 655–666. URL: https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.07.057 (дата обращения 15.02.2022).
- Mbabazi J.G., Sheer T.J., Shandu R. A model to predict erosion on mild steel surfaces impacted by boiler fly ash particles // Wear. – 2004. – V. 257. – I. 5–6. – Р. 612–624. URL: https://doi.org/ 10.1016/j.wear.2004.03.007 (дата обращения 15.02.2022).
- Development of predictive model for fly-ash erosion phenomena in coal-burning boilers / R. Nagarajan, B. Ambedkar, S. Gowrisankar, S. Somasundaram // Wear. – 2009. – V. 267. – Iss. 1–4. – P. 122–128. URL: https://doi.org/10.1016/ j.wear.2008.12.057 (дата обращения 15.02.2022).
- Experimental study on fouling and slagging behaviors during oxyfuel combustion of high-sodium coal using a high-temperature drop-tube furnace / Slide Wang, R. Sun, L. Zhao, Slide Wang, G. Hu, N. Zhao, D. Che // International Journal of Greenhouse Gas Control. – 2020. – V. 97. 103054. URL: https://doi.org/ 10.1016/j.jiggc.2020.103054 (дата обращения 15.02.2022).
- Alekseiuk V. Improving the efficiency of the three-stage technique of mathematical model identification of complex thermal power equipment // E3S Web of Conferences. – 2020. – V. 209. URL: https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020903002 (дата обращения 15.02.2022).
- Kler A., Alekseiuk V., Maksimov A. An improved technique for identification of mathematical model parameters of thermal power equipment and assessment of its performance // E3S Web of Conferences. – 2019. – V. 114. URL: https://doi.org/10.1051/ e3sconf/201911406009 (дата обращения 15.02.2022).
- Zabuga F., Alekseiuk V. Research based on mathematical modeling of CHP-10 power unit No 5 «Baikal Energy Company»

LLC to assess the efficiency of its modernization // E3S Web of Conferences. – 2021. – V. 289. URL: https://doi.org/10.1051/ e3sconf/202128902002 (дата обращения 15.02.2022).

- Penkovskii A., Stennikov V., Postnikov I. Unified heat supply organization: Mathematical modeling and calculation // Energy Procedia. – 2019. – V. 158. – P. 3439–3444. DOI: 10.1016/j.egypro.2019.01.930.
- Postnikov I., Stennikov V., Penkovskii A. Integrated energy supply schemes on basis of cogeneration plants and wind power plants // Energy Procedia. – 2019. – V. 158. – P. 154–159. DOI: 10.1016/j.egypro.2019.01.063.
- Postnikov I., Stennikov V., Penkovskii A. Prosumer in the district heating systems: operating and reliability modeling // Energy Procedia. – 2019. – V. 158. – P. 2530–2535. DOI: 10.1016/j.egypro.2019.01.411.
- Stepanova E.L., Maximov A.S. The optimization problems of CP operation // Journal of Physics: Conference Series. 2017. № 891 (1). 012215. DOI: 10.1088/1742-6596/891/1/012215.

- 29. Гриценко М.В., Клер А.М., Степанова Е.Л. Комплексная методика определения затрат при использовании на ТЭС различных видов твердого топлива // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2008. № 4. С. 99–110.
- Тепловой расчет котельных агрегатов (нормативный метод, издание 2-е) / Н.В. Кузнецов, В.В. Митор, И.Е. Дубовский, Э.С. Карасина. – М.: Энергия, 1973. – 296 с.
- Методические указания по предупреждению низкотемпературной коррозии поверхностей нагрева и газоходов котла. РД 34.26.105. – М.: ВТИ им. Ф.Э. Дзержинского, 1984 (с изм. от 1995). – 6 с.

Поступила 01.04.2022 г.

Информация об авторах

Тюрина Э.А., доктор технических наук, ведущий научный сотрудник отдела теплосиловых систем Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН; заведующая кафедрой теплоэнергетических систем Иркутского национального исследовательского технического университета.

Медников А.С., кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела теплосиловых систем Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН.

UDC 621.18

DIGITAL MODEL OF WEAR OF HEAT EXCHANGE CONVECTIVE SURFACES OF A CHARCOAL BOILER

Elina A. Tyurina^{1,2}, tyurina@isem.irk.ru

Aleksandr S. Mednikov¹,

mednikov@isem.irk.ru

- ¹ Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 130, Lermontov street, Irkutsk, 664033, Russia.
- ² Irkutsk National Research Technical University, 83, Lermontov street, Irkutsk, 664074, Russia.

The relevance of the study is caused by the need to use off-design coals on the operating equipment of TPPs. As you know, the use of such coals can adversely affect the operation, first of all, of a coal-fired boiler.

The main aim of the research was to determine the overhaul period as well as the rate of low-temperature corrosion and the rate of abrasive wear of convective surfaces (air heater and water economizer) caused by the use of various coals (Azeisky, Mugunsky, Pereyaslovsky and Irbeysky deposits) and their mixtures.

Methods: mathematical modeling and complex optimization studies on models using System of Computer-Aided Construction of Programs, designed to generate mathematical models of the investigated installations based on mathematical models of individual elements, information on technological relations between them, and calculation purposes. This complex was developed at the Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

Results. To assess the consequences of the use of non-design fuel, a sufficiently accurate mathematical model of the BKZ-420-140 steam boiler has been developed. Research was carried out on a mathematical model of the boiler in order to determine the optimal fuel compositions to minimize the operating costs associated with changing the fuel, and to increase the overhaul period of convective heating surfaces to improve the reliability of the boiler unit. The approximate dependences of the rate of low-temperature corrosion of metal on the average temperature of the pipe wall and the sulfur content of the combusted fuel are constructed. The technical and economic indicators of the boiler unit operation were obtained on the coals of the Azeisky, Mugunsky, Pereyaslavsky and Irbeysky deposits, as well as on coal mixtures (Azeysky coal (7 %) + Irbeysky coal (93 %), Azeysky coal (23 %) + Pereyaslovsky coal (77 %), Pereyaslovsky coal (80 %) + Mugunsky coal (20 %), Irbeysky coal (95 %) + Mugunsky coal (5 %)).

Key words:

Coal-fired boiler, abrasive wear, low-temperature corrosion, off-design coal, mathematical modeling, overhaul period.

The research was carried out under the State Assignment Project (no. FWEU-2021-0005) of the Fundamental Research Program of Russian Federation 2021–2030, and INRTU in master training program 13.04.01 «Heat power engineering and combustion engineering».

REFERENCES

- Kuandykova A.A., Lebedev V.M. On the perspective of transfer of Omsk thermal power plants to combustion of fired coals. *Journal* of Siberian Federal University. Engineering & Technologies, 2021, no. 14 (1), pp. 118–129. DOI: 10.17516/1999-494X-0292.
- Programma razvitiya ugolnoy promyshlennosti Rossii na period do 2035 goda [Development program of the coal industry in Russia for the period up to 2035]. Available at: https:// docs.cntd.ru/document/565123539 (accessed 14 February 2022).
- Rogalev N.D., Zubkova A.G., Mastrova I.V. Ekonomika energetiki [Energy economics]. Moscow, MEI Publ., 2011. 320 p.
- Sokolov E.Ya. *Teplofikatsiya i teplovye seti* [Heating and heating networks]. Moscow, MEI Publ., 2006. 472 p.
- Selinger-Lutz O., Groß A., Wille-Haussmann B., Wittwer Slide Dynamic feed-in tariffs with reduced complexity and their impact on the optimal operation of a combined heat and power plant. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2020, vol. 118, 105770. Available at: https://doi.org/10.1016/j.ijepes. 2019.105770 (accessed 15 February 2022).
- Pakere, D. Blumberga, A. Kamenders, V. Vītoliņš. Does district heating tariff motivate energy efficiency improvement? *Energy Reports*, 2021, vol. 7 (4), pp. 410–418. Available at: https:// doi.org/10.1016/j.egyr.2021.08.087 (accessed 15 February 2022).
- Stepanova E.L., Zharkov P.V. A technique for determining a relationship between the prices of heat and electricity generated by

CHP. *E3S Web of Conferences*, 2020, vol. 209, 03025, pp. 1–5. Available at: https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020903025 (accessed 15 February 2022).

- Kler A.M., Stepanova E.L., Zharkov P.V. Investigation of the operating modes of a cogeneration gas turbine plant with uncertainty in the prices of generated energy products and various climatic operating conditions. *International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*. Vladivostok, 2020, pp. 1–5. DOI: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271592.
- Bartnik R., Buryn Z., Hnydiuk-Stefan A. Thermodynamic and economic analysis of effect of heat accumulator volume on the specific cost of heat production in the gas-steam CHP plant. *Ener*gy, 2021, vol. 230, 120828. Available at: https://doi.org/ 10.1016/j.energy.2021.120828 (accessed 15 February 2022).
- Boiko E.A., Zagorodnii I.V. Integrated research of slaging intensity of the boiler unit heating surfaces when burning non-project fuels. *Power engineering: research, equipment, technology*, 2020, vol. 22 (6), pp. 101–116. In Rus. Available at: https://doi.org/ 10.30724/1998-9903-2020-22-6-101-116 (accessed 15 February 2022).
- Koval T.V., Kudryashov A.N. Assessment of slagging and polluting properties of coals burned at the Irkutskenergo Cogeneration Plant, *JSC. iPolytech Journal*, 2020, vol. 24 (3), pp. 639–648. In Rus. Available at: https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-3-639-648 (accessed 15 February 2022).
- Kuzmin V.A., Zagrai I.A., Desiatkov I.A. Determination of peat ash fusibility of Kirov region deposits. *Power engineering: re-*

search, equipment, technology, 2018, vol. 20 (11–12), pp. 27–33. In Rus. Available at: https://doi.org/10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-27-33 (accessed 15 February 2022).

- Taylasheva T.S., Gil A.V., Vorontsova E.S. Evaluation of the conditions for combustion of high-moisture non-design fuel in a chamber furnace based on numerical modeling. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 1, no. 327, pp. 128–135. In Rus.
- Gil A.V., Zavorin A.S., Starchenko A.V. Numerical investigation of the combustion process for design and non-design coal in T-shaped boilers with swirl burners. *Energy*, 2019, vol. 186, 115844. Available at: https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.07.174 (accessed 15 February 2022).
- Vasiliev V.V., Nazarov M.N., Rubtsov A.A., Yanov S.R. Szhiganiye neproyektnykh marok ugolnogo topliva na TETS [Combustion of off-design grades of coal fuel at CHP]. *Novosti teplosnabzheniya*, 2012, no. 05 (141).
- Roslyakov P.V., Zaichenko M.N., Melnikov D.A., Vereshetin V.A., Attikas R. Use of coals for cocombustion with estonian shale oil. *Thermal Engineering*, 2016, vol. 63, no. 3, pp. 188–196.
- Kudryashov A.N., Kulagin N.V., Sinitskaya A.V., Bibikova Yu.D. Assessing possibility of burning Zheronsky coal by Ust-Ilim CHP boiler units BKZ-420-140PT-2. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*, 2017, vol. 21, no. 2, pp. 106–117. In Rus. DOI: 10.21285/1814-3520-2017-2-106-117.
- Pronobis M., Mroczek K., Tymoszuk M., Ciukaj S., Wejkowski R., Janda T., Jagodzińska K. Optimisation of coal fineness in pulverised-fuel boilers. *Energy*, 2017, vol. 139, pp. 655–666. Available at: https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.07.057 (accessed 15 February 2022).
- Mbabazi J.G., Sheer T.J., Shandu R. A model to predict erosion on mild steel surfaces impacted by boiler fly ash particles. *Wear*, 2004, vol. 257, no. 5–6, pp. 612–624. Available at: https:// doi.org/10.1016/j.wear.2004.03.007 (accessed 15 February 2022).
- Nagarajan R., Ambedkar B., Gowrisankar S., Somasundaram S. Development of predictive model for fly-ash erosion phenomena in coal-burning boilers. *Wear*, 2009, vol. 267, no. 1–4, pp. 122–128. Available at: https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.12.057 (accessed 15 February 2022).
- Wang Slide, Sun R., Zhao L., Wang Slide, Hu G., Zhao N., Che D. Experimental study on fouling and slagging behaviors during oxyfuel combustion of high-sodium coal using a high-temperature drop-tube furnace. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2020, vol. 97, 103054. Available at: https://doi.org/ 10.1016/j.ijggc.2020.103054 (accessed 15 February 2022).
- 22. Alekseiuk V. Improving the efficiency of the three-stage technique of mathematical model identification of complex thermal power

equipment. *E3S Web of Conferences*, 2020, vol. 209. DOI: https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020903002.

- Kler A., Alekseiuk V., Maksimov A. An improved technique for identification of mathematical model parameters of thermal power equipment and assessment of its performance. *E3S Web of Conferences*, 2019, vol. 114. DOI: https://doi.org/10.1051/e3sconf/ 201911406009.
- Zabuga F., Alekseiuk V. Research based on mathematical modeling of CHP-10 power unit No 5 «Baikal Energy Company» LLC to assess the efficiency of its modernization. *E3S Web of Conferences*, 2021, vol. 289. DOI: https://doi.org/10.1051/e3sconf/ 202128902002.
- Penkovskii A., Stennikov V., Postnikov I. Unified heat supply organization: mathematical modeling and calculation. *Energy Procedia*, 2019, vol. 158, pp. 3439–3444. DOI: 10.1016/j.egypro. 2019.01.930.
- Postnikov I., Stennikov V., Penkovskii A. Integrated energy supply schemes on basis of cogeneration plants and wind power plants. *Energy Procedia*, 2019, vol. 158, pp. 154–159. DOI: 10.1016/ j.egypro.2019.01.063.
- Postnikov I., Stennikov V., Penkovskii A. Prosumer in the district heating systems: Operating and reliability modeling. *Energy Procedia*, 2019, vol. 158, pp. 2530–2535. DOI: 10.1016/ j.egypro.2019.01.411.
- Stepanova E.L., Maximov A.S. The optimization problems of CP operation. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, no. 891 (1), 012215. DOI: 10.1088/1742-6596/891/1/012215.
- 29. Gritsenko M.V., Kler A.M., Stepanova E.L. Kompleksnaya metodika opredeleniya zatrat pri ispolzovanii na TES razlichnykh vidov tverdogo topliva [Comprehensive methodology for determining costs when using various types of solid fuel at TPPs]. *Nauchny vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2008, no. 4, pp. 99–110.
- Kuznetsov N.V., Mitor V.V., Dubovsky I.E., Karasina E.S. Teplovoy raschet kotelnykh agregatov (normativny metod, izdanie 2-e) [Thermal calculation of boiler units (normative method, 2nd ed.)]. Moscow, Energiya Publ., 1973. 296 p.
- Metodicheskie ukazaniya po preduprezhdeniyu nizkotemperaturnoy korrozii poverkhnostey nagreva i gazokhodov kotla. RD 34.26.105 [Methodical instructions for the prevention of lowtemperature corrosion of heating surfaces and boiler gas ducts. RD 34.26.105]. Moscow, F.E. Dzerzhinskii VTI Publ., 1984 (ed. 1995). 6 p.

Received: 1 April 2022.

Information about the authors

Elina A. Tyurina, Dr. Sc., leading researcher, Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; head of the department, Irkutsk National Research Technical University.

Aleksandr S. Mednikov, Cand. Sc., senior researcher, Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

УДК 550.3

ОСОБЕННОСТИ УЧЁТА АНИЗОТРОПИИ ПРОНИЦАЕМОСТИ ВЕРХНЕЮРСКИХ ТЕРРИГЕННЫХ КОЛЛЕКТОРОВ НА ПРИМЕРЕ НЕФТЯНОГО ПЛАСТА

Коровин Михаил Олегович,

korovinmo@hw.tpu.ru

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

Актуальность исследования состоит в поиске способов продлить время эксплуатации месторождения и увеличить добычу нефти. Основная задача состоит в добыче как можно большего количества углеводородов. В настоящее время разработана методика, позволяющая вычислить параметры анизотропии для одного из пластов месторождения. Таким образом удаётся детально учесть влияние анизотропии в отдельном терригенном пласте. Однако месторождения бывают многопластовыми – с особенностями строения и формирования коллектора. Соответственно, возникает необходимость удостовериться в целесообразности изменения методики расчёта анизотропных параметров в зависимости от изменения обстановки, под влиянием которой формировался тот или иной пласт. Данное месторождение является многопластовым, а осложняющей особенностью является различие обстановок осадконакопления при формировании пластов-коллекторов. Есть возможность, не изменяя месторождение, применить методику на других пластах месторождения, в частности на пласте Ю1¹. Расчёты займут меньше времени, так как вся информация по месторождению загружена и скомпонована. Дополнительно удастся приблизиться к созданию полностью анизотропной модели всего месторождения и проверить работу методики в большем масштабе. Стремительное истощение запасов приводит к тому, что необходимо увеличивать коэффициент извлечения нефти и понижать величину остаточных запасов. В ближайшем будущем, возможно, эта проблема сильнее обострится, и пока что есть время для выработки методики построения анизотропных моделей целиком для месторождений с учётом всей геолого-геофизической информации и технологических показателей разработки.

Цель – проверить, можно ли применить методику определения параметров анизотропии проницаемости на пласте Ю₁¹ ранее исследованного месторождения. Пласт Ю₁¹ сложен терригенным материалом и отличается от пласта Ю₁³ обстановкой осадконакопления и величинами фильтрационно-ёмкостных свойств.

Объект – терригенный пласт месторождения, территориально расположенного в Западной Сибири. Верхнеюрские отложения с низкими фильтрационно-ёмкостными свойствами необходимо исследовать на предмет возможности распространения подхода расчёта параметров неоднородности проницаемости.

Методы. Стандартный комплекс геофизических исследований скважин в цифровых каротажных диаграммах применён для расчленения продуктивного пласта на пачки. Петрофизические свойства определены с использованием зависимости между керновыми данными (пористость–проницаемость). На примере одной из скважин построено распределение проницаемости по близлежащим скважинам по результатам трассерных исследований, а на примере пласта Ю1¹ отражено распределение градиентов проницаемости по материалам ГИС, на основании которых сделаны выводы о закономерности распределения анизотропии с учётом геологических обстановок осадконакопления.

Было определено, что для пласта Ю₁¹ алгоритмы определения параметров анизотропии проницаемости остаются такими же, как и для пласта Ю₁³. Разработанная методика уверенно применяется на пласте с другой обстановкой осадконакопления. Результаты получаются достоверными и подтверждают целесообразность использования методики без внесения изменений. Удалось приблизиться к созданию объёмной модели для всего месторождения с учётом всех пластов и к учёту фильтрации углеводородов. Это очень важно, так как современные компьютерные мощности позволяют строить и рассчитывать всё более сложные и комплексные модели с высокой детализацией пространства коллектора.

Ключевые слова:

Анизотропия проницаемости, масштаб анизотропии, гидродинамическое моделирование, терригенный коллектор, петрофизические расчёты.

Введение

Развитие компьютерных технологий идёт стремительными темпами, и это позволяет обрабатывать большие объёмы информации за гораздо меньшее время. Сложнейшие математические законы распределения параметров применяются с помощью мощного математического аппарата, которым снабжены современные экземпляры программного обеспечения. В совокупности это позволяет создать очень сложные детализированные объёмные модели и наблюдать процессы фильтрации флюидов.

Ранее в условиях обеднённого комплекса сбора и регистрации геолого-геофизических данных было сложно создавать детальные геологические модели. Применялось осреднение фильтрационно-ёмкостных параметров для упрощения расчётов. С течением времени и совершенствованием технологий становится возможным не только собрать большой объём информации, но также и обработать его, проанализировать. Теперь эту проблему позволяет решать более совершенный комплекс геофизических исследований скважин и новые методики обработки геологогеофизической информации.

Но не только осреднение параметров приводило и может приводить сейчас к загрублению моделей, а ещё и недостаточная детализация пространства коллектора. Конкретнее, хотелось бы обратить внимание именно на неоднородность строения коллектора, в частности порового пространства. Параметры неоднородности очень сложно учесть и распространить по площади месторождения. Основная проблема – в разной масштабности исходных данных. Наиболее точно неоднородность можно выявить по образцам керна, но таких образцов, как правило, очень мало по всему разрезу. Следующими по масштабности являются геофизические исследования скважин. Как правило, они проводятся в 100 % фонда скважин, и по ним можно вычислять фильтрационно-ёмкостные свойства в пределах всего месторождения. Основной недостаток геофизических исследований – детальность, которая может быть достигнута при исследовании разреза скважин. Этот недостаток нивелируется за счёт разработанных технологий распределения данных и сопоставления проницаемости с лабораторными исследованиями керна. Явление неоднородности проницаемости изучается специалистами с разных позиций [1–19].

Краткий очерк месторождения и исследуемого пласта

При изучении свойств коллекторов необходимо обращать внимание на формирование месторождения и его геологические особенности. В этом случае удаётся выявить закономерности и прогнозировать аналогичные законы распределения свойств на других месторождениях со схожими тектоно-фациальными факторами формирования.

Каймысовский свод и Нюрольская мегавпадина в зоне сочленения являются зоной размещения исследуемого месторождения. Приуроченность месторождения к трём локальным поднятиям (Лесмуровское, Междуреченское, Западно-Моисеевское) обуславливает тектонический режим формирования площади. Также необходимо отметить, что поднятия расположены между Моисеевским и Карандашовским поднятиями куполовидной формы. Зона, вмещающая эти поднятия, в свою очередь, является гипсометрически погружённой.

Нефтегазогеологически месторождение относится к Каймысовской нефтегазоносной области, к южной части Каймысовского нефтегазоносного района. Самые перспективные отложения дислоцированы в верхнеюрских залежах. Более 90 % запасов сосредоточены в верхней юре.

Режим формирования коллекторов Васюганской свиты является мелководно-морским и прибрежным. Этап развития – регрессивный, переходящий в трансгрессивный. Литологически свита делится на подсвиты (верхнюю и нижнюю). Нижняя подсвита состоит из аргиллтов (преимущественно) с прослойками алевролитов и песчаников. Верхняя подсвита представляет собой толщу песчаников, алверолитов и аргиллитов, переслаивающихся между собой. Также включаются прослойки углей. Суммарно верхняя подсвита состоит из пяти пластов песчаника и формирует региональный горизонт Ю₁.

Исследуемая часть разреза пласта Ю₁ также называется надугольной толщей, так как в подошве присутствует угольный пласт и является характерным маркером начала накопления верхней части разреза. Мощность толщи составляет от двух до одиннадцати метров. Индексация пластов, как правило, следующая Ю₁¹, Ю₁². Эти песчаные пласты в большинстве случаев разделяются глинистым прослоем мощностью 1–1,5 м. Формирование коллекторов происходило во время трансгрессии морских отложений с преобладанием прибрежно-морских фациальных особенностей осадконакопления. Междуреченская площадь включает оба пласта $({\rm IO_1}^1$ и ${\rm OI_2}^2$), хотя в большей части скважин в пласте ${\rm IO_1}^2$ наблюдается уплотнение отложений, ухудшающее коллекторские свойства. Выклинивание пласта ${\rm IO_1}^1$ наблюдается на Западно-Моисеевской части месторождения, а ${\rm IO_1}^2$ в свою очередь получил площадное развитие, кроме склона в юго-восточной области. В кровле коллектора горизонта ${\rm IO_1}$ перекрываются глинистыми отложениями Георгиевской свиты.

Предварительные расчёты

Пласт Ю₁³ исследуемого месторождения уже изучен с точки зрения анизотропных эффектов [20]. Пласт Ю₁¹ находится гипсометрически выше, но также сложен преимущественно терригенным материалом. Для расчета каротажа проницаемости необходимо найти корреляционное уравнение между проницаемостью и пористостью по керну. Анализ был выполнен на основе 94 точек данных по проницаемости для пласта Ю₁¹. Окончательное корреляционное уравнение для определения проницаемости:

$$k = 0.0022 \cdot e^{47.933 \cdot \varphi}, R = 0.886,$$

где k – коэффициент проницаемости по керну, мД; ϕ – коэффициент пористости, д.е.

Зонирование месторождения

Разделение на зоны, проведённое ранее [20], используется в качестве отправной точки анализа пространственного распределения. Первоначальный подход – предположение об эквивалентной зональности для пласта Ю₁¹. Карта распределения средней проницаемости показана на рис. 1.

Полученная карта была использована для определения величин первой производной. При этой процедуре учитывалось зонирование карты для повышения точности расчетов. В первую очередь, как указывалось ранее, значения градиентов проницаемости были определены как квадратный корень из суммы квадратов приращения (dX и dY). Азимут точек рассчитывался по тригонометрической единичной окружности. Затем круг был разделен на интервалы по 10 градусов, и точки данных были усреднены. Полученные розыдиаграммы показаны на рис. 1. Значения большой и малой оси, рассчитанные методом наименьших квадратов, обобщены в табл. 1.

Таблица 1. Значения основной и вспомогательной оси эллипса и оценка анизотропии

Table 1.Values of the main and minor axes of the ellipse
and the anisotropy estimate

Пласт Layer	Зона Zone	Главная полуось Major axis	Второстепенная полуось Minor axis	Коэффициент анизотропии Anisotropy
TO 1	1	0,0074	0,0048	1,542
IO_1^{-1}	2	0,0059	0,0033	1,788
J 1	3	0,0055	0,0035	1,571



Наряду с вышеизложенным построен график функции плотности вероятности для каждой зоны пласта Ю₁¹. Горизонтальная ось в этом случае показывает интервал углов с шагом 10 градусов. Вертикальная ось показывает частоту появления значений градиента проницаемости в каждом интервале. Диаграммы представлены на рис. 2, значения азимутов для всех пластов обобщены в табл. 2.



- **Рис. 1.** Карта распределения проницаемости пласта $O_1^{\ 1}$ (слева), роза-диаграмма ориентировки градиентов проницаемости зоны 1 для пласта $O_1^{\ 1}$ (справа)
- **Fig. 1.** Average permeability distribution maps for $J_1^{\ 1}$ layer (left), rose diagram for permeability gradients orientation within zone 1 for $J_1^{\ 1}$ layer (right)

Таблица 2. Значения азимута для пласта $IO_1^{\ 1}$ **Table 2.** $J_1^{\ 1}$ azimuth calculations

Плаат	20110	Азимут/Azimuth		
Layer	Zone	Первый максимум First maximum	Второй максимум Second maximum	
ro l	1	110-120°	310-320°	
IO_1^{-1}	2	130–140°	320-330°	
J 1	3	100-120°	310-320°	



Fig. 2. Permeability gradients density function for $J_1^{\ l}$ layer

Анализ метода распределения пространственной средней проницаемости

Анализ справочной литературы показал необходимость зонирования пласта Ю₁¹ на три зоны. Данная процедура была сделана для большей точности расчетов и дальнейшего моделирования коллектора для подтверждения влияния анизотропии проницаемости. Значения градиентов и ориентировка, полученные после применения метода пространственного распределения, продемонстрировали, что величины анизотропии, оцененные с помощью аппроксимации эллипса с применением метода наименьших квадратов, демонстрируют разные результаты для зон. Согласно табл. 2, обобщенной после изучения роз- диаграмм на рис. 4, можно заметить, что наибольшее значение латеральной анизотропии проницаемости соответствует зоне 2 пласта Ю₁^г. В то же время величины анизотропии для зон 1 и 3 одного и того же пласта имеют очень близкие значения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Interpreting reservoir permeabilities from wireline formation test data / H. Du, Y. Liu, X. Li, F. Guan, X. Sui // Petroleum Science and Technology. – 2013. – V. 31. – P. 1819–1826.
- Dussan E., Sharma Y. Analysis of the pressure response of a single-probe formation tester // Society of Petroleum Engineers. Formation evaluation. – 1992. – V. 7. – P. 151–156.
- Permeability anisotropy and its relations with porous medium structure / J.B. Clavaud, A. Maineult, M. Zamora, P. Rasolofosaon, C. Schlitter // Journal of geophysical researslide – 2008. – V. 113. – P. 1–10.
- Меркулов В.П., Краснощекова Л.А. Исследование пространственной литолого-петрофизической неоднородности продуктивных коллекторов месторождений нефти и газа // Известия Томского политехнического университета. – 2002. – Т. 305. – № 6. – С. 296–303.
- Tyvand P.A., Storhaug A.R.F. Two-dimensional flow in a porous medium with general anisotropy. – Norway: Norwegian University of Life Sciences, Department of Mathematical Sciences and Technology, 2004. – P. 1–12.
- Литолого-петрофизическая анизотропия песчано-глинистых коллекторов нефтяных месторождений / В.П. Меркулов, Д.В. Александров, Л.А. Краснощекова, Ю.Я. Ненахов // Научно-технический вестник ЮКОС. – 2004. – № 10. – С. 33–36.
- Abedi R., Clarke P.L. Modeling of rock inhomogeneity and anisotropy by explicit and implicit representation of microcracks // 52nd U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. – Seattle, Washington, USA, 17–20 June, 2018. – P. 1–11.
- Zhang Z., Du J. Reservoir characterization using perforation shots: anisotropy and attenuation // SEG International Exposition and Annual Meeting. – Anaheim, California, USA, 14–19 October, 2018. – P. 2982–2986.
- Kolbikov S., Kuznetsova Y., Smirnov A. Method of anisotropy modeling and its application to hydrodynamic simulation // SPE Russian Petroleum Technology Conference. – Moscow, Russia, 15–17 October, 2018. – P. 1–9.
- Makhenko R.Y., Tarokh A. Anisotropy in the undrained pore pressure response of rock // 52nd U.S. Rock Mechanics / Geomechanics Symposium. – Seattle, Washington, USA, 17–20 June, 2018. – P. 40–51.

Заключение и выводы

Изучены анизотропные характеристики пласта Ю₁ одного из месторождений Томской области. По результатам изучения необходимо отметить, что схема расчётов остаётся такой же, как и для пласта ${\rm M_1}^3$ этого месторождения. Для оценки можно использовать гистограммы распределения, построенные на рис. 1 для большей наглядности полученной ориентировки градиентов проницаемости. Можно отметить, что на основе функции распределения вероятностей градиентов все пласты характеризуются двумя основными азимутами. Это полностью соответствует упомянутым розам-диаграммам. Обобщенные в табл. 2 результаты показывают, что преобладающая ориентация анизотропии проницаемости для всех случаев во всех зонах распределяется с северо-запада на юговосток. Но некоторые различия становятся очевидными после более детального изучения данных. Видно, что для пласта Ю₁¹ первый максимум азимута анизотропии проницаемости попадает в диапазон от 110° до 140°, а второй максимум – от 310° до 330°.

- Liu S., King M.J. Improved calculation of effective permeability for pore network models using the diffuse source methodology // 81st EAGE Conference and Exhibition. – London, England, UK, 3–6 June, 2019. – P. 1–19.
- Gray D.H., Fatt I., Bergamini G. The effect of stress on permeability of sandstone cores // Society of petroleum engineers' journal. – 1963. – V. 3 – P. 95–99.
- Wannell M.J., Colley N.M., Halford F.R. The use of a new technique to determine permeability anisotropy // Society of Petroleum Engineers. – 1993. – V. 9. – P. 489–495.
- Cosan A. Measuring permeability anisotropy: the latest approach // Oilfield Review. – 1994. – V. 6. – № 4. – P. 24–35.
- Carpenter C. Better permeability estimation from wireline formation testing // Journal of Petroleum Technology. – February 2018. – V. 70. – P. 66–68.
- Pan Y., Medhat M.K., Wayne N. Fieldwide determination of directional permeabilities using transient well testing // SPE Reservoir Evaluation & Engineering. – May 2019. – V. 22. – P. 1–11.
- Al-Hadrami H.K., Teufel L.W. Influence of permeability anisotropy and reservoir heterogeneity on optimization of infill drilling in naturally fractured tight-gas Mesaverde sandstone reservoirs, San Juan Basin // SPE Low Permeability Reservoirs Symposium. – Denver, U.S.A., March 12–15, 2000. – P. 1–12.
- Алексеев А.С. Оценка чувствительности объекта AB1-3 Ватьеганского нефтяного месторождения к изменению в системе поддержания пластового давления на базе ретроспективного анализа // Наука и бизнес: пути развития. – 2019. – № 6. – С. 18–21.
- Сагитова И.М., Сагитов Д.К., Зейгман Ю.В. Оценка влияния проницаемостной неоднородности недонасыщенных нефтью пластов на изменение начальной обводненности скважинной продукции // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2020. – № 2. – С. 69–81.
- Коровин М.О. Методика количественной оценки латеральной анизотропии фильтрационно-ёмкостных свойств терригенных коллекторов на базе комплексного анализа геологогеофизических данных: дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2017. – 108 с.

Поступила: 13.01.2022 г.

Информация об авторах

Коровин М.О., кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 550.3

FEATURES OF CALCULATION OF UPPER JURASSIC TERRIGENOUS RESERVOIRS PERMEABILITY ANISOTROPY ON THE EXAMPLE OF THE OIL FORMATION

Mikhail O. Korovin, korovinmo@hw.tpu.ru

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

The relevance of the research consists in finding the ways to extend the life of the field and increase oil production. The main task is to extract as much hydrocarbons as possible. At present, a technique has been developed that makes it possible to calculate the anisotropy parameters for one of the reservoir layers. Thus, it is possible to take into account in detail the influence of anisotropy in a separate terrigenous reservoir. However, deposits are multi-layer with structural features and formation of the reservoir. Accordingly, there is a need to verify the feasibility of changing the methodology for calculating anisotropic parameters, depending on the change in the environment, under the influence of which a particular reservoir was formed. This field is multilayer, and the difference in sedimentation environments during the formation of reservoir layers is a complicating and at the same time good feature. It is possible, without changing the field, to apply the technique on other layers of the field, in particular on the J₁¹ layer. Calculations will take less time, since all information on the field is loaded and compiled. Additionally, it will be possible to get closer to creating a fully anisotropic model of the entire field and to test the operation of the methodology on a larger scale. The rapid depletion of reserves leads to the fact that it is necessary to increase the oil recovery factor and reduce the amount of residual reserves. In the near future, this problem may become more aggravated, and so far, there is time to develop a methodology for constructing anisotropic models entirely for fields, taking into account all geological and geophysical information and technological development indicators.

The aim of this work is to check whether it is possible to apply the technique for determining the parameters of permeability anisotropy in the J_1^1 layer of a previously explored field. J_1^1 layer is composed of terrigenous material and differs from J_1^3 layer in terms of sedimentation and reservoir properties.

The study object is a terrigenous layer of a deposit located geographically in Western Siberia. Upper Jurassic deposits with low porosity properties should be investigated for the possibility of extending the approach for calculating the parameters of permeability heterogeneity. **Methods.** Standard set of geophysical well logging in digital charts is used to dismember the producing formation on the packs. Petrophysical properties are determined using the relation between the core data (porosity, permeability). On the example of one of the wells the permeability distribution in the nearby wells is constructed, and the example of the formation J_1^1 shows the distribution of permeability gradients, on the basis of which the conclusions on patterns of distribution anisotropy considering the geological depositional environments were made. It was determined that for the J_1^1 layer, the algorithms for determining the parameters of the anisotropy of permeability remain the same as for the J_1^3 layer. The developed technique is confidently applied in a reservoir with a different sedimentation environment. The results are reliable and confirm the feasibility of using the methodology without making changes. It was possible to approach the creation of a three-dimensional model for the entire field, taking into account all reservoirs and the filtration of hydrocarbons. This is very important, since modern computer power allows building and calculating more and more complex models with high detail of the reservoir space.

Key words:

Permeability anisotropy, anisotropy scale, simulation modeling, terrigenous reservoir, petrophysical calculations.

REFERENCES

- Du H., Liu Y., Li X., Guan F., Sui X. Interpreting reservoir permeabilities from wireline formation test data. *Petroleum Science* and *Technology*, 2013, vol. 31, pp. 1819–1826.
- Dussan E.B.V., Yogeshwar Sharma analysis of the pressure response of a single-probe formation tester. *Society of Petroleum Engineers. Formation Evaluation*, 1992, June, pp. 151–156.
- Clavaud J.B., Maineult A., Zamora M. Rasolofosaon P., Schlitter C. Permeability anisotropy and its relations with porous medium structure. *Journal of geophysical research*, 2008, vol. 113, pp. 1–10.
- Merkulov V.P., Krasnoshchekova L.A. Study of spatial lithogenicpetrophysical heterogeneity of productive collectors of oil and gas fields *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2002, vol. 305, no. 6, pp. 296–303. In Rus.
- Tyvand P.A., Storhaug A.R.F. *Two-dimensional flow in a porous* medium with general anisotropy. Norway, Department of Mathematical Sciences and Technology, Norwegian University of Life Sciences, 2004, P. 1–12.
- Merkulov V.P., Aleksandrov D.V., Krasnoshchekova L.A., Nenakhov Yu.Ya. Litologo-petrofizicheskaya anizotropiya peschanoglinistykh kollektorov neftyanykh mestorozhdeniy [Lithologicalpetrophysical anisotropy of sandy-argillaceous reservoirs of oil fields]. *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik YUKOS*, 2004, no. 10, pp. 33–36.

- Abedi R., Clarke P.L. Modeling of rock inhomogeneity and anisotropy by explicit and implicit representation of microcracks. 52nd U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. Seattle, Washington, USA, 17–20 June, 2018. pp. 1–11.
- Zhang Z., Du J. Reservoir characterization using perforation shots: anisotropy and attenuation. *SEG International Exposition and Annual Meeting*. Anaheim, California, USA, 14–19 October, 2018. pp. 2982–2986.
- Kolbikov S., Kuznetsova Y., Smirnov A. Method of anisotropy modeling and its application to hydrodynamic simulation. SPE Russian Petroleum Technology Conference. Moscow, Russia, 15–17 October, 2018. pp. 1–9.
- Makhenko R.Y., Tarokh A. Anisotropy in the undrained pore pressure response of rock. 52nd U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. Seattle, Washington, USA, 17–20 June, 2018. pp. 40–51.
- Liu S., King M.J. Improved calculation of effective permeability for pore network models using the diffuse source methodology. 81st EAGE Conference and Exhibition. London, England, UK, 3–6 June, 2019. pp. 1–19.
- Gray D.H., Fatt I., Bergamini G. The effect of stress on permeability of sandstone cores. *Society of petroleum engineers' journal*, 1963, vol. 3, pp. 95–99.
- Wannell M.J., Colley N.M., Halford F.R. The use of a new technique to determine permeability anisotropy. *Society of Petroleum Engineers*, 1993, pp. 489–495.

- Cosan A. Measuring permeability anisotropy: the latest approaslide *Oilfield Review*, 1994, vol. 6, no. 4, pp. 24–35.
 Carpenter C. Better permeability estimation from wireline for-
- Carpenter C. Better permeability estimation from wireline formation testing. *Journal of Petroleum Technology*, February, 2018, vol. 70, pp. 66–68.
- Pan Y., Medhat M.K., Wayne N. Fieldwide determination of directional permeabilities using transient well testing. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, May, 2019, vol. 22, pp. 1–11.
- Al-Hadrami H.K., Teufel L.W. Influence of permeability anisotropy and reservoir heterogeneity on optimization of infill drilling in naturally fractured tight-gas Mesaverde sandstone reservoirs, San Juan Basin. SPE Low Permeability Reservoirs Symposium. Denver, U.S.A., March 12–15, 2000. pp. 1–12.
- 18. Alekseev A.S. Otsenka chuvstvitelnosti obekta AV1-3 Vateganskogo neftyanogo mestorozhdeniya k izmeneniyu v sisteme podderzhaniya plastovogo davleniya na baze retrospektivnogo analiza [Sensitivity assessment of the AB1-3 object of the Vatyeganskoe oil field to a change in the reservoir pressure maintenance

system based on retroprospective analysis]. Nauka i biznes: puti razvitiya, 2019, no. 6, pp. 18–21.

- Sagitova I.M., Sagitov D.K., Zeygman Yu.V. Otsenka vliyaniya pronitsaemostnoy neodnorodnosti nedonasyshchennykh neftyu plastov na izmenenie nachalnoy obvodnennosti skvazhinnoy produktsii [Evaluation of the effect of permeability heterogeneity of undersaturated reservoirs on the change in the initial water cut of well production]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Neft i* gaz, 2020, no. 2, pp. 69–81.
- 20. Korovin M.O. Metodika kolichestvennoy otsenki lateralnoy anizotropii filtratsionno-emkostnykh svoystv terrigennykh kollektorov na baze kompleksnogo analiza geologo-geofizicheskikh dannykh. Diss. Kand. nauk [Methodology for quantitative assessment of lateral anisotropy of filtration-capacity properties of terrigenous reservoirs based on a comprehensive analysis of geological and geophysical data. Cand. Diss.]. Tomsk, 2017. 108 p.

Received: 13 January 2022.

Information about the authors

Mikhail O. Korovin, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 551.732.2:56(571.5)

НОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЛЕКСНОГО ЛИТОЛОГО-ФАЦИАЛЬНОГО И БИОСТРАТИГРАФИЧЕСКОГО ИЗУЧЕНИЯ ОСИНСКОГО ГОРИЗОНТА НИЖНЕГО КЕМБРИЯ ЮГА СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ (СКВАЖИНЫ ЗАПАДНО-ЯРАКТИНСКИЕ 45, 361)

Токарев Дмитрий Александрович^{1,2},

Tokarevda@ipgg.sbras.ru

Плюснин Алексей Владимирович3,

plysnin_av@irkutskoil.ru

Терлеев Александр Анатольевич¹,

Terleevaa@ipgg.sbras.ru

- ¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. академика Коптюга, 3.
- ² Новосибирский государственный университет, Россия, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1.
- ³ ООО «ИНК»,

Россия, 664007, г. Иркутск, пр. Большой Литейный, 4.

Актуальность. Геологоразведочные работы, проводимые в последнее время по всей Лено-Тунгусской нефтегазоносной провинции, делают исследования карбонатов осинской подсвиты особенно актуальными, поскольку они позволяют установить закономерности образования ловушек углеводородов.

Цель исследования – изучение осевой и склонной части крупного Ичединско-Большетирского барьерного рифа на юге Непско-Ботуобинской антеклизы.

Объекты: карбонатные породы Ичединско-Большетирского барьерного рифа, средней (осинской) подсвиты усольской свиты томмотского яруса нижнего кембрия, вскрытые скважинами № 45 и 361 Западно-Ярактинской площади.

Методы: комплекс ГИС, детальное литолого-седиментологическое описание 90 и 33 м керна соответственно, секвенсстратиграфический анализ, петрографический анализ 120 образцов и изучение палеонтологических остатков, отобранных из керна скважин Западно-Ярактинской площади.

Результаты. Были выделены семь литологических типов пород, закономерно сменяющие друг друга по разрезу. Накопление пород осинского пласта происходило в следующем диапазоне фациальных обстановок (по направлению от бассейна осадконакопления к континенту): верхняя сублитораль, литораль, супралитораль (себха). Образование карста происходило в субаэральных условиях. Проведенный биостратиграфический анализ подтверждает нижнекембрийский возраст. В скважине № 45 обнаружены остатки известковых водорослей Renalcis polymorphum, Renalcis levis, Botomaella zelenovii, Epiphyton zonatum, Epiphyton celsum, Epiphyton scapulum, Chabakovia ramosa, Chabakovia nodosa, а также мелкораковинная фауна Namacalathus sp. В скважине № 361 были обнаружены и определены известковые водоросли Renalcis polymorphum, Renalcis granosus, Renalcis sp., Renalcis levis, Renalcis seriata, Korilophyton sp., Chabakovia sp. и мелкораковинная фауна (SSF) рода Namacalathus sp. В разрезе подсвиты выделены три секвенса четвертого порядка. Границы секвенса фиксируют субаэральные перерывы, представленные в керне седиментационной брекчией, зонами карста. Наибольшее по амплитуде и продолжительности понижение уровня моря приурочено к границе второго и третьего секвенса. Известковые водоросли, изученные из керна скважин, являлись основными рифостроителями раннекембрийских органогенных построек. Для этих организмов характерны небольшие глубины литорали, что хорошо согласуется с результатами проведенного питолого-фациального исследования.

Ключевые слова:

Кембрий, осинский горизонт, Восточная Сибирь, археоциаты, цианобактерии, органогенные постройки, секвенс-стратиграфический анализ.

Введение

Активная геологоразведка на Непско-Ботуобинской антеклизе дает возможность проводить детальные литолого-фациальные и биостратиграфические исследования. На современном этапе исследования у геологов есть явные преимущества – высокий процент поднимаемого керна из интересующего стратиграфического интервала. Одним из основных объектов поиска углеводородов в карбонатном коллекторе являются породы осинского продуктивного горизонта. Работа является продолжением цикла работ, посвящённых строению барьерного Ичединско-Большетирского рифа [1–3].

Объект и методы исследования

Объект изучения – карбонатные породы Ичединско-Большетирского барьерного рифа [4, 5] средней (осинской) подсвиты (горизонт) усольской свиты томмотского яруса нижнего кембрия, вскрытые скважинами № 45 и 361 Западно-Ярактинской площади (ЗЯ-45 и ЗЯ-361), расположенной на юге Непско-Ботуобинской антеклизы. В административном плане скважины находятся на севере Иркутской области в 80 км севернее пос. Верхнемарково. Согласно фациальному районированию кембрийских отложений [6], территория исследований относится к Непской зоне Ангаро-Непского фациального района НепскоБотуобинской антеклизы юга Сибирской платформы (рис. 1). Осинская подсвита (продуктивный горизонт) в скважине ЗЯ-45 имеет толщину 101 м, в ЗЯ-361 – 37 м и почти в полном объеме охарактеризована керновым материалом. Это обстоятельство позволило с высокой степенью достоверности провести литологические, биостратиграфические исследования, выполнить фациальные реконструкции и секвенсстратиграфический анализ разреза.

В основу работы легла комплексная интерпретация обширного фактического материала, включающего: комплекс ГИС, детальное литолого-седиментологическое описание 90 и 33 м керна соответственно, секвенсстратиграфический анализ, петрографический анализ 120 образцов и изучение палеонтологических остатков, отобранных из керна скважин.

При литологических исследованиях применялись общепринятые классификации по вещественному со-

ставу, структурно-генетическим признакам карбонатных пород, изложенные в работах отечественных и зарубежных авторов, таких как С.Г. Вишняков [7], В.Н. Киркинская и др. [8], В.Г. Кузнецов [9], А.В. Маслов [10], Г.И. Теодорович [11], R.J. Danham [12], E. Flugel [13].

Фациальные реконструкции осуществлялись на основе седиментационых моделей, разработанных известными специалистами в области карбонатного осадконакопления: Дж.Л. Уилсона [14], G. Einsele [15], G. Stanley [16], В.А. Жемчуговой [17], В.Г. Кузнецов и др. [18].

Для воссоздания эволюции бассейна применен секвенс-стратиграфический анализ, направленный на выявление признаков эвстатических изменений уровня моря. При секвенс-стратиграфическом анализе разреза авторы руководствовались работами О.П. Ковалевского, Л.С. Маргулиса [19], О. Catuneanu [20, 21].



Рис. 1. Местоположение изученных скважин на карте фациального районирования Иркутско-Байкитской области [6]. Границы: 1 – районов; 2 – зон; 3 – административные; 4 – скважины на рисунках. Зоны: 1.1 – Ангарская, 1.2 – Непская, 1.3 – Приленская; 2.1 – Тасеевская, 2.2 – Богучанская, 2.3 – Ковинская, 2.4 – Тайнинская; 3.1 – Нижнеангарская, 3.2 – Байкитская

Fig. 1. Location of the studied wells on the map of the facies zoning of the Irkutsk-Baykit region [6]. Boundaries: 1 – districts; 2 – zones; 3 – administrative; 4 – wells in the figures. Zones: 1.1 – Angarskaya, 1.2 – Nepskaya, 1.3 – Prilenskaya; 2.1 – Taseevskaya, 2.2 – Boguchanskaya, 2.3 – Kovinskaya, 2.4 – Taininskaya; 3.1 – Nizhneangarskaya, 3.2 – Baykitskaya

Литолого-фациальное строение

В изученных разрезах осинского горизонта выделено восемь типов пород, закономерно сменяющих друг друга по разрезу снизу вверх и соответствующих различным фациальным обстановкам мелководного шельфа. Известняки доломитистые до доломитовых, темносерые и коричневато-серые, водорослевые и строматолитовые со структурой баундстоун, сложены различными цианобактериальными образованиями, формирующими серию мелкомасштабных построек биогермного типа, нарастающих друг на друга.

- Известняки доломитистые до доломитовых, коричневые и темно-коричневые, реликтововодорослевые со структурой баундстоун, волнисто-пологослоистые, сформированные на обломочном (микрофитолитовом) карбонатном субстрате, периодически подвергавшиеся осушению. О регулярных субаэральных экспозициях свидетельствуют трещины синерезиса, выполненные галитом, а также рассеянная сульфатизация, интенсивная доломитизация и кавернозность.
- Доломиты известковистые до известняков, темнокоричневые и коричневые, микрофитолитовые со структурой грейнстоун, слабо волнистопологослоистые.
- Доломиты известковые до известняков доломитистых, кристаллические, коричневато-серые, реликтово мелкообломочные со структурой грейнстоун, тонко-параллельнослоистые, однонаправленно-косослоистые, участки с деформационными текстурами, слабо брекчированые.
- 5. Карстовая щебеночно-глыбовая брекчия известняков доломитистых водорослевых. Породы представлены закарстованными биогермными водорослевыми известняками, интенсивно разбитыми трещинами и щелевидными каверновыми полостями на отдельные блоки.
- Доломиты темно-коричневые, плоско-галечные конгломераты, косослоистые, сложенные плоскими (от 1 до 5 см в длину) обломками микритовых и микрофитолитовых доломитов, погруженных в сильно битуминизированный доломитоглинистый матрикс.
- Ангидриты и ангидрито-доломиты серые, светлосерые, голубовато-серые, яснокристаллические, желваково и тонкослоистые, плотные, крепкие.
- 8. Каменные соли белые, розовато-серые, красновато-серые и темно-серые, разнокристаллические, преимущественно крупнокристаллические, массивные и полосчатые, участками с ориентированными интракластами аргиллита и карбонатных пород размером от 0,1 до 5 см, плотные, крепкие. В разрезе осинской подсвиты галит выполняет крупные меж-пустотные и меж-органогенные поры, каверны и пещеристые полости. Также он приурочен к карстовым полостям и трещинам различного генезиса.

Накопление пород осинского пласта происходило в следующем диапазоне фациальных обстановок (по направлению от бассейна осадконакопления к континенту):

- верхняя сублитораль, для нее характерны породы со структурой баундстоун;
- литораль (приливно-отливная равнина), для нее характерны породы со структурой грейнстоун;
- супралитораль (себха), представлена ангидритами и каменными солями.

Карстовая щебеночно-глыбовая брекчия и доломитовые плоско-галечные конгломераты приурочены к этапам выхода рифогенных пород в субаэральные условия. Каждая фациальная зона характеризуется специфичным комплексом структурно-генетических типов пород (описание которых дано выше), отражающим условия осадконакопления. Обозначенный фациальный ряд менялся в течение осинского времени. Изученные скважины представляют два типа разреза барьерного рифа: осевой, характеризующийся повышенными мощностями отложений скв. 45, и склоновый – с минимальными мощностями скв. 361. Особенности их строения будут рассмотрены далее.

Секвенс-стратиграфическая последовательность

В разрезе скважин 45 и 361 выделяется три секвенса четвертого порядка (рис. 2-4). Секвенс первый SQ1. Подошва секвенса в изученных скважинах проходит по подошве солей, несогласно перекрывающих нижележащие доломиты нижней подсвиты усольской свиты. Системный тракт стадии падения уровня моря (Falling Stage System Tract – FSST) представлен солями супралиторали. Вышележащие доломиты глинистые, неравномерно сульфатизированные брекчиевидные приурочены к тракту низкого стояния уровня моря (Lowstand System Tract – LST), в подошве ограничены секвенс-стратиграфической границей. Трансгрессивная поверхность проведена в подошве приливно-отливного комплекса, представленного доломитами с реликтовой структурой грейнстоун в скв. 45 и доломитами плоско-галечными в скв. 361. Отложения трансгрессивного тракта (Transgressive System Tract - TST) в разрезе скв. 45 представлены доломитами известковистыми, микрофитолитовыми, слоистыми (фация приливно-отливной отмели). В разрезе скв. 361 - доломитами водорослевыми, в верх по разрезу переходящими в микрофитолитовые (мелкие холмовидные постройки на приливно-отливной отмели). Выше залегают отложения тракта высокого стояния уровня моря (Highstand system tract – HST), представленные одиночными водорослевыми постройками холмовидного, биогермного типа. В кровле наблюдаются признаки субаэральной экспозиции. Разрез скв. 361 имеет схожее строение. Отличия заключаются в преобладании водорослевых построек с ламинарной слоистостью (строматолитов).

Формирование отложений на данном этапе происходило в условиях верхней и нижней литоралей, временами сменяющимися на супралиторальные. Видна разница в темпах роста органогенных построек осевой и склоновой части, что связано с преобладанием водорослей в осевом разрезе.

Секвенс второй SQ2. Изученные разрезы скважин имеют схожее строение. Подошва секвенса проходит по слабо закарстованной поверхности водорослевых карбонатов тракта высокого стояния уровня моря SQ1. Отложения тракта низкого стояния уровня моря представлены доломитами плоско-галечными. Трансгрессивный тракт представлен отложениями приливно-отливной отмели. В скв. 361 наблюдается наименьшая мощность отложений тракта. На этапе высокого стояния уровня моря формировались довольно мощные микробиальные постройки, последовательно нарастающие друг на друга, эпизодически выходившие под уровень субаэральной экспозиции. Наибольшая амплитуда понижения уровня и продолжительность субаральной экспозиции фиксируется на границе второго и третьего секвенса, где мощности внутририфового карста составляет порядка 16 м в осевой части и 10 м в склоновой части.

Второй цикл формирования отложений начался с понижения относительного уровня моря (ОУМ), произошла смена условий осадконакопления с подприливных на супралиторальные. Это привело к формированию карста на этапе субаэральной экспозиции. На трансгрессивном этапе формируется приливно-отливная отмель, постепенно заселяемая строматолитами. Дальнейшее расширение морского бассейна и перекрытие водным слоем областей сноса в условиях высокого положения ОУМ привели к образованию обширной мелководной зоны, где развивались водорослевые образования, накопление которых в результате быстрого роста, превышающего темп погружения дна бассейна, способствовало заполнению пространства аккомодации и частому выходу пород в субаэральные условия, что привело к образованию карста.

Секвенс третий SQ3. Подошва секвенса проходит по закарстованной поверхности водорослевых карбонатов тракта высокого стояния уровня моря SQ2. Отложения тракта низкого стояния уровня моря представлены карстовой щебеночно-глыбовой брекчией, которая образовалась в период осушения и развития карста нижележащих водорослевых известняков тракта высокого стояния уровня моря SQ2. Трансгрессивной тракт в разрезе скв. 361 представлен обломочными зернистыми грейнстоунами. В разрезе скв. 45 трансгрессивный тракт не выделяется. Последующая, относительно быстрая трансгрессия привела к агградации рифа с незначительной проградацией на этапе высокого стояния уровня моря.



Рис. 2. Литолого-стратиграфический разрез скважины Западно-Ярактинской 45 с точками палеонтологических находок

Fig. 2. Lithological and stratigraphic section of the West Yarakta well 45 with points of paleontological finds

Третий цикл седиментации также начинается с тракта низкого положения ОУМ. Первыми обмелению и частичному осушению могли подвергнуться краевые и более рельефно выраженные части бассейна. В результате последующей трансгрессии возникли благоприятные условия для формирования ядра рифа в осевой части разреза. В склоновой части наблюдаются обломочные зернистые образования, перекрытые микробиально-водорослевыми породами, характеризующие верхний слон барьерного рифа.



Puc. 3. Условные обозначения к разрезам изученных скважин *Fig. 3.* Symbols for the sections of the studied wells



Рис. 4. Литолого-стратиграфический разрез скважины Западно-Ярактинской 361 с точками палеонтологических находок

Fig. 4. Lithological and stratigraphic section of the West Yarakta well 361 with points of paleontological finds

- Таблица 1. Палеонтологические находки в разрезе скважины Западно-Ярактинская 45. Фиг. 1. Namacalathus sp. ил. № 110540 гл. 2488.72; Фиг. 2. Namacalathus sp. ил. № 110540 гл. 2488.72; Фиг. 3. Chabakovia ramosa ил. № 110675 гл. 2511.40; Фиг. 4. Namacalathus sp. ил. № 110540 гл. 2488.72; Фиг. 5. Renalcis levis ил. № 110101 гл. 2521.74; Фиг. 6. Epiphyton scapulum. ил. № 110684 гл. 2514.36; Фиг. 7. Botomaella zelenovii ил. № 110645 гл. 2503.54; Фиг. 8. Epiphyton celsun. ил. № 110696 гл. 2520.06; Фиг. 9. Epiphyton zonatum. ил. № 110696 гл. 2520.06; Фиг. 10. Renalcis polymorphum. ил. № 110675 гл. 2511.40; Фиг. 11. Chabakovia nodosa ил. № 110673 гл. 2510.91; Фиг. 12. Renalcis levis ил. № 110101 гл. 2521.74
- Table 1. Paleontological finds in the section of the Ichedinskaya 45 well. Fig. 1. Namacalathus sp. schl. no. 110540 slide 2488.72; Fig. 2. Namacalathus sp. schl. no. 110540 slide 2488.72; Fig. 3. Chabakovia ramosa schl. no. 110675 slide 2511.40; Fig. 4.Namacalathus sp. schl. no. 110540 slide 2488.72; Fig. 5. Renalcis levis schl. no. 110101 chap. 2521.74; Fig. 6. Epiphyton scapulum. schl. no. 110684 slide 2514.36; Fig. 7. Botomaella zelenovii schl. no. 110645 slide 2503.54; Fig. 8. Epiphyton celsun. schl. no. 110696 slide 2520.06; Fig. 9. Epiphyton zonatum. schl. no. 110696 slide 2520.06; Fig. 10. Renalcis polymorphum. schl. no. 110675 slide 2511.40; Fig. 11. Chabakovia nodosa schl. no. 110673 slide 2510.91; Fig. 12. Renalcis levis schl. no. 110101 chap. 2521.74



- Таблица 2. Палеонтологические находки в разрезе скважины Западно-Ярактинская 361. Фиг. 1. Renalcis polymorphum ил. № 118419 гл. 2572.85; Фиг. 2. Renalcis granosus ил. № 118421 гл. 2573.24; Фиг. 3. Renalcis sp ил. № 118424 гл. 2574.23; Фиг. 5. Renalcis levis ил. № 118424 гл. 2574.23; Фиг. 5. Renalcis levis ил. № 118424 гл. 2574.23; Фиг. 6. Namacalathus sp. ил. № 118498 гл. 2567.65; Фиг. 7. Korilophyton sp ил. № 118391 гл. 2564.53; Фиг. 8. Renalcis levis. ил. № 118419 гл. 2572.89; Фиг. 9. Chabakovia sp. ил. № 118419 гл. 2572.89; Фиг. 10. А Chabakovia sp., Б Renalcis seriata. ил. № 118391 гл. 2564,53; Фиг. 11. Renalcis polymorphum. ил. № 118391 гл. 2564.53; Фиг. 12. Renalcis granosus. ил. № 118392 гл. 2565.44
- Table 2. Paleontological finds in the section of the Ichedinskaya 361 well. Fig. 1. Renalcis polymorphum schl. no. 118419 slide 2572.85; Fig. 2. Renalcis granosus schl. no. 118421 slide 2573.24; Fig. 3. Renalcis sp schl. no. 118392 slide 2565.44; Fig. 4. Chabakovia sp schl. no. 118424 slide 2574.23; Fig. 5. Renalcis levis schl. no. 118424 slide 2574.23; Fig. 6. Namacalathus sp. schl. no. 118398, slide 2567.65; Fig. 7. Korilophyton sp schl. no. 118419 slide 2572.89; Fig. 8. Renalcis levis. schl. no. 118419 slide 2572.89; Fig. 9. Chabakovia sp. schl. no. 118419 slide 2572.89; Fig. 9. Chabakovia sp. schl. no. 118419 slide 2572.89; Fig. 9. Chabakovia sp. schl. no. 118419 slide 2572.89; Fig. 10. A Chabakovia sp., *E* Renalcis seriata. schl. no. 118391 slide 2564.53; Fig. 11. Renalcis polymorphum. schl. no. 118391 slide 2564.53; Fig. 12. Renalcis granosus. schl. no. 118392 slide 2565.44



Биостратиграфия

В результате микроскопического изучения биоты керна скважин Западно-Ярактинской площади (скважины №№ 45, 361) были выделены комплексы органических остатков (известковые водоросли, мелкораковинная фауна (Small Shelly Fossils - SSF)). Проведен палеонтологический и биостратиграфический анализ, который подтвердил раннекембрийский возраст вмещающих отложений. Впервые в отложениях, вскрытых скважиной Западно-Ярактинская 45, обнаружены и определены остатки известковых водорослей (цианобактерий). Наиболее характерные виды представлены в таблице: Renalcis polymorphum (табл. 1, фиг. 10), Renalcis levis (табл. 1, фиг. 5, 12), Botomaella zelenovi (табл. 1, фиг. 7), Epiphyton zonatum Korde (табл. 1, фиг. 9), Epiphyton celsum (табл. 1, фиг. 8), Epiphyton scapulum (табл. 1, фиг. 6), Chabakovia ramosa (табл. 1, фиг. 3), Chabakovia nodosa (табл. 1, фиг. 11), а также мелкораковинная фауна Namacalathus sp (табл. 1, фиг. 1, 2, 4).

В скважине № 361 были обнаружены и определены известковые водоросли Renalcis polymorphum (табл. 2, фиг. 1, 11), Renalcis granosus (табл. 2, фиг. 2, 12), Renalcis sp (табл. 2, фиг. 3), Renalcis levis (табл. 2, фиг. 5, 8), Renalcis seriata (табл. 2, фиг. 10(А)), Korilophyton sp (табл. 2, фиг. 7), Chabakovia sp (табл. 2, фиг. 4, 9, 10 (А)) и SSF Namacalathus Grotzinger (табл. 2, фиг. 6).

Заключение

Литолого-фациальные исследования позволили выделить семь типов пород, характеризующих различные обстановки мелководного шельфа осинского

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Первые результаты комплексного литолого-фациального и биостратиграфического изучения нижнекембрийских отложений юга Сибирской платформы / Д.А. Токарев, А.В. Плюснин, А.А. Терлеев, Н.А. Иванова, А.В. Липянина, Р.Р. Ибрагимов // Геология рифов: материалы всероссийского литологического совещания. – Сыктывкар: Изд-во ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2020. – С. 118–122.
- Токарев Д.А., Терлеев А.А., Плюснин А.В. Известковые водоросли (цианобактерии) усольской свиты нижнего кембрия юга Сибирской платформы (новые данные по скв. Ичединская № 45) // Теоретические и прикладные аспекты палеонтологии: материалы LXVII сессии палеонтологического общества при РАН. – СПб: Изд-во «ВСЕГЕИ», 2021. – С. 82–84.
- Новые результаты комплексного литолого-фациального и биостратиграфического изучения осинского горизонта нижнего кембрия юга Сибирской платформы (Большетирская скв. 7) / Д.А. Токарев, А.В. Плюснин, А.А. Терлеев, Н.А. Иванова, И.В. Вараксина, А.В. Липянина // Геология и минеральносырьевые ресурсы Сибири. – 2021. – № 2. – С. 11–20.
- Никулина М.Ю., Мышевский Н.В., Никулин Е.В. Классические и аномальные объекты, выявленные в результате геологоразведочных работ на территории Иркутской нефтяной компании // Нефтяное хозяйство. – 2020. – № 9. – С. 26–29.
- Особенности геологического строения Ичединского нефтяного месторождения / И.В. Сабанчин, А.Н. Афраков, С.Ф. Мулявин, Н.И. Зуева, Г.В. Лотушкина, И.Г. Стешенко, Н.А. Промзелева, Т.Н. Моисеева // Горные ведомости. – 2015. – № 8. – С. 66–74.
- Мельников Н.В. Венд-кембрийский солеродный бассейн Сибирской платформы. – Новосибирск: Изд-во «СО РАН. 2009. – 148 с.

палеобассейна: от приливно-отливных карбонатных отмелей литорали до органогенной постройки на сублиторали.

В разрезе скважин выделены три секвенса четвертого порядка, отождествлённые с галит-сульфатнокарбонатным осадконакоплением, которое происходило на относительно мелководном шельфе. Развитие секвенсов связано с углублением шельфа при расширении Палеосибирского океана. Мелководные условия приводили к заполнению пространства аккомодации за счет быстрого роста водорослей, формировавших органогенные постройки, и выходу отложений в супралиторальные условия. Наибольшее по амплитуде и продолжительности понижение уровня моря впервые выявлено на границе второго и третьего секвенса. Здесь стоит ожидать хорошие коллекторские свойства, связанные с зонами внутририфового карста.

Мелкораковинная фауна рода Namacalathus Grodzinger ранее была широко известна из эдиакарских отложений по всему миру [22–27]. Впервые нами она была описана совместно с археоциатами (скважина Большетирская № 7) [3], что свидетельствует и о ее раннекембрийском возрасте.

Известковые водоросли, изученные из керна скважин Западно-Ярактинской площади, являлись основными рифостроителями раннекембрийских органогенных построек (биостромы, биогермы, биогермные массивы, рифогенные образования) [28]. Для этих организмов характерны небольшие глубины (до 100 м, фотическая зона) литорали – сублиторали, что хорошо согласуется с результатами проведенного литолого-фациального исследования.

- Вишняков С.Г. Генетические типы доломитовых пород северо-западной окраины Русской платформы // Труды Геол. института АН СССР. – 1956. – № 4. – С. 209–225.
- 8. Киргинская В.Н. Смехов. Е.М. Карбонатные породы коллекторы нефти и газа. Л.: Изд-во «Недра», 1981. 255 с.
- Кузнецов В.Г. Литология основы общей (теоретической) литологии. – М.: Изд-во «Научный мир», 2011. – 360 с.
- Маслов А.В. Осадочные породы: методы изучения и интерпретация полученных данных. – Екатеринбург: УГГУ, 2005. – 289 с.
- Теодорович Г.И. Аутигенные минералы осадочных пород. М.: Изд-во «Гостоптехиздат», 1958. – 572 с.
- Dunham R.J. Classification of carbonate rocks according to deposition texture // Classification of Carbonate rocks. Simposium Amer. Assoc. Petrol. Geol. Mem. – Tulsa, 1962. – P. 108–121.
- Flügel E., Flügel-Kahler E. Phanerozoic reef evolution: basic questions and data base // Facies. – 1992. – V. 26. – P. 167–277.
- Уилсон Дж.Л. Карбонатные фации в геологической истории. М.: Изд-во «Недра», 1980. – 463 с.
- Einsele G. Sedimentary basins, evolution, facies and sediment budget. – Berlin: Springer-Verlag, 2000. – 792 p.
- Stanley G. The history and sedimentology of ancient reef systems. – New York: Kluwer Academic, 2001. – 458 p.
- Жемчугова В.А. Практическое применение резервуарной седиментологии при моделировании углеводородных систем. – М.: Изд-во «РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина», 2014. – 342 с.
- Древние карбонатные толщи Восточной Сибири и их нефтегазоносность / В.Г. Кузнецов, Л.Н. Илюхин, О.В. Постникова, В.В. Бакина, А.Б. Горина, С.А. Дмитриевский, Н.М. Скобелева, Г.И. Тихомирова, В. Сухы, Л.Н. Фомичева. – М.: Изд-во «Науч. Мир», 2000. – 104 с.
- Ковалевский О.П., Маргулис Л.С. Дополнение 1. Секвенсстратиграфические подразделения // Дополнения к стратигра-

фическому кодексу России. – СПб: Изд-во «ВСЕГЕИ», 2000. – С. 59–66.

- 20. Catuneanu O. Principles of sequence stratigraphy. Amsterdam: Elsevier, 2006. 375 p.
- Sequence stratigraphy: methodology and nomenclature / O. Catuneanu, W.E. Galloway, C.G.S.t.C. Kendall, A.D. Miall, H.W. Posamentier, A. Strasser, M.E. Tucker // Newsletters on Stratigraphy. - 2011. - V. 44. - P. 173-245.
- 22. Разрез переходных венд-кембрийских отложений восточной части Западно-Сибирской геосинеклизы (по результатам бурения параметрической скважины Восток-3) / А.Э. Конторович, А.И. Варламов, Д.В. Гражданкин, Г.А. Карлова, А.Г. Клец, В.А. Конторович, С.В. Сараев, А.А. Терлеев, С.Ю. Беляев, И.В. Вараксина, А.С. Ефимов, Б.Б. Кочнев, К.Е. Наговицин, А.А. Постников, Ю.Ф. Филиппов // Геология и геофизика. 2008. № 12. С. 1238–1247.
- 23. Особенности строения разреза вендско-нижнекембрийских отложения Сибирской платформы, вскрытых Чайкинской параметрической скважины 279 / Г.Г. Шемин, А.А. Терлеев, А.А. Постников, Д.А. Токарев, Б.Б. Кочнев // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2011. – № 4. – С. 21–29.

- Grotzinger J.P., Watters W.A., Knoll A.H. Calcified metazones in thrombolite-stromatolite reefs in the terminal Proterozoic Nama Group, Namibia // Paleobiology. – 2000. – V. 26. – P. 334–359.
- Hofmann H.J., Mountjoy E.W. Namacalathus-Cloudina assemblage in Neoproterozoic Miette Group (Byng Formation), British Columbia: Canadas oldest shelly fossils // Geology. – 2001. – V. 29. – P. 1091–1094.
- Cloudina-Namacalathus-Kolophyton association in the Vendian of Altai-Sayan Foldbelt (Siberia) / A.A. Terleev, A.A. Postnikov, D.A. Tokarev, O.V. Sosnovskaya, G.N. Bagmet // Neoproterozoic sedimentary basins: stratigraphy, geodynamics and petroleum potential: Proc. of the International conf. – Novosibirsk, 30 July – 02 August, 2011. – C. 96–98.
- Известковые водоросли и строматолиты: систематика, биостратиграфия, фациальный анализ: сборник научных трудов ИГиГ СО АН СССР / отв. ред. В.Н. Дубатолов, Т.А. Москаленко. – Новосибирск: Изд-во «Наука», 1988. – 228 с.

Поступила 01.04.2022 г.

Информация об авторах

Токарев Д.А., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Института нефтегазовой геологии и геофизики; старший преподаватель кафедры исторической геологии и палеонтологии Геологогеофизического факультета Новосибирского государственного университета.

Плюснин А.В., седиментолог, департамент геологии и разработки месторождений, ООО «ИНК».

Терлеев А.А., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Института Нефтегазовой Геологии и геофизики.

UDC 551.732.2:56(571.5)

NEW RESULTS OF A COMPREHENSIVE LITHOLOGICAL-FACIES AND BIOSTRATIGRAPHIC STUDY OF THE OSINSKY HORIZON OF THE LOWER CAMBRIAN IN THE SOUTH OF THE SIBERIAN PLATFORM (WELLS WEST YARAKTA 45, 361)

Dmitry A. Tokarev^{1,2},

Tokarevda@ipgg.sbras.ru

Aleksey V. Plyusnin³, A.V.Plyusnin@mail.ru

Aleksandr A. Terleev¹,

TerleevAA@ipgg.sbras.ru

- Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 3, Koptyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.
- ² Novosibirsk State University,
 - 1, Pirogov street, Novosibirsk, 630090, Russia.
- ³ LLC «INK»,

4, Bolshoy Liteiny avenue, Irkutsk, 664007, Russia.

Relevance. Geological prospecting work carried out recently throughout the Lena-Tunguska oil and gas province makes the study of the Osinskaya subformation carbonates especially relevant, since they allow establishing the patterns of hydrocarbon traps formation. **The goal** of the research is to study the axial and inclined part of the large Ichedinsko-Bolshetirsky barrier reef in the south of the Nepa-Botuobinsky anteclise.

Objects: carbonate rocks of the Ichedinsko-Bolshetirskiy barrier reef, middle (Osinskaya) subformation of the Usolskaya suite of the Tommot stage of the Lower Cambrian, penetrated by wells no. 45 and 361 of the West Yarakta area.

Methods: GIS complex, detailed lithological-sedimentological description of 90 and 33 m of core, respectively, sequence-stratigraphic analysis, petrographic analysis of 120 samples and the study of fossils sampled from West Yarakta area core.

Results. The authors have identified seven lithological types of rocks, consistently alternating each other along the section. The accumulation of rocks of the Osinskaya stratum occurred in the following range of facial environments (in the direction from the sedimentation basin to the continent): upper sublittoral, littoral, supralittoral (sebkha). Karst was formed under subaerial conditions. The conducted biostratigraphic analysis confirms the Lower Cambrian age. In the well no. 45 the remains of calcareous algae: Renalcis polymorphum, Renalcis levis, Botomaella zelenovii, Epiphyton zonatum, Epiphyton celsum, Epiphyton scapulum, Chabakovia ramosa, Chabakovia nodosa, as well as small shell fauna Namacalathus sp., were discovered. In the well no. 361 calcareous algae Renalcis polymorphum, Renalcis granosus, Renalcis sp., Renalcis levis, Renalcis seriata, Korilophyton sp, Chabakovia sp., were found and SSF Namacalathus sp. was identified. In the section of the subformation, three fourth-order sequences were identified. The sequencing boundaries are fixed by subaerial hiatuses, represented in the core by sedimentation breccia, karst zones. The largest, in terms of amplitude and duration, lowering of sea level is confined to the border of the second and third sequences. Calcareous algae studied from borehole cores were the main reef builders of the Early Cambrian organogenic structures. These organisms are characterized by shallow depths of the littoral – sublittoral, which is in accordance with the lithological-facies study results.

Key words:

Cambrian, Osinskaya subformation, Eastern Siberia, archaeocyaths, cyanobacteria, organogenic structures, sequence-stratigraphic analysis.

REFERENCES

- Tokarev D.A., Plyusnin A.V., Terleev A.A., Ivanova N.A., Lipyanina A.V., Ibragimov R.R. Pervye rezultaty kompleksnogo litologofatsialnogo i biostratigraficheskogo izucheniya nizhnekembriyskikh otlozheniy yuga Sibirskoy platformy [The first results of a complex lithological-facies and biostratigraphic study of the Lower Cambrian sediments of the southern Siberian platform]. *Geologiya rifov. Materialy vserossiyskogo litologicheskogo soveshchaniya* [Geology of reefs. Materials of the All-Russian lithological meeting]. Syktyvkar, IG Komi UB RAS Publ., 2020. pp. 118–122.
- 2. Tokarev D.A., Terleev A.A., Plyusnin A.V. Izvestkovye vodorosli (tsianobakterii) usolskoy svity nizhnego kembriya yuga Sibirskoy platformy (novye dannye po skv. Ichedinskaya № 45) [Calcareous algae (cyanobacteria) of the Usol formation of the Lower Cambrian of the southern Siberian Platform (new data on well Ichedinskaya No. 45)]. Teoreticheskie i prikladnye aspekty paleontologii. Materialy LXVII sessii paleontologicheskogo obshchestva pri RAN [Theoretical and applied aspects of paleontology. Materials of the

LXVII session of the Paleontological Society at the Russian Academy of Sciences]. St. Petersburg, VSEGEI Publ., 2021. pp. 82–84.

- Tokarev D.A., Plyusnin A.V., Terleev A.A., Ivanova N.A., Varaksina I.V., Lipyanina A.V. New results of complex lithological-facies and biostratigraphic study of the Osinsky horizon of the Lower Cambrian of the southern Siberian platform (well Bolshetirskaya no. 7). *Geology and mineral resources of Siberia*, 2021, vol. 2, pp. 11–20. In Rus.
- Nikulina M.Yu., Myshevsky N.V., Nikulin E.V. Classical and anomalous objects identified as a result of geological exploration on the territory of the Irkutsk Oil Company. *Oil economy-Oil industry*, 2020, vol. 9, pp. 26–29. In Rus.
- Sabanchin I.V., Afrakov A.N., Mulyavin S.F., Zueva N.I., Lotushkina G.V., Steshenko I.G., Promzeleva N.A., Moiseeva T.N. Features of the geological structure of the Ichedinsky oil field. *Mining* statements, 2015, vol. 8, pp. 66–74. In Rus.
- Mel'nikov N.V. Vend-kembriyskiy solerodny basseyn Sibirskoy platform [Vendian-Cambrian salt-bearing basin of the Siberian platform]. Novosibirsk, SO RAN Publ., 2009. 148 p.

- Vishnyakov S.G. Geneticheskie tipy dolomitovykh porod severozapadnoy okrainy Russkoy platformy [Genetic types of dolomite rocks of the northwestern margin of the Russian Platform]. *Proceedings of the Geological Institute of the USSR Academy of Sciences*, 1956, vol. 4, pp. 209–225.
- Kirkinskaya V.N., Smekhov E.M. Karbonatnye porody kollektory nefti i gaza [Carbonate rocks – reservoirs of oil and gas]. Leningrad, Nedra Publ., 1981. 255 p.
- Kuznetsov V.G. Litologiya osnovy obshchey (teoreticheskoy) litologii [Lithology – fundamentals of general (theoretical) lithology]. Moscow, Nauchniy mir Publ., 2011. 360 p.
- Maslov A.V. Osadochnye porody: metody izucheniya i interpretatsiya poluchennykh dannykh [Sedimentary rocks: methods for studying and interpreting the data obtained]. Ekaterinburg, UGGU Publ., 2005. 289 p.
- Teodorovich G.I. Autigennye mineraly osadochnykh porod [Autigenic minerals of sedimentary rocks]. Moscow, Gostoptehizdat Publ., 1958. 572 p.
- Dunham R.J. Classification of carbonate rocks according to deposition texture. *Classification of Carbonate rocks. Simposium Amer. Assoc. Petrol. Geol. Mem.* Tulsa, 1962. pp. 108–121.
- Flugel E. Microfacies of carbonate rocks: analysis, interpretation and application. Berlin, Springer-Verlag Inc., 2004. 976 p.
- Wilson J.L. Karbonatnye fatsii v geologicheskoy istorii [Carbonate facies in geological history]. Moscow, Nedra Publ., 1980. 463 p.
- Einsele G. Sedimentary basins: evolution, facies and sediment budget. Berlin, Springer-Verlag Publ., 2000. 792 p.
- Stanley G. The history and sedimentology of ancient reef systems. New York, Kluwer Academic, 2001. 458 p.
- Zhemchugova V.A. Prakticheskoe primenenie rezervuarnoy sedimentologii pri modelirovanii uglevodorodnykh sistem [Practical application of reservoir sedimentology in modeling of hydrocarbon systems]. Moscow, Gubkin Russian State University of Oil and Gas Publ., 2014. 342 p.
- Kuznetsov V.G., Ilyukhin L.N., Postnikova O.V., Bakina V.V., Gorina A.B., Dmitrievsky S.A., Skobeleva N.M., Tikhomirova G.I., Sukhy V., Fomicheva L.N. *Drevnie karbonatnye tolshchi Vostochnoy Sibiri i ikh neftegazonosnost* [Ancient carbonate strata of Eastern Siberia and their oil and gas potential]. Moscow, Nauchniy mir Publ., 2000. 104 p.
- Kovalevsky O.P., Margulis L.S. Dopolnenie 1. Sekvensstratigraficheskie podrazdeleniya [Supplement 1. Sequential strati-

graphic units]. *Dopolneniya k stratigraficheskomu kodeksu Rossii* [Additions to the Stratigraphic Code of Russia]. St Petersburg, VEGEI Publ., 2000. pp. 59–66.

- 20. Catuneanu O. *Principles of sequence stratigraphy*. Amsterdam, Elsevier Publ., 2006. 375 p.
- Catuneanu O., Galloway W.E., Kendall C.G.S.t.C., Miall A.D., Posamentier H.W., Strasser A., Tucker M.E. Sequence Stratigraphy: Methodology and Nomenclature. *Newsletters on Stratigraphy*, 2011, vol. 44, pp. 173–245.
- 22. Kontorovich A.E., Varlamov A.I., Grazhdankin D.V., Karlova G.A., Klets A.G., Kontorovich V.A., Saraev S.V., Terleev A.A., Belyaev S.Yu., Varaksina I.V., Efimov A.S., Kochnev B.B., Nagovitsin K.E., Postnikov A.A., Filippov Yu.F. Section of transitional Vendian-Cambrian deposits of the eastern part of the West Siberian geosyneclise (based on the results of drilling a parametric well Vostok-3). *Geology and Geophysics*, 2008, vol. 12, pp. 1238–1247. In Rus.
- 23. Shemin G.G., Terleev A.A., Postnikov A.A., Tokarev D.A., Kochnev B.B. Features of the structure of the section of the Vendian–Lower Cambrian deposits of the Siberian platform exposed by the Chaikinskaya parametric well 279. *Geology and mineral resources of Siberia*, 2011, vol. 4, pp. 21–29. In Rus.
- Grotzinger J.P., Watters W.A., Knoll A.H. Calculated metazonas in thrombolite-stromatolite reefs in the terminal Proterozoic Nama Group, Namibia. *Paleobiology*, 2000, vol. 26, pp. 334–359.
- Hofmann H.J., Mountjoy E.W. Namacalathus-Cloudina assemblage in Neoproterozoic Miette Group (Byng Formation), British Columbia. *Canadas oldest shelly fossils. Geology*, 2001, vol. 29, pp. 1091–1094.
- Terleev A.A., Postnikov A.A., Tokarev D.A., Sosnovskaya O.V., Bagmet G.N. Cloudina-Namacalathus-Kolophyton association in the Vendian of Altai-Sayan Foldbelt (Siberia). *Neoproterozoic* sedimentary basins: stratigraphy, geodynamics and petroleum potential. Proc. of the International conf. Novosibirsk, 30 July – 02 August, 2011. pp. 96–98.
- Izvestkovye vodorosli i stromatolity: sistematika, biostratigrafiya, faebialny analiz [Calcareous algae and stromatolites: systematics, biostratigraphy, facial analysis]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1988. 228 p.

Received: 1 April 2022.

Information about the authors

Dmitry A. Tokarev, Cand. Sc., senior researcher, Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; senior lecturer, Novosibirsk State University.

Aleksey V. Plyusnin, sedimentologist, department of geology and field development, LLC «INK».

Aleksandr A. Terleev, Cand. Sc., senior researcher, Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

УДК 528.8:528.7:502.63:624.135

АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ РЕЛЬЕФА И ПРОФИЛЯ ТРАССЫ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

Долгополов Даниил Валентинович¹,

d-daniil@yandex.ru

Аврунев Евгений Ильич²,

avrynev_ei@ngs.ru

Мелкий Вячеслав Анатольевич³, vamelkiy@mail.ru

Веретельник Денис Анатольевич⁴, VeretelnikDA@stargeo.pro

volotoninitz) (@otolgoo.pro

Жидиляева Елена Вячеславовна5,

zhidilyeva-ev@mail.ru

- ¹ Центр ГИС Автономной некоммерческой организации высшего образования «Университет Иннополис», Россия, 420500, г. Иннополис, ул. Университетская, 1.
- ² Сибирский государственный университет геосистем и технологий, Россия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10.
- ³ Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Россия, 693022, г. Южно-Сахалинск, ул. Науки, 1Б.
- ⁴ Общество с ограниченной ответственностью «СтарГео», Россия, 142784, г. Москва, г. Московский, ул. Московская, 3.
- ⁵ Кубанский государственный университет, Россия, 350040, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149.

Актуальность исследования обусловлена тем, что для обеспечения безопасной эксплуатации трубопроводных сетей на территориях с активно протекающими природными процессами всегда необходимо организовывать мониторинг коридора трассы трубопровода. Комплексный анализ состояния трубопровода проводят по данным различных видов диагностики, геодезических и геологических изысканий, а также материалов, полученных с использованием аэросъемки, включая материалы воздушного лазерного сканирования. При этом крайне важной является информация о рельефе коридора трассы, геометрии трубопровода и динамике изменений состояния природно-технической среды в процессе эксплуатации трубопровода. Использование геоинформационной модели территории является эффективным инструментом для оценки состояния природно-технической системы трубопровода. Использование геоинформационной модели территории является эффективным инструментом для оценки состояния природно-технической системы трубопровода, использование геоинформационной модели территории является эффективным инструментом для оценки состояния природно-технической системы трубопроводов, анализа причин их возникновения и выявления тенденций динамики процессов. Особенность такой модели – необходимость использования и исходных данных из разных источников для ее создания. Это данные внутритрубной диагностики, материалы воздушного лазерного сканирования, аэрофотосъемки с использованием беспилотных летательных аппаратов, материалы иженерно-геодезических изысканий. При этом исходные данные имеют разные характеристики, могут быть получены за разные периоды мониторинга, в разных системах координат и высот, могут иметь разную пространственную точность. Характеристики геоинформационной модели определяются в первую очередь характеристиками исходных данных, поэтому этот вопрос требует отдельного внимания.

Цель: проанализировать возможности использования исходных данных из различных источников – материалов аэрофотосъемки с использованием беспилотных летательных аппаратов, воздушного лазерного сканирования, внутритрубной диагностики, измерений при инженерно-геодезических изысканиях – при работе с геоинформационной моделью.

Методы: дешифрирование аэроснимков, экспериментальные исследования в полевых условиях для определения точности данных беспилотных летательных аппаратов и воздушного лазерного сканирования, геоинформационные технологии.

Результаты. Приводится анализ пространственной точности исходных данных, используемых при моделировании рельефа и профиля трассы трубопровода. Работа с инструментами линейной системы координат позволяет использовать в качестве калибровочных точек объекты магистрального трубопровода, которые можно дешифрировать по материалам аэросъемки. Координаты и отметки высот объектов, используемых для калибровки, могут быть получены из эксплуатационной документации с привязкой к километру трассы или из материалов геодезической съемки. Применение инструментов линейной системы координат позволяет также наполнить модель данными о дефектах трубопровода, полученными в процессе внутритрубной диагностики, с точностью, достаточной для анализа причин их возникновения. При геотехническом мониторинге магистрального трубопровода основная роль отводится технологиям внутритрубной диагностики с целью определения дефектов трубопровода и дистанционного зондирования. Особое внимание уделяется контролю планово-высотного положения при формировании трехмерной цифровой модели местности по данным воздушного лазерного сканирования, который позволяет оценить влияние экзогенных геологических процессов на трубопровод. При формировании геоинформационного пространства трубопроводного транспорта в процессе моделирования линейных и площадных объектов трубопровода данные внутритрубной диагностики, а также глобальные данные о рельефе следует использовать с большой осторожностью, или использовать их после дополнительной проверки и корректировки.

Ключевые слова:

Природно-техническая среда трубопроводного транспорта, внутритрубная диагностика, аэрофотосъемка, воздушное лазерное сканирование, геоинформационнная модель, трехмерная модель, пространственная точность, SRTM, ArcticDEM.

Введение

При строительстве и эксплуатации трубопроводных систем важнейшими задачами являются изучение природных условий и оценка влияния процессов, протекающих в геологической среде, на состояние трубопровода. Среди природных факторов, оказывающих наибольшее влияние на природно-техническую систему трубопроводного транспорта, отмечаются: геоморфология рельефа, проявления эндогенных и экзогенных геологических процессов (ЭГП), в том числе в специфических и многолетнемерзлых грунтах (ММГ) [1-11]. Решение оценочных задач влечет за собой повышение требований к геоинформационному обеспечению для работы с информацией, получаемой на предпроектной стадии, в рамках работ по техникоэкономическому обоснованию проекта, на стадиях проектирования, строительства, а также в процессе выполнения комплекса работ по геотехническому мониторингу трубопровода [12-21].

Информация, получаемая при обследованиях природно-технической системы трубопроводного транспорта, имеет пространственно-распределенный характер, при этом данные, получаемые в процессе геотехнического мониторинга, как правило, имеют разные характеристики (разную пространственную привязку, разные системы координат и высот, точности). Поэтому для корректного анализа дефектов и причин их возникновения требуется совместить результаты обследований природно-технической среды (наземные наблюдения, данные внутритрубной диагностики, материалы дистанционного зондирования Земли) в едином геоинформационном пространстве.

Увеличение объемов и видов диагностической информации о техническом состоянии трубопроводной системы, а также о состоянии природной среды и протекающих процессах приводит к необходимости создания геоинформационных моделей (ГИМ) объектов трубопроводного транспорта для совмещения в едином координатном пространстве материалов, полученных в процессе различных видов наблюдений и измерений и их комплексного изучения (рис. 1).



- Рис. 1. Пример совмещения данных внутритрубной диагностики и воздушного лазерного сканирования в геоинформационной системе. Положение подземной части трубопровода нанесено по данным внутритрубной диагностики (красным цветом), отметки земли в коридоре трассы – по данным воздушного лазерного сканирования (черным цветом): а) на фоне аэрофотоизображения; б) на фоне отмывки рельефа, построенной по данным воздушного лазерного сканирования
- Fig. 1. Example of combining in-line inspection and aerial laser scanning data in Geographic Information System. The position of the underground part of the pipeline is plotted by the data of in-line inspection (in red) and ground level in the corridor of the route according to the airborne laser scanning (in black): a) against background of aerial image;
 b) against background of hill shading, built according to the aerial laser scanning data

Для работы с ГИМ целесообразно использовать геоинформационное обеспечение с возможностью трехмерной визуализации [22–26], позволяющее осуществлять комплексный анализ дефектов и причин их возникновения, а также с возможностью моделирования и визуализации развития опасных природных процессов во времени и прогнозирования их влияния на инфраструктуру трубопровода [27, 28].

В производственной деятельности в процессе эксплуатации для анализа состояния природнотехнической среды, мониторинга протекающих процессов, анализа геометрии трубопровода часто используют актуальный (текущий) профиль рельефа трассы и профиль трубопровода, включающего помимо профиля рельефа положение трубопровода и характеристики отдельных элементов (секций трубопровода, объектов инфраструктуры, пересечений).

При построении профиля рельефа и профиля трасы трубопровода необходимо понимать и учитывать характеристики исходных данных (детальность, полноту, достоверность, актуальность, мерность, точность [13, 14, 29, 30]), чтобы, используя инструменты, верно оценить состояние природно-технической среды. Настоящая работа посвящена оценке точности исходных данных, используемых при моделировании рельефа и профиля трассы магистральных трубопроводов, для анализа их состоянии.

Объектом настоящего исследования является профиль трассы магистрального трубопровода.

Предмет – точность исходных данных, используемых при моделировании рельефа и профиля трассы трубопроводов.

Материалы и методы исследования

Профиль рельефа и профиль трассы трубопровода являются составляющими геоинформационного пространства трубопроводного транспорта и характеризуются рядом геоинформационных свойств и параметров, которые в свою очередь определяются характеристикам исходной геопространственной информации (ГИ) (рис. 2).

Точность ГИ характеризуется средними или средними квадратическими погрешностями отображения пространственных, временных и других измеряемых свойств пространственных предметов [13, 14, 29, 30]. Вопросы точности пространственных данных периодически рассматриваются исследователями [31–37] при создании геоинформационных моделей объектов трубопроводного транспорта, при формировании профиля трассы или профиля рельефа, вопросы точности и возможности совместного использования данных из разных источников остаются крайне актуальными и требуют дополнительного рассмотрения.

В работе рассматриваются исходные данные для моделирования рельефа и профиля трассы на трех участках магистрального трубопровода: цифровая модель рельефа (ЦМР), построенная по материалам воздушного лазерного сканирования (ВЛС) с пространственным разрешением до 20 см, ортофотоснимки с пространственным разрешением до 6 см, полученные при аэрофотосъемке (АФС), ЦМР по данным SRTM [38–45], ЦМР по данным ArcticDEM [46–51], результаты внутритрубной диагностики (ВТД), эксплуатационная документация (паспорт магистрального трубопровода).



Рис. 2. Основные составляющие геоинформационного пространства магистрального трубопровода *Fig. 2.* Main components of the Geoinformation space of main pipeline

В настоящем исследовании рассматриваются вопросы оценки точности исходных данных, доступных для построения профиля рельефа и профиля трассы, и их пространственная точность по высоте. Оценка пространственной точности осуществлялась с применением данных воздушного лазерного сканирования

коридора трассы, на основании которых была получена цифровая модель рельефа с пространственным разрешением 20 см и точностью по высоте 10 см.

Для обработки и анализа пространственных данных использовалось программное обеспечение ArcGIS (ESRI). Для привязки данных ВТД использовались инструменты ArcGIS Pipeline Referencing (ESRI).

Для построения профиля рельефа использовались:

- поверхность, построенная по данным SRTM (данные достаточные по точности для общего анализа местности на предпроектной стадии, а также при выполнении работ по технико-экономическому обоснованию проекта);
- поверхность, построенная по данным ArcticDEM (для полярных областей);
- поверхность, построенная по данным ВЛС (наиболее точные данные, в нашем исследовании являются эталоном);
- поверхность, построенная по данным АФС методом фотограмметрии;

- поверхность, построенная по горизонталям топографической карты;
- профиль, построенный по данным геодезических изысканий.

При построении профиля трассы трубопровода данные рельефа дополняют информацией о положении трубопровода и объектам инфраструктуры, а также о пересечениях с другими географическими объектами. Здесь в качестве основного источника данных выступают материалы внутритрубной диагностики, которые предоставляют нам данные по нижней отметке трубопровода (секции трубопровода). Высота поверхности земли (по данным ВТД) может быть получена путем сложения высотной отметки низа секции, диаметра трубопровода и глубины прокладки (заложения) трубопровода (рис. 3).

Диаметр и глубина прокладки (заложения) трубопровода были нами получены из паспорта трубопровода для каждого рассматриваемого участка.



Puc. 3. Глубина заложения трубопровода на схеме **Fig. 3.** Depth of pipeline in diagram

Результаты исследования

Оценка пространственной точности исходных данных была проведена нами на трех тестовых участках: рядом с камерой пуска (участок 1), на удалении более 50 км от камеры пуска (участок 2) и рядом с камерой приема снаряда внутритрубной диагностики (участок 3).

Тестовые участки расположены на юго-западе Якутии, на Сибирской платформе, рельеф плоскогорный. Участки имеют схожий рельеф и условия прокладки трубопровода, перепад высот на участках от 220 до 410 м над уровнем моря. Расстояние между участками около 100 км, участки расположены на одной широте (60° с.ш.), трубопровод простирается с запада на восток.

Участок 1

На первом участке была проведена оценка пространственной точности профиля рельефа, построенного по данным ВТД.

Для того чтобы получить значение высоты поверхности земли к отметке низа секций, мы добавили диаметр магистрального трубопровода на этом участке и глубину заложения (рис. 3).

Zпз = Zнт + Dмт + hзал,

где $Z_{\Pi 3}$ – отметка поверхности земли; Z_{HT} – отметка низа трубы; D_{MT} – диаметр магистрального трубопровода; $h_{3A\Lambda}$ – глубина заложения.

Также на первом участке были построены профили рельефа по глобальным данным о рельефе SRTM и ArcticDEM.



Рис. 4. Данные о положении трубы в соответствии с данными внутритрубной диагностики и земной поверхности в соответствии с ВТД, воздушным лазерным сканированием, SRTM и данными ArcticDEM на участке 1

Fig. 4. Data about position of the pipe according to in-line inspection (ILI) data and the earth's surface according to ILI, aerial laser scanning, SRTM and ArcticDEM data on site 1

Точность модели рельефа, созданной на основе данных ВТД, составила σ =6,9 м (табл. 1). Точность модели рельефа по данным SRTM σ =5,9 м и для ArcticDEM σ =3,5 м.

Таблица 1. Статистические данные моделей рельефа на участке 1

Table 1.	Statistical	data of	f relief 1	nodels of	n site 1

	Источник данных				
	C	о рельефе			
Statistical data	Sourc	Source of relief data			
Statistical data	ВТД	SRT	ArcticD		
	ILI	Μ	EM		
Количество контрольных точек, шт. Number of control points, pcs.	20	20	20		
Средняя разница высот Δh , м Average height difference Δh , m	6,9	5,8	3,5		
Стандартное отклонение σ , м Standard deviation σ , m	6,9	5,9	3,5		
Наибольшая разница высот Δh_{max} , м Greatest height difference is Δh_{max} , m	7,2	8,2	3,8		

Анализ профиля, построенного по данным ВТД показал, что он в целом отражает изменения рельефа, но находится выше поверхности земли по данным ВЛС более чем на 6 м. Таким образом, мы видим существенное расхождение в данных, полученных в процессе ВЛС и ВТД.

Значения глобальных данных о рельефе (SRTM, ArcticDEM) оказались даже ближе к данным, полученным в процессе ВЛС, чем к данным ВТД. Проект SRTM предусматривает погрешность по высоте для

рельефа не менее 16 м [14]. Согласно данным наших исследований, приведенным в табл. 1, фактические значения оказались точнее (рис. 7).

Участок 2

На втором участке также была проведена оценка пространственной точности модели рельефа, построенной по данным ВТД, а также моделей рельефа по данным SRTM и ArcticDEM (рис. 5).

Особенностью второго участка является то, что он располагался на существенном расстоянии от камеры пуска/приема, на расстоянии около 100 км.

Точность модели рельефа по данным ВТД составила σ =8,4 м, по данным SRTM σ =6,1 м и ArcticDEM σ =4,0 м (табл. 2).

Таблица 2. Статистические данные моделей рельефа на участке 2

Table 2.Statistical data of relief models on site 2

Статистические данные	Источник данных о рельефе Source of relief data			
Statistical data	ВТД ILI	SR TM	Arctic DEM	
Количество контрольных точек, шт. Number of control points, pcs.	34	34	34	
Средняя разница высот Δh , м Average height difference Δh , m	8,2	6,9	4,0	
Стандартное отклонение σ , м Standard deviation σ , m	8,2	7,2	4,0	
Наибольшая разница высот Δh_{max} , м Greatest height difference is Δh_{max} , m	10,4	10, 2	4,8	



Рис. 5. Данные о положениях трубы и поверхности земли на участке 2





Рис. 6. Данные о положениях трубы и поверхности земли на участке 3 **Fig.** 6. Data about positions of pipe and ground surface on site 3

Таблица 3.	Статистические	данные	моделей	рельефа
	на участке 3			

 Table 3.
 Statistical data of relief models on site 3

		Источник данных			
Cramero and a second se	о рельефе				
Statistical data	Source of relief data				
Statistical data	ВТД	SR	Arctic		
	ILI	TM	DEM		
Количество контрольных точек, шт. Number of control points, pcs.	20	20	20		
Средняя разница высот ∆h, м Average height difference ∆h, m	14,3	1,8	4,2		
Стандартное отклонение σ , м Standard deviation σ , m	14,6	2,1	4,2		
Наибольшая разница высот Δh_{max} , м Greatest height difference is Δh_{max} , m	18,6	3,9	4,7		

Участок 3

На третьем участке была проведена оценка пространственной точности модели рельефа, построенной по данным ВТД, а также моделей рельефа по данным SRTM и ArcticDEM. Результаты приведены в табл. 3 и на рис. 6.

Обсуждение

При создании геоинформационных моделей объектов трубопроводного транспорта, повышения их пространственной точности целесообразно использовать инструменты работы с линейными системами координат (ЛСК). Использование ЛСК позволяет применять в качестве калибровочных точек объекты магистрального трубопровода, которые можно дешифрировать по материалам аэросъемки. Это могут быть: задвижки, вантузы, камеры пуска и приёма средств очистки и диагностики и т. п., обнаружить которые можно с использованием методов визуального дешифрирования [1–3, 52–56]. Координаты и отметки высот объектов, используемых для калибровки, могут быть получены из эксплуатационной документации или материалов геодезической съемки (исполнительные съемки/мониторинг/инженерногеодезические изыскания).

На участке 2 были проведены работы по корректировке значений, полученных средствами внутритрубной диагностики. Результаты приведены в табл. 4 и на рис. 7.

Анализ результатов корректировки данных классическими геодезическими методами показал улучшение точности профиля рельефа, построенного по данным ВТД.

Применение инструментов ЛСК позволяет также наполнить модель данными о дефектах трубопровода, полученными в процессе внутритрубной диагностики, с точностью, достаточной для анализа причин их возникновения. Таблица 4. Статистические данные модели рельефа после корректировки

 Table 4.
 Statistical data of the relief model after adjustment

Статистические данные	Источник данных о рельефе Source of relief data		
Statistical data	ВТД ILI	ВТД (корр.)/ILI (updating)	
Количество контрольных точек, шт. Number of control points, pcs.	20	20	
Средняя разница высот Δ h, м Average height difference Δ h, m	8,4	1,1	
Стандартное отклонение σ , м Standard deviation σ , m	8,4	1,3	
Наибольшая разница высот Δh_{max} , м Greatest height difference is Δh_{max} , m	10,4	3,0	

Помимо этого, ЛСК позволяет дополнить модель информацией об объектах, описание положения которых приведено в эксплуатационной документации с привязкой к километру трассы, без указания географического положения или приведенного на схеме приблизительно.



Рис. 7. Профили положения трубы по данным внутритрубной диагностики, поверхности земли по данным внутритрубной диагностики и воздушного лазерного сканирования, а также скорректированные значения положения трубы в процессе полевых геодезических изысканий на участке 2

Fig. 7. Sections of position of pipe according to in-line inspection data, ground surface according to in-line diagnostics and aerial laser scanning, as well as corrected values of pipe position during field geodetic surveys on site 2

Заключение

При формировании геоинформационного пространства трубопроводного транспорта в процессе моделирования линейных и площадных объектов трубопровода данные внутритрубной диагностики, а также глобальные данные о рельефе следует использовать с большой осторожностью, или использовать их после дополнительной проверки и корректировки. При геотехническом мониторинге магистрального трубопровода основная роль отводится технологиям внутритрубной диагностики с целью определения дефектов трубопровода и дистанционного зондирования (для наблюдения за природными процессами в коридоре трассы). При комплексном анализе результатов геотехнического мониторинга требуется предварительно провести геодезический контроль результатов наблюдений. Установлено, что при расположении трубопроводов в зонах со сложными природными условиями актуальной является задача анализа данных обследований объектов трубопроводной сети, полученных за несколько циклов наблюдений, для контроля динамики протекания процессов и оценки эффективности компенсирующих мероприятий. При этом особое внимание уделяют влиянию ЭГП на трубопровод и

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Баборыкин М.Ю. Жидиляева Е.В., Погосян А.Г. Дешифрирование материалов аэрокосмической съемки для анализа инженерно-геологических условий в общем алгоритме изысканий на линейных объектах // Инженерные изыскания. – 2014. – № 9–10. – С. 13–21.
- Баборыкин М.Ю. Жидиляева Е.В., Погосян А.Г. Выявление опасных геологических процессов при проведении инженерно-геологических изысканий на основе цифровых моделей рельефа // Инженерные изыскания. – 2015. – № 2. – С. 30–37.
- Баборыкин М.Ю. Жидиляева Е.В., Погосян А.Г. Факторы геологической опасности при проектировании и эксплуатации трубопроводов и их мониторинг // Газовая промышленность. – 2015. – № 11 (730). – С. 40–46.
- Макаров В.И., Кюнтцелъ В.В., Авсюк Ю.Н. Энергетика экзогенных геологических процессов // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 1995. – № 2. – С. 3–26.
- Сахаровский А.В., Строкова Л.А. Определение устойчивости оползневого склона при проектировании моста через р. Пошнарку в Чувашии // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 1. – С. 125–134. DOI: https://doi.org/10.18799/24131830/2020/1/2454
- Baker R. Non-Linear Strength Envelopes Based on Triaxial Test Data //Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering. – 2004. – V. 130. – P. 498–506. DOI: https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:5(498)
- Hearn G.J. Geomorphology in engineering geological mapping and modelling // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. – 2019. – V. 78. – № 2. – P. 723–742. DOI: https://doi.org/10.1007/s10064-017-1166-5
- Ingebritsen S.E., Sanford W.E., Neuzil C.E. Groundwater in geologic processes. 2nd ed. – New York: Cambridge Univ. Press, 2006. – 536 p.
- Lee S., Thalib J.A. Probabilistic landslide susceptibility and factor effect analysis // Environmental Geology. – 2005. – V. 47. – P. 982–990. URL: https://doi.org/10.1007/s00254-005-1228-z (дата обращения 19.11.2021).
- Sensitivity of rainstorm-triggered shallow mass movements on gully slopes to topographical factors on the Chinese Loess Plateau / W.-Z. Guo, L. Luo, W.-L. Wang, Z.-Y. Liu, Z.-X. Chen, H.-L. Kang, B. Yang // Geomorphology. – 2019. – V. 337. – P. 69–78. DOI: 10.1016/j.geomorph.2019.04.006.
- Troncone A. Numerical analysis of a landslide in soils with a strained softening behavior // Geotechnique. - 2005. - V. 55. -№ 8. - P. 585-596.
- Баборыкин М.Ю. Мониторинг опасных геологических процессов на линейных объектах // Инженерные изыскания. – 2013. – № 10–11. – С. 44–55.
- Дешифрирование инфраструктуры магистральных трубопроводов по аэрокосмическим изображениям / Д.В. Долгополов, Д.В. Никонов, В.А. Мелкий, В.В. Братков // Мониторинг. Наука и технологии. 2020. № 2 (44). С. 19–25. URL: http://csmos.ru/index.php?page=mnt-issue-2020-2 (дата обращения 19.11.2021).
- Долгополов Д В., Баборыкин М.Ю, Мелкий В.А. Мониторинг опасных геологических процессов при строительстве и эксплуатации объектов трубопроводного транспорта по данным дистанционного зондирования Земли // ИнтерэкспоГео-Сибирь. – 2021. – Т. 4. – № 1. – С. 25–32. DOI: https://doi.org/10.33764/2618-981X-2021-4-1-25-32

контролю планово-высотного положения элементов трубопровода, чтобы своевременно обнаружить опасные изменения в геометрии трубных секций. Для получения информации о планово-высотном положении объектов трубопровода при построении трехмерной цифровой модели местности целесообразно использовать методы воздушного лазерного сканирования, на которые следует опираться, в первую очередь.

- Лисицкий Д.В. Перспективы развития картографии: от системы «Цифровая Земля» к системе виртуальной геореальности // Вестник СГГА (Сибирской государственной геодезической академии). – 2013. – Вып. 2 (22). – С. 8–16.
- 16. Технологические решения в области обеспечения геопространственной информации о магистральных трубопроводах и объектах их инфраструктуры / Е.И. Аврунев, Г.А. Уставич, А.О. Грекова, А.В. Никонов, В.А. Мелкий, Д.В. Долгополов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 7. – С. 188–201. DOI: https://doi.org/10.18799/24131830/2020/7/2729
- Active Optical Sensors (LASERS) / A. Abellán, M. Jaboyedoff, C. Michoud, M.H. Derron, T. Oppikofer // Deliverable 4.1 of the European project SafeLand: Review of Techniques for Landslide Detection, Fast Characterization, Rapid Mapping and Long-Term Monitoring / Ed. in 2010 by C. Michoud, A. Abellán, M.H. Derron, M. Jaboyedoff. – 2012. – P. 65–102. URL: http://www.safelandfp7.eu (дата обращения 19.11.2021).
- Bernhardsen T. Georgaphic Information Systems: an introduction. – New York: John Wiley & Sons, 2002. – 320 p.
- Fukui H., Man D.C., Phan A. Digital earth: a platform for the SDGs and green transformation at the global and local level, employing essential SDGs variables variables // Big Earth Data, 2021. DOI: https://doi.org/10.1080/20964471.2021.1948677
- Guo H., Goodchild M.F., Annoni A. Manual of digital Earth. Singapore: Springer, 2020. – 846 p. DOI: https://doi.org/10.1007/ 978-981-32-9915-3
- Li Z. Pipeline spatial data modeling and pipeline WebGIS digital oil and gas pipeline: research and practice. – Springer Nature Switzerland AG. – 2020. – 154 p. URL: https://link.springer.com/ content/pdf/10.1007%2F978-3-030-24240-4.pdf (дата обращения 19.11.2021).
- Бугаков П.Ю. Принципы картографического отображения трехмерных моделей местности // ИнтерэкспоГео-Сибирь. – 2012. – Т. 3. – С. 156–161.
- Долгополов Д.В. Геопространство трубопроводного транспорта // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). 2021. Т. 26. № 1. С. 76–85. DOI: https://doi.org/10.33764/2411-1759-2021-26-1-76-85
- Лисицкий Д.В., Хорошилов В.С., Бугаков П.Ю. Картографическое отображение трехмерных моделей местности // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2012. № 2/1. С. 98–102. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_24356403_84912698.pdf (дата обращения 19.11.2021).
- Glander T., Trapp M., Döllner J. Concepts for automatic generalization of virtual 3D landscape models // Digital Landscape Architecture Proceedings. P. 127–135. URL: https://hpi.de/fileadmin/user_upload/fachgebiete/doellner/publications/2011/GTD11/2011_GlanderTrappDoellner_AutomaticGeneral ization.pdf (дата обращения 19.11.2021).
- 26. Pasewaldt S., Trapp M., Döllner J. Multiscale visualization of 3D geovirtual environments using view-dependent multi-perspective views // Journal of WSCG. 2011. V. 19. № 3. Р. 111–118. URL: https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/11025/1245/1/Pasewaldt.pdf (дата обращения 19.11.2021).
- Модель данных для расчета ореолов оттаивания с использованием программно-расчетного модуля / В.И. Суриков, Е.А. Покровская, Т.И. Кузнецов, Д.В. Долгополов, А.И. Барышев, Д.Ю. Федоренко, А.А. Захаров, С.Н. Чужинов, П.А. Ревель-Муроз // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ. пат. Россия, RU2017661876, регистрац. 01.09.2017, публикац. 24.10.2017 URL:

https://www1.fips.ru/fips_servl/fips_servlet?DB=EVM&DocNum ber =2017661876&TypeFile=html (дата обращения 19.11.2021).

- 28. Модель данных для расчета планово-высотного положения с использованием программно-расчетного модуля / В.И. Суриков, Э.Р. Ибрагимов, Т.И. Кузнецов, Д.В. Долгополов, А.А. Захаров, С.Н. Чужинов, П.А. Ревель-Муроз, А.И. Барышев, Д.Ю. Федоренко // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ. пат. Россия, RU2017662021, регистрац. 01.09.2017, публикац. 26.10.2017 URL: https://www1.fips.ru/ fips_servl/fips_servlet?DB=EVM&DocNumber=2017662021&Ty peFile=html (дата обращения 19.11.2021).
- 29. Селезнев В.Е., Клишин Г.С., Кисилев В.В. Численное моделирование при анализе опасности аварий на газопроводах ТЭК // Безопасность труда в промышленности. – 2002. – № 3. – С. 23–29.
- Карпик А.П. Методологические и технологические основы геоинформационного обеспечения территорий: монография. – Новосибирск: СГГА, 2004. – 260 с.
- Распутин А.Н. Геоинформационная система оценки влияния инженерно-геологических факторов на возникновение коррозионных дефектов газопроводов ООО «Газпром трансгаз Екатеринбург»: дис. ... канд. технических наук. – Екатеринбург, 2011. – 142 с.
- 32. An assessment of the SRTM topographic products / E. Rodriguez, C.S. Morris, J.E. Belz, E. Chapin, J. Martin, W Daffer, S. Hensley // Technical Report JPL D-31639. – California, Pasadena, Jet Propulsion Laboratory. – 2005. – 143 p. URL: https://www2.jpl.nasa. gov/srtm/SRTM_D31639.pdf (дата обращения 19.11.2021).
- Werner M. Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). Mission overview // Journal of RF-Engineering and Telecommunications. – 2001. – V. 55. – P. 75–79. DOI: https://doi.org/10.1515/ FREQ.2001.55.3-4.75
- 34. Орлянкин В.Н., Алешина А.Р. Использование матриц высот SRTM в предварительных расчетах и картографировании глубин потенциального паводкового затопления речных пойм // Исследование Земли из космоса. – 2019. – № 5. – С. 72–81. DOI: https://doi.org/10.31857/S0205-96142019572-81
- 35. Коротин А.С., Попов Е.В. Оценка точности цифровых моделей рельефа, применяемых для территориальных исследований // Графикон'2015: Труды Юбилейной 25-й Международной научной конференции. – Протвино, 22–25 сентября 2015. – Протвино: Автономная некоммерческая организация «Институт физико-технической информатики», 2015. – С. 102–106.
- 36. Оскорбин Н.М., Суханов С.И. Создание полигона для оценки точности имеющихся растровых карт и космических снимков высокого разрешения // Известия Алтайского государственного университета. – 2011. – № 1 (69). – Т. 1. – С. 108–112.
- Куметаитене А. Анализ точности первоначальных данных, используемых в моделировании рельефа // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2005. – Т. 1. – № 1. – С. 108–114.
- Farr T.G., Kobrick M. Shuttle Radar Topography Mission produces a wealth of data // Eos Transactions American Geophysical Union. 2000. V. 81. P. 583–585. DOI: https://doi.org/10.1029/EO081i048p00583
- 39. Им С.Т. Погрешности расчета углов и азимутальных направлений склонов по данным SRTM // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2010. – Т. 1. – № 4. – С. 164–167.
- Оньков И.В., Онянова Т.Я., Шиляева О.Ю. Исследование точности радарных ЦМР, построенных по снимкам ALOS PALSAR и модели SRTM, в зависимости от вида отражающей поверхности // Геоматика. 2012. № 4. С. 33–36.
- Трофимов А.А., Филиппова А.В. Оценка точности матрицы высот SRTM по материалам топографических съемок // Геопрофи. – 2014. – № 6. – С. 13–17.
- Frey H., Paul F. On the suitability of the SRTM DEM and ASTER GDEM for the compilation of topographic parameters in glacier inventories // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. – 2012. – V. 18. – P. 480–490. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.jag.2011.09.020

- 43. Shortridge A., Messina J. Spatial structure and landscape associations of SRTM error // Remote Sens. Environ. 2011. V. 115. № 6. P. 1576–1587. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rse. 2011.02.017.
- 44. USGS EROS Archive Digital Elevation Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) // U.S. Geological Survey. URL: www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-digitalelevation-shuttle-radar-topography-mission-srtm?qt-science_ center_objects=0#qt-science_scenter_object (дата обращения 19.11.2021).
- 45. SRTM Data. Download Manager. URL: https://srtm.csi.cgiar. org/srtmdata/ (дата обращения 19.11.2021).
- ArcticDEM. URL: https://www.pgc.umn.edu/data/arcticdem/ (дата обращения 19.11.2021).
- 47. Анализ возможности применения цифровых моделей рельефа ASTER GDEM v2 и ArcticDEM для исследований арктических территорий России / Е.В. Полякова, Ю.Г. Кутинов, А.Л. Минеев, З.Б. Чистова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2020. – Т. 17. – № 7. – С. 117–127. DOI: https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-7-117-127.
- 48. Цифровые технологии дистанционного выявления и мониторинга развития бугров пучения и кратеров катастрофических выбросов газа в Арктике / В.И. Богоявленский, И.В. Богоявленский, Т.Н. Каргина, Р.А. Никонов // Арктика: экология и экономика. – 2020. – № 4 (40). – С. 90–105. DOI: https://doi.org/10.25283/2223-4594-2020-4-90-105.
- 49. Никольский Д.Б. Современные тенденции в радиолокационном дистанционном зондировании Земли // Геоматика. – 2008. – № 1. – С. 7–10.
- Using ArcticDEM to analyse the dimensions and dynamics of debris-covered glaciers in Kamchatka, Russia / I.D. Barr, M.D. Dokukin, I. Kougkoulos, S.J. Livingstone, H. Lovell, J. Małecki, A.Y. Muraviev // Geosciences (Switzerland). – 2018. – V. 8. – № 6. – P. 216. DOI: https://doi.org/10.3390/ geosciences8060216
- Estimating river surface elevation from ArcticDEM / C. Dai, M. Durand, I.M. Howat, E.H. Altenau, T.M. Pavelsky // Geophysical Research Letters. 2018. – V. 45. – № 7. – P. 3107–3114. DOI: https://doi.org/10.1002/2018GL077379
- 52. Возможности визуального дешифрирования магистральных трубопроводов и объектов инфраструктуры по спутниковым изображениям высокого и сверхвысокого пространственного разрешения / Д.В. Долгополов, Д.В. Никонов, А.В. Полуянова, В.А. Мелкий // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). – 2019. – Т. 24. – № 3. – С. 65–81. DOI: https://doi.org/10.33764/2411-1759-2019-24-3-65-81
- 53. Оценка точности 3D-моделей, построенных с использованием беспилотных авиационных систем / Е.И. Аврунев, Х.К. Ямбаев, О.А. Опритова, А.В. Чернов, Д.В. Гоголев // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). – 2018. – Т. 23. – № 3. – С. 211–228.
- 54. Разработка методик автоматизированного дешифрирования аэрокосмических снимков. Дешифровочные признаки изображений объектов на многоспектральных космических снимках / А.П. Гук, Л.Г. Евстратова, Е.П. Хлебникова, М.А. Алтынцев, С.А. Арбузов, А.С. Гордиенко, А.А. Гук, Д.П. Симонов // Геодезия и картография. – 2013. – № 7. – С. 31–40.
- Хренов Н.Н. Основы комплексной диагностики северных трубопроводов. Аэрокосмические методы и обработка материалов съемок. – М.: Газойл пресс, 2003. – 352 с.
- 56. Бондур В.Г. Аэрокосмические методы и технологии мониторинга нефтегазоносных территорий и объектов нефтегазового комплекса // Исследование Земли из космоса. – 2010. – № 6. – С. 3–17.

Поступила 01.04.2022 г.

Информация об авторах

Долгополов Д.В., кандидат технических наук, руководитель направления Центра ГИС Автономной некоммерческой организации высшего образования «Университет Иннополис».

Аврунев Е.И., кандидат технических наук, доцент кафедры кадастра и территориального планирования Сибирского государственного университета геосистем и технологий.

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

Веретельник Д.А., исполнительный директор Общества с ограниченной ответственностью «СтарГео».

Жидиляева Е.В., старший преподаватель кафедры нефтяной геологии, гидрогеологии и геотехники Института географии, геологии, туризма и сервиса Кубанского государственного университета.

UDC 528.8:528.7:502.63:624.135

ANALYSIS OF ACCURACY OF INITIAL DATA USED IN MODELING RELIEF AND PROFILE OF THE MAIN PIPELINES ROUTE

Daniil V. Dolgopolov¹, d-daniil@yandex.ru

Evgeny I. Avrunev²,

avrynev_ei@ngs.ru

Vyacheslav A. Melkiy³, vamelkiy@mail.ru

Denis A. Veretelnik⁴, VeretelnikDA@stargeo.pro

Elena V. Zhidilyaeva⁵,

zhidilyeva-ev@mail.ru

- Autonomous Non-profit Organization of Higher Education «Innopolis University»,
 1, Universitetskaya street, Innopolis, 420500, Russia.
- ² Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotny street, Novosibirsk, 630108, Russia.
- ³ Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far East Branch of Russian Academy of Science, 1B, Nauki street, Yuzhno-Sakhalinsk, 693022, Russia.
- ⁴ Limited Liability Company «StarGeo»,
 3, Moskovskaya street, Moskovsky city, Moscow, 142784, Russia.
- ⁵ Kuban State University, 149, Stavropolskaya street, Krasnodar, 350040, Russia.

The relevance of the research is caused by fact that in order to ensure the safe operation of pipeline networks in areas with active natural processes, it is always necessary to organize monitoring of the pipeline route corridor. Comprehensive analysis of the condition of the pipeline is carried out according to various types of diagnostics, geodetic and geological surveys, as well as materials obtained using aerial photography, including aerial laser scanning materials. At the same time, information about relief in the route corridor, geometry of pipeline and dynamics of changes in state of natural and technical environment during operation of the pipeline is extremely important. The use of geographic information model of territory is effective tool for assessing state of natural and technical system of pipeline network, determining position of pipeline defects in space, analyzing the causes of their occurrence and identify trends in dynamics of natural processes. The peculiarity of such model need to use source data from different sources for create it. These are the data of in-line inspection, materials of aerial laser scanning, aerial photography using unmanned aerial vehicles, materials of engineering and geodetic surveys. Initial data have different characteristics, can be obtained on different monitoring phase, in different coordinate systems and heights, and may have different spatial accuracy at same time. The characteristics of geographic information model are determined primarily by accuracy of source data to, so this issue requires special attention.

The purpose of the research was to analyze the possibilities of using initial data from various sources when creating geoinformation models: aerial photography materials using unmanned aerial vehicles, aerial laser scanning, integrated diagnostics, measurements during engineering and geodetic surveys.

Methods: decoding of aerial photographs, experimental research of accuracy of unmanned aerial vehicles and aerial laser scanning data, geoinformation technologies.

Results. The article provides an analysis of the spatial accuracy of the initial data used in modeling the relief and profile of the pipeline route. Working with the tools of the linear coordinate system allows you to use as calibration points, objects of the main pipeline, which can be discerned from aerial survey materials. Coordinates and elevation marks of objects used for calibration can be obtained from operational documentation with reference to the kilometer of the route or geodetic survey materials. The use of linear coordinate system tools also makes it possible to fill the model with data on pipeline defects obtained in the in-line inspections, with accuracy sufficient to analyze the causes of their occurrence. In geotechnical monitoring of main pipeline, main role assigned to the technologies of the in-line inspection in order to determine pipeline defects and remote sensing. Special attention is paid to the control of the planned altitude position during the formation of a three-dimensional digital terrain model based on aerial laser scanning data, which allows us to assess the impact of exogenous geological processes on the pipeline. Smart pigging data, as well as global terrain data, should be used with great care, when forming the geoinformation space of pipeline transport in the process of modeling linear and areal pipeline objects, or they should be used after additional verification and correction.

Key words:

Natural and technical environment of pipeline transport, in-line diagnostics, aerial surveys, aerial laser scanning, in-line diagnostics, aerial laser scanning, geoinformation model, three-dimensional model, spatial accuracy, SRTM, ArcticDEM.

REFERENCES

- Baborykin M.Yu., Zhidilyaeva E.V., Pogosyan A.G. Interpretation of aerospace materials to determine engineering-geological conditions in the general algorithm of surveys at linear objects. *Engineering survey*, 2014, no. 9–10, pp. 13–21. In Rus.
- Baborykin M.Yu., Zhidilyaeva E.V., Pogosyan A.G. Revealing hazardous geological processes for engineering-geological surveys on the basis of digital terrain models. *Engineering survey*, 2015, no. 2, pp. 30–36. In Rus.
- Baborykin M.Yu., Zhidilyaeva E.V., Pogosyan A.G. Factors of geological hazard in the design and operation of pipelines and their monitoring. GAS Industry of Russia, 2015, no. 11 (730), pp. 40–46. In Rus.
- Makarov V.I., Kyunttsel V.V., Avsyuk Yu.N. Energetics of exogenous geological processes. *Geoekologiya. inzheneraya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya*, 1995, no. 2, pp. 3–26. In Rus.
- Sakharovskiy A.V., Strokova L.A. Determining landslide slope stability when designing a bridge over the river Poshnarka in the Chuvash republic. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*. *Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 1, pp. 125–134. In Rus. DOI: https://doi.org/10.18799/24131830/2020/1/2454
- Baker, R. Non-Linear Strength Envelopes Based on Triaxial Test Data. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2004, vol. 130, pp. 498–506. DOI: https://doi.org/10.1061/ (ASCE)1090-0241(2004)130:5(498)
- Hearn G.J. Geomorphology in engineering geological mapping and modelling. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2019, vol. 78, no. 2, pp. 723–742. DOI: https://doi.org/ 10.1007/s10064-017-1166-5
- Ingebritsen S.E., Sanford W.E., Neuzil C.E. Groundwater in geologic processes. 2nd ed. New York, Cambridge Univ. Press, 2006. 536 p.
- Lee S., Thalib J.A. Probabilistic landslide susceptibility and factor effect analysis. *Environmental Geology*, 2005, vol. 47, pp. 982–990. DOI: https://doi.org/10.1007/s00254-005-1228-z
- Guo W.-Z., Luo L., Wang W.-L., Liu Z.-Y., Chen Z.-X., Kang H.-L., Yang B. Sensitivity of rainstorm-triggered shallow mass movements on gully slopes to topographical factors on the Chinese Loess Plateau. *Geomorphology*, 2019, vol. 337, pp. 69–78. DOI: https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.04.006
- Troncone A. Numerical analysis of a landslide in soils with a strained softening behavior. *Geotechnique*, 2005, vol. 55, no. 8, pp. 585–596. DOI: https://doi.org/10.1680/geot.2005.55.8.585
- 12. Baborykin M.Yu. Monitoring of hazardous geological processes at linear objects. *Engineering survey*, 2013, no. 10–11, pp. 44–55. In Rus.
- Dolgopolov D.V., Nikonov D.V., Melkiy V.A., Bratkov V.V. Interpretation of trunk pipeline infrastructure by aerospace images. *Monitoring. Science&Technologies*, 2020, no. 2 (44), pp. 19–25. In Rus. Available at: http://csmos.ru/index.php?page=mnt-issue-2020-2 (accessed 19 November 2021).
- Dolgopolov D.V., Baborykin M.Yu., Melkiy V.A. Monitoring of hazardous geological processes in the construction and operation of pipeline transport facilities by remote sensing data. *Interexpo Geo-Siberia*, 2021, vol. 4, no. 1, pp. 25–32. In Rus. DOI: https://doi.org/10.33764/2618-981X-2021-4-1-25-32
- Lisitsky D.V. Prospects for cartography development: from digital land to virtual georeality. *Bulletin of the SGGA (Siberian State Geodetic Academy*), 2013, no. 2 (22), pp. 8–16. In Rus.
- Avrunev E.I., Ustavich G.A., Grekova A.O., Nikonov A.V., Melkiy V.A., Dolgopolov D.V. Technological solutions in sphere of geospatial information onlong distance pipelines and objects of their infrastructure. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*. *Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 7, pp. 188–201. In Rus. DOI: https://doi.org/10.18799/24131830/2020/7/2729
- Abellán A., Jaboyedoff M., Michoud C., Derron M.H., Oppikofer T. Active Optical Sensors (LASERS). *Deliverable 4.1 of the European project SafeLand: Review of Techniques for Landslide Detection, Fast Characterization, Rapid Mapping and Long-Term Monitoring*. Ed. in 2010 by C. Michoud, A. Abellán, M.H. Derron, M. Jaboyedoff. 2012, pp. 65–102. Available at: http://www.safeland-fp7.eu (accessed 19 November 2021).
- Bernhardsen T. Georgaphic Information Systems: an introduction. New York, John Wiley & Sons, 2002. 320 p.

- Fukui H., Man D.C., Phan A. Digital earth: a platform for the SDGs and green transformation at the global and local level, employing essential SDGs variables. *Big Earth Data*, 2021. DOI: https://doi.org/10.1080/20964471.2021.1948677
- Guo H., Goodchild M.F., Annoni A. Manual of Digital Earth. Singapore, Springer, 2020. 846 p. DOI: https://doi.org/10.1007/ 978-981-32-9915-3
- Li Z. Pipeline Spatial Data Modeling and Pipeline WebGIS. Digital Oil and Gas Pipeline: Research and Practice. Springer Nature Switzerland AG, 2020, 154 p. Available at: https://link.springer. com/content/pdf/10.1007%2F978-3-030-24240-4.pdf (accessed 19 November 2021).
- Bugakov P.Yu. Principles of cartographic mapping of threedimensional terrain models. *Interexpo Geosibir*, 2012, vol. 3, pp. 156–161. In Rus.
- Dolgopolov D.V. Pipeline transport geospaces. Bulletin of SGUGiT (Siberian State University of Geosystems and Technologies), 2021, vol. 26, no. 1, pp. 76–85. In Rus. DOI: https:// doi.org/10.33764/2411-1759-2021-26-1-76-85
- Lisitsky D.V., Khoroshilov V.S., Bugakov P.Yu. Cartographic representation of 3D terrain models. *Izvestia vuzov. Geodesy and aerophotosurveying*, 2012, no. 2/1, pp. 98–102. In Rus. Available at: URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_24356403_ 84912698.pdf (accessed 19 November 2021).
- 25. Glander T., Trapp M., Döllner J. Concepts for automatic generalization of virtual 3D landscape models. *Digital Landscape Architecture Proceedings*. pp. 127–135. Available at: https://hpi.de/fileadmin/user_upload/fachgebiete/doellner/publications/2011/GTD11/2011_GlanderTrappDoellner_AutomaticGeneralization.pdf (accessed 19 November 2021).
- Pasewaldt S., Trapp M., Döllner J. Multiscale visualization of 3D geovirtual environments using view-dependent multi-perspective views. *Digital Landscape Architecture Proceedings*, 2011. pp. 127–135. Available at: https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/11025/ 1245/1/Pasewaldt.pdf (accessed 19 November 2021).
- 27. Surikov V.I., Pokrovskaya E.A., Kuznetsov T.I., Dolgopolov D.V., Baryshev A.I., Fedorenko D.Yu., Zakharov A.A., Chuzhinov S.N., Revel-Muroz P.A. Model dannykh dlya rascheta oreolov ottaivaniya s ispolzovaniem programmno-raschetnogo modulya [Data model for calculating thawing halos using a software calculation module]. Certificate of registration of a computer program. Patent RF, RU2017661876, 2017. Available at: https://www1.fips.ru/ fips_servl/fips_servlet?DB=EVM&DocNumber=2017661876&Ty peFile=html (accessed 19 November 2021).
- 28. Surikov V.I., Ibragimov E.R., Kuznetsov T.I., Dolgopolov D.V., Zakharov A.A., Chuzhinov S.N., Revel-Muroz P.A., Baryshev A.I., Fedorenko D.Y. Model dannykh dlya rascheta planovo-vysotnogo polozheniya s ispolzovaniem programmno-raschetnogo modulya [Data model for calculating the planned altitude position using a software calculation module]. Certificate of registration of a computer program. Patent RF, RU2017662021, 2017. Available at: https://www1.fips.ru/fips_servl/fips_servlet?DB=EVM&DocNum ber=2017662021&TypeFile=html (accessed 19 November 2021).
- Seleznev V.E., Klishin G.S., Kisilev V.V. Chislennoe modelirovanie pri analize opasnosti avariy na gazoprovodakh TEK [Numerical modeling in the analysis of the hazard of accidents on fuel and energy pipelines]. *Bezopasnost truda v promyshlennosti*, 2002, no. 3, pp. 23–29.
- Karpik A.P. Metodologicheskie i tekhnologicheskie osnovy geoinformatsionnogo obespecheniya territoriy: monografiya [Methodological and technological foundations of geoinformation support of territories: monograph]. Novosibirsk, SGGA Publ., 2004. 260 p
- 31. Rasputin A.N. Geoinformatsionnaya sistema otsenki vliyaniya inzhenerno-geologicheskikh faktorov na vozniknovenie korrozionnykh defektov gazoprovodov OOO «Gazprom transgaz Ekaterinburg». Dis. Kand. nauk [Geoinformation system for assessing the influence of engineering and geological factors on the occurrence of corrosion defects of gas pipelines of «Gazprom Transgaz Yekaterinburg» LLC. Cand. Dis.]. Ekaterinburg, 2011. 142 p.
- Rodriguez E., Morris C.S., Belz J.E., Chapin E., Martin J., Daffer W, Hensley S. An assessment of the SRTM topographic products. Technical Report JPL D-31639. California, Pasadena, Jet Propulsion Laboratory, 2005. 143 p. Available at: https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/SRTM_D31639.pdf (accessed 19 November 2021).

- Werner M. Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). Mission overview. *Journal of RF-Engineering and Telecommunications*, 2001, vol. 55, pp. 75–79. DOI: https://doi.org/10.1515/FREQ. 2001.55.3-4.75
- Orlyankin V.N., Alyoshina A.R. The use of matrixes of heights srtm in the preliminary calculations and mapping of depths and potential flood inundation of fluvial plain. *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2019, no. 5, pp. 72–81. In Rus. DOI: https://doi.org/ 10.31857/S0205-96142019572-81.
- 35. Korotin A.S. Popov E.V. Otsenka tochnosti tsifrovykh modeley relefa, primenyaemykh dlya territorialnykh issledovaniy [Assessment of the accuracy of digital terrain models used for territorial research]. *Grafikon'2015: Trudy Yubileynoy 25-y Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii* [Graphon'2015. Proc. of the 25th Anniversary International Scientific Conference]. Protvino, September 22–25, 2015. Protvino, Institute of Physical and Technical Informatics, 2015. pp. 102–106.
- 36. Oskorbin N.M., Sukhanov S.I. Creation of a polygon to assess the accuracy of existing raster maps and high-resolution satellite images. *Izvestiya of Altai State University*, 2011, vol. 1 (69), no. 1, pp. 108–112. In Rus. Available at: http://izvestia.asu.ru/2011/1-1/info-comp/TheNewsOfASU-2011-1-1-info-comp-14.pdf (accessed 19 November 2021).
- Kumetaitene A. Analiz tochnosti pervonachalnykh dannykh, ispolzuemykh v modelirovanii relefa [Analysis of the accuracy of the initial data used in terrain modeling]. *Interekspo Geo-Sibir*, 2005, vol. 1, no. 1, pp. 108–114.
- Farr T.G., Kobrick M. Shuttle radar topography mission produces a wealth of data. *Eos Transactions American Geophysical Union*, 2000, vol. 81, pp. 583–585. DOI: https://doi.org/10.1029/ EO081i048p00583
- Im S.T. Pogreshnosti rascheta uglov i azimutalnykh napravleniy sklonov po dannym SRTM [Errors in calculating angles and azimuthal directions of slopes according to SRTM data]. *Interekspo Geo-Sibir*, 2010, vol. 1, no. 4, pp. 164–167.
- 40. Onkov I.V., Onyanova T.Ya., Shilyaeva O.Yu. Issledovanie tochnosti radarnykh TSMR, postroennykh po snimkam ALOS PALSAR i modeli SRTM, v zavisimosti ot vida otrazhayushchey poverkhnosti [Investigation of the accuracy of radar DEMs built from ALOS PALSAR images and SRTM model, depending on the type of reflecting surface]. *Geomatika*, 2012, no. 4, pp. 33–36.
- Trofimov A.A., Filippova A.V. Otsenka tochnosti matritsy vysot SRTM po materialam topograficheskikh semok [Estimation of the accuracy of the height matrix SRTM on the materials of topographic surveys]. *Geoprofi*, 2014, no. 6, pp. 13–17.
- Frey H., Paul F. On the suitability of the SRTM DEM and ASTER GDEM for the compilation of topographic parameters in glacier inventories. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.*, 2012, vol. 18, pp. 480–490. DOI: https://doi.org: 10.1016/j.jag.2011.09.020.
- Shortridge A., Messina J. Spatial structure and landscape associations of SRTM error. *Remote Sensing of Environment*, 2011, vol. 115, no. 6, pp. 1576–1587. DOI: https://doi.org:10.1016/ j.rse.2011.02.017.
- 44. USGS EROS Archive Digital Elevation Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). U.S. Geological Survey. Available at: www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-digitalelevation-shuttle-radar-topography-mission-srtm?qt-

science_center_objects=0#qt-science_scenter_object (accessed 19 November 2021).

- 45. 21 SRTM Data. Download Manager. Available at: https://srtm. csi.cgiar.org/srtmdata/ (accessed 19 November 2021).
- 22ArcticDEM. Available at: https://www.pgc.umn.edu/data/ arcticdem/ (accessed 19 November 2021).
- Polyakova E.V., Kutinov Yu.G., Mineev A.L., Chistova Z.B. Analysis of the applicability of the ASTER GDEM v2 and ArcticDEM digital elevation models in research on Russia's Arctic territories. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, vol. 17, no. 7, pp. 117–127. In Rus. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-7117-127.
- Bogoyavlensky V.I., Bogoyavlensky I.V., Kargina T.N., Nikonov R.A. Digital technologies for remote detection and monitoring of the development of heaving mounds and craters of catastrophic gas blowouts in the Arctic. Arctic: ecology and economy, 2020, no. 4 (40), pp. 90–105. In Rus. DOI: https://doi.org/ 10.25283/2223-4594-2020-4-90-105
- Nikolskiy D.B. Sovremennye tendentsii v radiolokatsionnom distantsionnom zondirovanii Zemli [Current trends in radar remote sensing of the Earth]. *Geomatika*, 2008, no. 1, pp. 7–10.
- Barr I.D., Dokukin M.D., Kougkoulos I., Livingstone S.J., Lovell H., Małecki J., Muraviev A.Y. Using ArcticDEM to analyse the dimensions and dynamics of debris-covered glaciers in Kamchatka, Russia. *Geosciences (Switzerland)*, 2018, vol. 8, no. 6, pp. 216. DOI: https://doi.org/10.3390/geosciences8060216.
- Dai C., Durand M., Howat I.M., Altenau E.H., Pavelsky T.M. Estimating river surface elevation from ArcticDEM. *Geophysical Research Letters*, 2018, vol. 45, no. 7, pp. 3107–3114. DOI: https://doi.org/10.1002/2018GL077379
- 52. Dolgopolov D.V., Nikonov D.V., Poluyanova A.V., Melkiy V.A. Possibilities of visual decoding of trunk pipelines and infrastructure facilities using satellite images of high and ultra-high spatial resolution. *Bulletin of the SSUGiT (Siberian State University of Geosystems and Technologies)*, 2019, vol. 24, no. 3, pp. 65–81. In Rus. DOI: https://doi.org/10.33764/2411-1759-2019-24-3-65-81
- 53. Avrunev E.I., Yambaev H.K., Opritova O.A., Chernov A.V., Gogolev D.V. Evaluation of the accuracy of 3D models constructed using unmanned aircraft systems. *Bulletin of the SSUGiT (Siberian State University of Geosystems and Technologies)*, 2018, vol. 23, no. 3, pp. 211–228. In Rus.
- 54. Guk A.P., Evstratova L.G., Khlebnikova E.P., Altyntsev M.A., Arbuzov S.A., Gordienko A.S., Guk A.A., Simonov D.P. Development of techniques for automated decoding of aerospace images. Object picture interpretive features on multispectral satellite images. *Geodesy and Cartography*, 2013, no. 7, pp. 31–40. In Rus.
- 55. Khrenov N.N. Osnovy kompleksnoy diagnostiki severnykh truboprovodov. Aerokosmicheskie metody i obrabotka materialov semok [Fundamentals of complex diagnostics of northern pipelines]. Mscow, Gazoyl Press, 2003. 352 p.
- Bondur V.G. Aerospace methods and technologies for monitoring of oil and gas areas and facilities. *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*, 2010, no. 6, pp. 3–17. In Rus.

Received: 1 April 2022.

Information about the authors

Daniil V. Dolgopolov, Cand. Sc., head direction of GIS Center, Autonomous Non-profit Organization of Higher Education «Innopolis University».

Evgeny I. Avrunev, Cand. Sc., associate professor, Siberian State University of Geosystems and Technologies.

Vyacheslav A. Melkiy, Dr. Sc., leading researcher, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far East Branch of Russian Academy of Science.

Denis A. Veretelnik, executive director, Limited Liability Company «Stargeo».

Elena V. Zhidilyaeva, senior lecturer, Institute of Geography, Geology, Tourism and Service of Kuban State University.
УДК 622.24.051.64

РЕЗЦЫ РОС С ВОГНУТОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ РЕЖУЩЕЙ ГРАНИ

Нескоромных Вячеслав Васильевич¹,

sovair@bk.ru

Попова Марина Сергеевна¹,

alleniram83@mail.ru

Комаровский Игорь Андреевич1,

igorkomarovskij702@gmail.com

Лиу Баочанг²,

liubc@jlu.edu.cn

¹ Сибирский федеральный университет, Россия, 660025, г. Красноярск, пр. им. газеты «Красноярский рабочий», 95.

² Университет Цзилинь, Китай, 130061, г. Чанчунь, ул. Химинжу, 938.

Актуальность. Вибрации бурового снаряда любого происхождения, возникающие в процессе бурения скважины, приводят к снижению качества проводимых работ. Известные методы борьбы с данным явлением осложнены технически и технологически. При бурении породоразрушающим инструментом типа PDC одной из причин возникновения поперечных колебаний бурового инсрумента является низкий уровень сил трения рабочей грани резцов о горную породу. Современные возможности синтеза алмазного материала позволяют изготавливать PDC различной формы и размеров. Разработки в области создания конструкции резца PDC с вогнутой рабочей поверхностью способствуют развитию методов профилактики поперечных колебаний резца и как следствие снижению уровня вибрации всей бурильной колонны.

Цель: разработка конструкции породоразрушающего инструмента типа PDC, способствующей гашению вибраций бурового снаряда.

Объект: особенности процесса взаимодействия горной породы с резцом PDC, обладающим вогнутой формой рабочей поверхности.

Методы: метод имитационного компьютерного моделирования, метод научного познания, аналитические исследования, анализ. Результаты. Возникающие на вогнутой поверхности резца PDC усилия направлены на встречу друг другу и, противодействуя, предотвращают поперечное смещение бурового инструмента. Оптимальный угол вогнутости рабочей поверхности резца должен находиться в пределах от 104 до 155 градусов, именно такой интервал значений угла способствует созданию оптимальных условий производительности долота с сохранением антивибрационного эффекта. Конструкция резца PDC с вогнутой режущей поверхностью в виде конуса или сферы позволяет не только снижать вибрации инструмента, но и способствует очищению забоя и созданию зоны предразрушения горной породы перед резцом за счет энергии струи промывочной жидкости, что повышает эффективность разрушения горной породы.

Ключевые слова:

Бурение, борьба с вибрациями, резец РDC, компьютерное моделирование, гидравлические процессы, горная порода.

Введение

Благополучие протекания бурового процесса зависит от множества разнообразных факторов [1–32]. Так, механические колебания любой этиологии, сопутствующие бурению, не редко выступают причиной возникновения проблем при проходке скважин различного назначения. Устранение всевозможных, даже мельчайших, источников вибраций способствует повышению производительности и стабилизации направления бурения.

Одной из областей генерации поперечных колебаний является плоскость контакта породоразрушающего инструмента с породой. Причинами проявления радиальных вибраций в этой зоне являются: нестабильный режим бурения, неоднородность геологического разреза, наличие гидродинамических и других явлений, сложность системы силового воздействия на забой. В случае анизотропности перебуриваемых горных пород или наклонно-направленного бурения такие колебания усиливаются. Вибрации подобного происхождения отражаются на формировании неправильных контуров ствола скважины, уровне отклонения от заданного направления, осложняют эксплуатацию забойных телеметрических систем, повышают уровень динамических ударных нагрузок на вооружение, сказываются на износостойкости бурового става. Помимо ухудшения качества сооружения скважин и контроля процесса бурения, такие вибрации ведут к снижению ресурса инструмента, что ухудшает экономические показатели буровых работ [6, 8, 9, 18, 20, 24].

Постановка проблемы

Обычно гашения вибраций достигают путем регулирования режимов бурения или введения в промывочную жидкость реагентов, обладающих смазывающим эффектом. Однако такой способ борьбы влечет за собой снижение скорости бурения, экологическую угрозу или повышение энергоемкости, что противоречит современным требованиям производства. Одним из хорошо зарекомендовавших себя методов борьбы и профилактики вибраций, возникающих в процессе бурения, является изменение конструктивных параметров применяемого бурового снаряда и его элементов [3, 5, 6, 15, 18, 20–24].

При проектировании бурового инструмента типа PDC особое внимание уделяют схеме размещения и форме резцов. Положительные результаты в борьбе с вибрациями имеет конструкция долота компании Ulterro's New Counter Force Texnology [33]. Производители, опираясь на опыт ориентирования резцов PDC с целью повышения эффективности бурения, предложили новую технологию проектирования долот такого типа. PDC на торце долота устанавливаются так, чтобы два соседних резца рабочей гранью были повернуты навстречу друг другу [30]. Такая раскладка позволяет снижать поперечные колебания долота. Изготовитель утверждает, что, помимо стабилизации работы инструмента, конструкция долота Ulterro способствует направлению вибрационной энергии в пласт для повышения эффективности разрушения породы. Производительность применения долот Ulterro не вызывает сомнений, т. к. доказано бурением более 15 млн м в год. Согласно данным, опубликованным в журнале Международной ассоциации подрядчиков «Drilling contractor», применив долото Ulterro, на месторождении Eagle Ford (Texac) удалось установить рекорд по показателям скорости бурения (прирост составил около 41 %). При этом экономия получилась в 15 часов времени и 50000 долларов США [34].

Угол разворота резцов долот *Ulterro* навстречу друг другу незначительный, однако применение данной технологии размещения недоступно для изготовления многих типов породоразрушающего инструмента, особенно колонкового. В отличие от конструкций с традиционной схемой раскладки резцов *PDC*, технология *Ulterro* подразумевает изменение знака фронтального угла установки каждого последующего резца радиального ряда. Если первый резец имеет положительный фронтальный угол, то следующий – отрицательный, и так далее [30, 33].

Согласно многочисленным исследованиям [7, 11], резец, имеющий фронтальный угол отличный от нуля, прежде всего способствует очистке забоя. При разработке конструкции породоразрушающего инструмента подбирается такое значение угла, которое содействует механическому выходу шлама из-под резца. Причем в конструкции бескернового породоразрушающего инструмента отвод осуществляется только в направлении стенок скважины, а в конструкции колонкового есть возможность направлять разрушенную породу в двух направлениях: в сторону стенок скважины и керна [7, 16, 21]. Накопление твердой фазы перед резцом приводит к прижегу пластин *PDC* и нарушению качества бурения.

Научные исследования [7, 11] определили, что фронтальный угол установки резца *PDC* оказывает колоссальное влияние на повышение показателей процесса бурения. При оптимальном, в пределах от 5° до 10°, значении фронтального угла установки резца

можно добиться наиболее высоких показателей механической скорости бурения, одновременно снизив затраты мощности.

Согласно результатам научных работ [2, 11], скорость перемещения резца оказывает влияние на сопротивление его внедрению в породу. В зависимости от расположения резца скорость его перемещения по забою увеличивается в направлении от оси к стенкам скважины. При этом глубина внедрения резца в породу напрямую зависит от значения фронтального угла его установки. Согласно выражению [11]:

$$h = \sqrt{\left[\frac{P_{\rm OC}\sin\gamma_{\rm CK}(1-f\cdot tg\gamma_{\rm II})}{\pi\sigma_{\rm CK}\cos\varphi_{\rm P}tg\gamma_{\rm II}\sqrt{d}(1-tg\varphi_{\rm II})}\right]^3}$$

где P_{oc} – осевое усилие; $\gamma_{c\kappa}$ – угол скола породы; f – коэффициент трения; $\sigma_{c\kappa}$ – предел прочности породы на скалывание; φ_p – фронтальный угол резца; γ_n – передний угол установки резца; d – диаметр резца; φ_n – угол внутреннего трения, повышение фронтального угла установки резца *PDC* (φ_p) ведет к увеличению глубины резания–скалывания породы и как следствие к повышению показателя углубления за оборот.

Учитывая ранее полученные результаты, можно выделить следующие общие требования к армированию современного бурового инструмента резцами *PDC*: фронтальный угол установки резца *PDC* должен быть отличен от нуля; резец, расположенный на внешнем диаметре торца породоразрушающего инструмента, должен иметь наибольший фронтальный угол; оптимальным интервалом значений фронтального угла является предел от 5° до 10°; в буровых коронках скважинообразующий резец необходимо располагать в противоположном направлении кернообразующего.

Перечисленные рекомендации реализованы в консерийно-выпускаемого инструмента, струкциях например, производителем «Бирун-техно» [35], эффективность работы которых доказана промышленным внедрением. Также, придерживаясь перечисленных условий армирования инструмента, была спроектирована конструкция стабилизирующей антивибрационной коронки, разработанной группой ученых под руководством профессора А.А. Третьяка, актуальность которой подтверждена патентом на изобретение [16]. В геометрии данной коронки скважинообразующие резцы АТП (алмазные твердосплавные пластины) чередуются с кернообразующими. Каждая группа резцов фронтально развернута в противоположные друг относительно друга стороны. Стабилизирующая способность такой коронки объясняется тем, что каждый из ее резцов представляет собой элемент отдельной винтовой линии, а передний угол резцов находится в пределах от -5° до -15° [16].

Учитывая, что количество резцов на торце инструмента зависит от его диаметра, придерживаясь технологии *Ulterro*, выполнить перечисленные требования к армированию бурового инструмента резцами *PDC* затруднительно. Размещение *PDC* по методу *Ulterro* усложняется необходимостью попарного их ориентирования.

Одним из известных вариантов решения проблемы поперечных колебаний бурового инструмента является применение резцов PDC с рабочей поверхностью, содержащей вогнутые канавки, некоторые из которых имеют V-образный вид [31]. Разработчики такой формы резца ссылаются на то, что вогнутость поверхности способствует повышению сцепления и трения резца о забой, а также позволяет осуществлять сбалансированность усилий резания всех резцов, что является частой причиной возникновения вибраций. В отличие от технологии Ulterro, размещение таких резцов в буровом инструменте позволяет осуществлять гашение поперечных вибраций независимо от количества резцов в радиальном ряду, избегая необходимости их попарного ориентирования. К тому же, армируя инструмент такими резцами, без труда можно придерживаться рекомендуемых значений фронтальных и передних углов их установки. Однако очевидно, что резец с канавками на рабочей поверхности в определенных геологических условиях будет иметь склонность к зашламованию, что представляет главную опасность для алмазной пластины резца PDC.

На основании представленного опыта, отмечается необходимость разработки конструкции резца *PDC*, позволяющей предотвращать поперечные смещения инструмента, при этом обеспечивая эффективное разрушение горной породы и очистку забоя от шлама.

Методология

Проведем анализ взаимодействия резца *PDC* с горной породой в процессе бурения скважины. Стандартные резцы *PDC* состоят из плоского абразивного слоя поликристаллических алмазов – 1, твердосплавной подложки – 2 и корпуса резца – 3 (рис. 1). Буровое долото армируют резцами *PDC* фиксировано, гладкой режущей поверхностью в направлении резания-скалывания породы. При такой расстановке и форме резцов уровень сил трения на их рабочей грани довольно низкий, что приводит к возможности возникновения поперечных колебаний бурового инсрумента.

Согласно механизму разрушения горных пород, резцом типа *PDC*, подробно описанным в научных работах [7, 11], на рабочем торце резца по направлению вращения инструмента образуется сила, реализуемая на резание–скалывание горной породы (R) (рис. 1). Сила резания–скалывания R является результатом воздействия на резец осевой (P_{oc}) и тангенциальной (F) нагрузок. Доказано, что возможное изменение направления вектора усилия резания–скалывания в пределах пласта горной породы будет связано прежде всего с перераспределением областей сопротивления со стороны забоя и может изменяться в зависимости от величины и соотношения усилий P и F [11].

При установившемся режиме бурения (с постоянной глубиной внедрения резца в породу h) равнодействующая усилия резания—скалывания породы (R), создаваемая резцом, концентрируется под прямым углом к центру его режущей грани – 5 (рис. 1).

Таким образом, для концентрации разрушающей энергии в центре резца *PDC* и направления ее в пласт

с целью повышение эффективности разрушения достаточно вдоль всей поверхности его рабочей части создать вогнутое продольное углубления (рис. 2).



- Рис. 1. Схема работы двух рядом расположенных резцов PDC (вид сверху): 1 – слой поликристаллических алмазов; 2 – твердосплавная подложка; 3 – корпус; 4 – пределы области разрушения породы; R – вектор усилия резания–скалывания породы; 5 – режущая поверхность
- Fig. 1. Working diagram of two side-by-side PDC cutters (view from above): 1 – layer of polycrystalline diamonds; 2 – carbide substrate; 3 – case; 4 – limits of rock destruction area; R – vector of the cuttingshearing force of the rock; 5 – cutting surface

При бурении резцами с вогнутой формой режущей поверхности усилие резания—скалывания породы может разделиться на несколько векторов R_i ($\mathbf{R} = \sum \mathbf{R}_i$), которые будут направлены навстречу друг другу (рис. 3). Противодействуя, усилия R_i предотвращают поперечные колебания резца и таким образом гасят вибрации инструмента. Однако это произойдет только в том случае, когда величина крайних векторов усилия R_1 и R_2 будет достаточна для стабилизации движения резца (рис. 3).

Если области разрушения породы – 4, созданные усилиями R_1 и R_2 , соприкасаться не будут, в центральной части режущей грани – 5 возникнет еще один вектор усилия – R_3 , необходимый для разрушения целика, оставшегося перед резцом. При $R_3>(R_1+R_2)$ гашения колебаний может не произойти. Антивибрационный эффект гарантирован только в том случае, когда векторы усилия резания– скалывания R_1 и R_2 направлены так, что области разрушения породы – 4, возникшие от действия этих усилий, пересеклись или хотя бы имеют точку соприкосновения, находящуюся на линии, совпадающей с осью резца (рис. 3, δ). В этом случае векторов будет два, а равенство этих сил ($R_1=R_2$) обеспечит гашение поперечных колебаний резца.

Регулирование распределения усилия резанияскалывания по режущей грани резца – 5 возможно путем изменения угла вершины ее вогнутости (a). Предложенное продольное углубление на рабочей поверхности резца *PDC* может быть выполнено в виде вогнутого конуса (рис. 2, a) или сферы (рис. 2, δ).



- **Рис. 2.** Конструкция резцов долота, режущая поверхность которых выполнена в виде: а) продольного конусного углубления; б) продольной вогнутой сферы: 1 – слой поликристаллических алмазов; 2 – твердосплавная подложка; 3 – корпус; 4 – область разрушения породы; 5 – режущая поверхность
- *Fig. 2.* Design of the bit cutters, which cutting surface is made in the form of: a) longitudinal conical recess; b) longitudinal concave sphere: 1 layer of polycrystalline diamonds; 2 carbide substrate; 3 case; 4 rock destruction area; 5 cutting surface



Рис. 3. Схема возможного распределения сил и геометрии PDC с продольным углублением на рабочей поверхности в виде вогнутого конуса: а, б) вид сверху; в) вид сбоку; г) вид со стороны режущей грани; 1 – слой поликристаллических алмазов; 2 – твердосплавная подложка; 3 – корпус; 4 – область разрушения породы; 5 – режущая поверхность

Fig. 3. Possible distribution of forces and PDC geometry with a longitudinal recess on the working surface in the form of a concave cone: *a*, *b*) view from above; *c*) side view; *d*) view from the side of the cutting edge; 1 – layer of polycrystal-line diamonds; 2 – carbide substrate; 3 – case; 4 – rock destruction area; 5 – cutting surface

Согласно схеме (рис. 3, δ), показывающей распределение сил при взаимодействии резца с породой, когда два вектора усилия резания—скалывания R_1 и R_2 направлены так, что области разрушения породы – 4 от действия этих усилий соприкасаются в точке, находящейся в плоскости, проходящей через ось резца, угол вершины вогнутого конуса можно определить по формуле:

$$\alpha = 2 \operatorname{arctg} \frac{2a}{B},$$

где *а* – длина вектора *R*; *B* – длина образующей вогнутого конуса.

Геометрически проанализировав схему взаимодействия резца с породой на виде сбоку (рис. 3, в), имеем значения

$$a = OB \cdot \sin \beta,$$

$$\beta = 90 - \gamma_{CK} - \gamma_{\Pi},$$

$$OB = \frac{h}{\sin \gamma_{CK}}.$$

Следовательно, длину вектора *R* можно найти как:

$$\alpha = \frac{\sin\left(90 - \gamma_{\rm CK} - \gamma_{\rm II}\right)h}{\sin\gamma_{\rm CK}}$$

Длина образующей вогнутого конуса B будет зависеть от диаметра резца d и глубины резанияскалывания породы h (рис. 3, c) и составит

$$\mathbf{B} = \sqrt{dh - h^2} \; .$$

Таким образом, угол вершины вогнутого конуса поверхности режущей грани резца (слоя поликристаллических алмазов), способствующий гашению поперечных колебаний, должен определяться по формуле:

$$\alpha = 2 \operatorname{arctg} \frac{2 \cdot h \cdot \sin(90 - \gamma_{\mathrm{CK}} - \gamma_{\mathrm{II}})}{\sin \gamma_{\mathrm{CK}} \cdot \sqrt{dh - h^2}} \, .$$

При заданной глубине внедрения резца в породу (по углублению за оборот), придерживаясь рекомендуемых значений углов его установки, можно определить оптимальный угол вогнутости режущей грани *PDC*.

- **Таблица.** Результаты расчета угла вершины вогнутого конуса поверхности резца, способствующего гашению поперечных колебаний ($\gamma_{c\kappa}=20^\circ$; $\gamma_n=20^\circ$)
- **Table.** Results of calculating the angle of the concave cone apex of the cutter surface, contributing to the damping of lateral vibrations ($\gamma_{c\kappa}=20^\circ$; $\gamma_n=20^\circ$)

d	h	В	
мм/тт			а, град
8	4	4	155,0
	2	3,5	137,5
13	6,5	6,5	155,0
	3	5,5	135,7
16	8	8	155,0
	4	7	137,5
	2	5	104,0
19	9,5	9,5	155,0
	5	8,4	139.0

Серийно выпускаемые резцы *PDC* имеют следующий ряд диаметральных размеров: 8; 13; 16 и 19 мм.

Согласно результатам аналитических расчетов, представленных в таблице, для нормальной работы резца угол α должен находиться в пределах от 104° до 155°.

В случае формы режущей поверхности в виде вогнутой сферы (рис. 4) радиус вогнутой поверхности также будет определятся значением угла α . В соответствии со схемой (рис. 4), показывающей распределение сил при взаимодействии резца с породой, радиус вогнутой сферы *r* определяется как

$$r=rac{AB}{2sinrac{lpha}{2}}.$$

На конструкцию долота, армированного резцами *PDC* с вогнутой режущей гранью, было получен решение о выдаче патента [36], что актуализирует проведение дальнейшего изучения работы резца такой геометрии на забое скважины.



- Рис. 4. Схема для определения геометрических параметров резца, режущая поверхность которого выполнена в виде продольной вогнутой сферы
- Fig. 4. Scheme for determining the geometric parameters of the cutter, which cutting surface is made in the form of a longitudinal concave sphere

Согласно ранее проведенным научным исследованиям [11–13], в процессе бурения в призабойной зоне образуется определенная «среда», представляющая собой смесь промывочной жидкости с разрушенной горной породой [12]. Качество «среды» определяется типом, свойствами породы и выбранного для бурения очистного агента. Гидродинамические процессы, сопутствующие бурению, формируют под рабочим торцом резца PDC три зоны давления [12, 13], размер области распространения которых зависит от параметров «среды» (плотности, вязкости и т. д.), характера циркуляции жидкости, а также от вида ориентирования резца в породоразрушающем инструменте. В зависимости от угла наклона PDC относительно забоя, «среда» может оказывать сопротивление внедрению резца в породу и способствовать предразрушению породы за счет энергии струи. Полученные результаты указывают на необходимость исследования гидродинамических процессов, возникающих на забое при бурении скважин буровым инструментом, армированным резцами PDC с вогнутой рабочей поверхностью.

По предварительной оценке, учитывая вогнутость формы режущей грани резца, при определенной оптимальной величине переднего угла установки (γ_{n}) активизируется очистка забоя и повышается производительность бурения за счет целенаправленного движения струи жидкости в породу, при этом (в случае малых γ_{n}) существует риск зашламования вогнутой части резца и создания дополнительного сопротивления «среды» внедрению резца в забой.

Область взаимодействия резца с породой – мелкогабаритная система исследования, для достоверного и доступного изучения гидродинамических процессов, протекающих под резцом *PDC*, принят метод компьютерного иммитационного моделирования, хорошо зарекомендовавший себя при исследовании характера распределения давления в прозабойной зоне [1, 4, 17, 19, 26–29, 32].

Имитационное моделирование

Моделирование осуществлялось с применением метода конечных элементов. Для упрощения системы исследования модель состояла из доменов: резца, призабойной зоны и промывочной жидкости. Для возможности сравнения на первом этапе произведено моделирование гидравлических процессов, протекающих при бурении долотом, армированным по технологии Ulterro, и долотом, армированным резцами PDC, режущая поверхность которых выполнена в виде вогнутого конуса.

Согласно результатам компьтерного моделирования (рис. 5), при установки двух соседних *PDC* по технологии *Ulterro* (навстречу друг к другу) зона максимального давления «среды» сосредотачивается между резцами, причем чем ближе распологаются резцы, тем величина давления больше. К тому же, малый зазор ведет к созданию местных сопротивлений, и такое гидробарическое состояние может привести к тому, что область между резцами омываться не будет. Учитывая, что фронтальное раположение резцов по технологии *Ulterro* ведет к смещению шлама именно в межрезцовое пространство, здесь при определенных геологических условиях может образоваться «пробка» шлама, которая при накоплении приведет к прижегу.



Рис. 5. Результаты моделирования гидродинамических процессов, протекающих на забое скважины при бурении породоразрушающим инструментом, армированным резцами PDC по технологии Ulterro: а) распределение зон давления в пределах двух смежных резцов (красным выделено максимальное значение); б) направление и скорость течения жидкости в пределах двух смежных резцов

Fig. 5. Results of simulation of hydrodynamic processes occurring at the bottom of the well when drilling with rock cutting tools reinforced with PDC cutters using Ulterro technology: a) distribution of pressure zones within two adjacent incisors (maximum value is highlighted in red); b) direction and speed of fluid flow within two adjacent cutters

Так же как при бурении резцами *PDC* стандартной формы, под резцом с вогнутой поверхностью режущей грани наблюдается формирование зон, отличающихся по величине гидравлического давления (рис. 6). Изменение значения переднего угла (γ_n) установки резца оказывает влияние на характер распределения зон давления под резцом. При этом, согласно результатам проведенного исследования и сравнительного анализа, степень влияния параметра γ_n больше при использовании резца с вогнутой режущей гранью, чем при бурении резцом с плоским торцом. К тому же, как показывают результаты имитационного исследования, при прочих равных условиях, вогнутость режущей грани способствует понижению уровня значений давления. Так, при бурении в одинаковых условиях и армировании инструмента с передним углом установки *PDC* равным -25° под резцом с вогнутой режущей гранью давление в 1,5–2 раза ниже, чем под стандартным плоским резцом (рис. 6, *a*, *б*). Аналогичная ситуация наблюдается и при меньших значениях переднего угла установки. При этом в случае армирования породоразрушающего инструмента резцами *PDC* с передним углом, равным -15° , давление под резцом с вогнутой режущей поверхностью более чем в два раза ниже, чем под стандартным (рис. 6, *в*, *г*).

Вогнутость режущей грани всегда (при любых условиях бурения и армирования инструмента) спо-

собствует концентрации зоны высокого давления и максимального напора промывочной жидкости в центральной части рабочего торца PDC. С уменьшением значения переднего угла установки резца с вогнутой режущей поверхностью наблюдается тенденция смещения зоны максимального давления к точке пересечения плоскости вогнутости резца с плоскостью его контакта с породой (данные получены при изменении γ_{π} от -25° до -15°) (рис. 6, б, г). Причем чем меньше угол вогнутости α, тем больше величина давления и скорости течения жидкости в этой наиболее нагруженной (с точки зрения разрушающей способности) области резца. На рис. 7, а показано, как под резцом *PDC* с углом вершины вогнутого конуса а, равным 104°, сформировались три зоны давления (красным обозначен участок с наибольшими показателями, желтым - с наименьшими). По залеганию изобар видно (рис. 7, а), что зона максимального давления распологается преимущественно вдоль вогнутости. При увеличении угла вершины вогнутого конуса до 155° давление под резцом падает на 30 %, а зона максимального давления преобретает менее сконцентрированный у линии вогнутости вид (рис. 7, *б*). При этом зона максимального давления сместилась ближе к контакту резца с породой.

Чем больше область распространения зоны максимального давления под резцом, тем больше вероятность образования сил сопротивления «среды» внедрению резца в породу. Вместе с тем точечная концентрация давления у забоя способствует проникновению жидкости в пласт с целью дополнительного его разобщения, что благоприятствует предразрушению забоя.

Увеличение угла α при неизменном переднем угле установки резца позволяет смещать зону максимального давления жидкости ближе к плоскости контакта резца с породой, при этом площадь максимального давления жидкости на резец уменьшается, что с другой стороны способствует снижению сопротивления внедрению резца.



- **Рис. 6.** Результаты моделирования гидродинамических процессов, протекающих в пределах резца PDC: а) стандартной формы с передним углом установки γ_n= -25°; б) с режущей поверхностью в виде вогнутого конуса с углом α=123°, γ_n= -25°; в) стандартной формы с передним углом установки γ_n= -15°; г) с режущей поверхностью в виде вогнутого конуса с углом α=123°, γ_n= -15°
- Fig. 6. Simulation results of hydrodynamic processes occurring within the PDC cutter: a) standard shape with front mounting angle $\gamma_n = -25^\circ$; b) with a cutting surface in the form of a concave cone with an angle $\alpha = 123^\circ$, $\gamma_n = -25^\circ$; c) standard shape with front mounting angle $\gamma_n = -15^\circ$; d) with a cutting surface in the form of a concave cone with an angle $\alpha = 123^\circ$, $\gamma_n = -15^\circ$; d) with a cutting surface in the form of a concave cone with an angle $\alpha = 123^\circ$, $\gamma_n = -15^\circ$.

Независимо от величины угла вогнутости α основной объем жидкости, поступающей под резец, устремляется строго в центр режущей грани *PDC*, создавая там вихрь турбулентности. После встречи с породой струя промывочной жидкоти разделяется на два равных противоположно направленных потока и далее движется за пределы резца, омывая боковые ча-

сти его рабочей поверхности (рис. 7, e). Изменяя угол а, появляется возможность управления напором жидкости. Уменьшение величины а способствует увеличению скорости течения под режущей гранью резца и как следствие повышению интенсивности проникновения жидкости в породу.



- Рис. 7. Результаты компьютерного моделирования гидродинамических процессов, протекающих в пределах резца PDC с режущей поверхностью в виде вогнутого конуса (γ_n= -25°): а) распределение зон давления в случае, если угол вершины вогнутого конуса α=104°; б) распределение зон давления в случае, если угол вершины вогнутого конуса α=155°; в) линии тока промывочной жидкости в пределах резца PDC, угол вершины вогнутого конуса которого α=155°
- Fig. 7. Results of computer simulation of hydrodynamic processes occurring within the PDC cutter with a concave cone cutting surface ($\gamma_n = -25^\circ$): a) distribution of pressure zones in case the angle of the apex of the concave cone $\alpha = 104^\circ$; b) distribution of pressure zones if the angle of the apex of the concave cone $\alpha = 155^\circ$; c) flow lines of the flushing fluid within the PDC cutter, the angle of the apex of the concave cone of which $\alpha = 155^\circ$

Обсуждение, выводы, предложения

Таким образом, применение резцов *PDC* с вогнутой режущей гранью обеспечивает гашение поперечных колебаний бурового снаряда и, устраняя воздействие на резец ударных нагрузок, увеличивает ресурс породоразрушающего инструмента. К тому же предложенная форма *PDC* с углублением на рабочей поверхности способствует направлению струи промывочной жидкости, поступающей из каналов долота, строго в цент режущей грани резца, что содействует охлаждению и улучшению очистки алмазной пластины резца от шлама в самой нагруженной ее части. Одновременно, путем регулирования углов ориентирования резца и угла вершины вогнутости его режущей грани, можно добиться такого оптимального положения *PDC*, при котором интенсивное течение жидкости в зоне контакта резца с породой будет оказывать наименьшее давление на поверхность резца. При этом координация углов α и $\gamma_{\rm п}$ должна согласовываться с геологическими условиями бурения. Если это необходимо, направлять струю жидкости в породу или наоборот, снижая давление, минимизировать сопротивление внедрению резца в породу.

Основные выводы:

1. Контрукция резца *PDC* с вогнутой режущей гранью позволяет армировать буровой породоразрушающий инструмент с соблюдением всех рекомендуемых значений углов его установки.

- Оптимальный угол вогнутости рабочей поверхности резца, обеспечивающий гашение поперечных колебаний при эффективном разрушении горной породы, должен находиться в пределах от 104 до 155°.
- При бурении в более мягких породах рекомендуется уменьшать угол вогнутости и увеличивать передний угол установки резца, что содействует образованию зоны предразшения породы за счет энергии струи промывочной жидкости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- A novel method for measuring and analyzing the interaction between drill bit and rock / X. Wang, Z. Wang, D. Wang, L. Chai // Measurement. – 2018. – V. 121. – P. 344–354.
- Борисов К.И. Современные методы оценки сопротивления горных пород резанию-скалыванию при бурении долотами PDC: монография. – Томск: Изд-во ТПУ, 2013. – 166 с.
- Принципы конструирования и эксплуатации алмазного породоразрушающего инструмента / А.А. Буканов, Л.К. Горшков, А.И. Осецкий, Н.В. Соловьев // Разведка и охрана недр. – 2013. – № 7. – С. 44–49.
- Detournay E., Richard T., Shepherd M. Drilling response of drag bits: theory and experiment // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2008. – V. 45 (8). – P. 1347–1360.
- 5. Двойников М.В., Куншин А.А. Повышение эффективности бурения наклонных и горизонтальных скважин // Деловой журнал NEFTEGAZ.RU. – 2020. – № 4 (100). – С. 98–101.
- Евсеев В.Д., Мавлютов М.Р. Пути повышения эффективности разрушения горных пород // Материалы региональной конференции геологов Сибири, Дальнего Востока и Северо-Востока России. – 2000. – Т. I. – С. 463–465.
- Сверхтвердые материалы в геологоразведочном бурении: монография / П.В. Зыбинский, Р.К. Богданов, А.П. Закора, А.М. Исонкин. – Донецк: Норд-пресс, 2007. – 244 с.
- Tonon F., Amadei B. Effect of elastic anisotropy on tunnel wall displacements behind a tunnel face // Rock Mechanics and Rock Engineering. – 2002. – V. 35 (3). – P. 141–160.
- Башмур К.А., Петровский Э.А., Богачев В.В. Метод измерения вибраций скважинного инструмента при бурении скважин на нефть и газ // Автоматизация в промышленности. – 2019. – № 10. – С. 33–36.
- Бессон А., Берр Б., Диллард С. Новый взгляд на режущие элементы буровых долот // Нефтегазовое обозрение. – 2002. – № 2. – С. 26–30.
- Нескоромных В.В., Попова М.С., Баочанг Л. Разрушение горных пород при бурении скважин алмазным буровым инструментом: монография. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2020. – 268 с.
- Нескоромных В.В., Попова М.С., Баочанг Л. Влияние среды призабойной зоны скважины на эффективность разрушения горной породы резцом РDC // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 9. – С. 119–127.
- Нескоромных В.В., Попова М.С., Чихоткин А.В. Методика проектирования долот с резцами PDC, учитывающая динамические процессы резания-скалывания горной породы и сопротивление среды // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2020. – Т. 7 (331). – С. 13–18.
- Нескоромных В.В., Попова М.С. Основы системного подхода к проектированию бурового инструмента // Научнотехнический журнал «Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море». – 2018. – № 8. – С. 26–31.
- Инновационные подходы к конструированию высокоэффективного породоразрушающего инструмента / А.Я. Третьяк, В.В. Попов, А.Н. Гроссу, К.А. Борисов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – № 8. – С. 225–230.
- Стабилизирующая кольцевая буровая коронка: пат. Рос. Федерация, № 2577351, заявл. 26.01.15, опубл. 20.03.16., Бюл. № 8. – 5 с.

4. В породах, слабо подверженных разупрочнению жидкостью, рекомендуется применять резец с максимально возможным углом вогнутости и ориентировать его в инструменте с минимально возможным передним углом, что позволит повысить эффективность разрушения за счет внедрения резца в породу, своевременной очистки подрезцовой зоны и снижения сопротивления «среды».

Исследование выполнено при финансовой поддержке Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-технической деятельности.

- Brook B. Principles of diamond tool technology for sawing rock // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2002. – V. 39 (1). – P. 41–58.
- Снижение вибраций в процессе бурения путем совершенствования конструкции росдолот / Р.Р. Мингазов, Г.Г. Ишбаев, А.Г. Балута, А.Ю. Драган, В.У. Ямалиев // Бурение и нефть. – 2021. – № 4. – С. 14–17.
- Сериков Д.Ю., Гаффанов Р.Ф. Исследование напряженнодеформируемого состояния двух смежных центробежнообъемного-армированных зубъев вооружения шарошечного бурового инструмента // Строительство нефтяных и газовых скважин на суще и на море. – 2018. – № 9. – С. 42–47.
- Третьяк А.Я., Борисов К.А. Классификация поломок пластин PDC, вызываемых забойными вибрациями при бурении скважин // Результаты исследований – 2020: Материалы V Национальной конференции профессорско-преподавательского состава и научных работников ЮРГПУ (НПИ). – Новочеркасск, 2020. – С. 252–254.
- Фролова М.С. Технологические особенности работы долот и коронок серии PDC при бурении геолого-разведочных скважин // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 2016. – № 6. – С. 91–92.
- Optimization model for polycrystalline diamond compact bits based on reverse design / Z. Ai, Y. Han, Y. Kuang, Y. Wang, M. Zhang // Advances in Mechanical Engineering. – 2018. – V. 10 (6). – P. 476–479.
- Basarir H., Karpuz C. Preliminary estimation of rock mass strength using diamond bit drilling operational parameters // International Journal of Mining, Reclamation and Environment. – 2016. – V. 30 (2). – P. 145–164.
- Che D., Zhu W.-L., Ehmann K.F. Chipping and crushing mechanisms in orthogonal rock cutting // International Journal of Mechanical Sciences. – 2016. – № 119. – P. 224–236.
- 25. Closed-form solution of stress state and stability analysis of wellbore in anisotropic permeable rocks / D.-P., Do N.-H. Tran, H.-L. Dang, D. Hoxha // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2019. – № 113. – P. 11–23.
- 26. Dong G., Chen P. 3D numerical simulation and experiment validation of dynamic damage characteristics of anisotropic shale for percussive-rotary drilling with a full-scale PDC bit // Energies. – 2018. – V. 11 (6). – P. 13–26.
- Numerical investigations on the effect of ultra-high cutting speed on the cutting heat and rock-breaking performance of a single cutter / M. Gao, K. Zhang, Q. Zhou, H. Zhou, B. Liu, G. Zheng // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2020. – V. 190. – P. 107–120.
- Hasan A.R., Kabir C.S. Wellbore heat-transfer modeling and applications // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2012. – V. 96–97. – P. 109–119.
- Huang H., Lecampion B., Detournay E. Discrete element modeling of tool-rock interaction I: rock cutting // International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. – 2013. – № 37 (13). – P. 1913–1929.
- 30. Drill bit: Patent 2020/0149350 A1 US. Fil. 9.11.2019; Pub. Date: 14.05. 2020.
- 31. Cutter having shaped working surface with varying edge chamfer: Patent 8739904 US. Fil. 10.12.2013; Publ. 03.06.2014
- Su O., Ali Akcin. Numerical simulation of rock cutting using the discrete element method // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2011. – V. 48 (3). – P. 434–442.

- Брошюра «Strike, balance». Продукция Ulterro's New Counter Force Texnology. URL: https://ulterra.com/wp-content/uploads/ 2020/08/CounterForce-Brochure-2020.pdf (дата обращения 12.11.2021).
- Magazine of the international Association of Drilling Contractors. URL: https://www.drillingcontractor.org/people-companiesproducts-32-23754 (дата обращения 12.11.2021).
- Каталог товаров компании ООО «БИНУР-ТЕХНО». URL: https://binur-tekhno.ru/pic/nom2/bur_koronki_11.jpg (дата обращения 12.11.2021).
- Заявка на изобретение. URL: https://fips.ru/registers-docview/fips_servlet (дата обращения 12.11.2021)

Поступила 08.04.2022 г.

Информация об авторах

Нескоромных В.В., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии и техники разведки Института горного дела, геологии и геотехнологий Сибирского федерального университета.

Попова М.С., кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и техники разведки Института горного дела, геологии и геотехнологий Сибирского федерального университета.

Комаровский И.А., аспирант кафедры технологии и техники разведки, Сибирский федеральный университета. *Баочанг Л.*, профессор геоинженерии кафедры разведки и бурения, Университет Цзилинь.

UDC 622.24.051.64

CONCAVE PDC CUTTER

Vyacheslav V. Neskoromnykh¹,

sovair@bk.ru

Marina S. Popova¹,

alleniram83@mail.ru

Igor A. Komarovsky¹,

igorkomarovskij702@gmail.com

Liu Baochang²,

liubc@jlu.edu.cn

- Siberian Federal University,
 95, Krasnoyarskiy rabochiy avenue, Krasnoyarsk, 660095, Russia.
- ² Jilin University,
 938, Ximinzhu street, Changchun, 130026, China.

The relevance. Vibrations of a drill string of any origin, arising while drilling a well, lead to a decrease in the quality of the work performed. The known methods of combating this phenomenon are technically and technologically complicated. When drilling with a PDC-type rock cutting tool, one of the reasons for the occurrence of lateral vibrations of the drilling tool is the low level of friction forces of the working edge of the cutters against the rock. Modern possibilities for the synthesis of diamond material make it possible to manufacture PDCs of various shapes and sizes. Developments in the field of creating a PDC cutter with a concave working surface contribute to the development of methods for preventing lateral oscillations of the cutter, and as a result, reducing the vibration level of the entire drill string.

The purpose of the research is to develop the design of the PDC-type rock cutting tool, which helps to damp the vibration of the drill string. Methods: method of computer simulation, method of scientific knowledge, analytical research, analysis.

Results. The forces arising on the concave surface of the PDC cutter are directed towards each other, counteracting and preventing lateral displacement of the drilling tool. The optimal angle of concavity of the working surface of the cutter should be in the range from 104 to 155 degrees, it is this range of angle values that contributes to the creation of optimal conditions for the performance of the bit while maintaining the anti-vibration effect. The design of the PDC cutter with a concave cutting surface in the form of a cone or sphere allows not only reducing tool vibrations, but also contributes to cleaning the bottom and creating a zone of pre-fracture of the rock in front of the cutter due to the energy of the jet of drilling fluid, which increases the efficiency of rock destruction.

Key words:

Drilling, vibration control, PDC cutter, computer simulation, hydraulic processes, rock formation.

The research was financially supported by the Krasnoyarsk regional fund of supporting scientific and technological activities.

REFERENCES

- 1. Wang X., Wang Z., Wang D., Chai L. A novel method for measuring and analyzing the interaction between drill bit and rock. *Measurement*, 2018, vol. 121, pp. 344–354.
- Borisov K.I. Sovremennye metody otsenki soprotivleniya gornykh porod rezaniyu-skalyvaniyu pri burenii dolotami PDC. Monografiya [Modern methods for assessing the resistance of rocks to cutting-chipping when drilling with PDC bits. Monograph]. Tomsk, TPU Publ. house, 2013. 166 p.
- Bukanov A.A., Gorshkov L.K., Ösetskiy A.I., Soloviev N.V. Printsipy konstruirovaniya i ekspluatatsii almaznogo porodorazrushayushchego instrumenta [Principles for the design and operation of diamond rock cutting tools]. *Razvedka i ohrana nedr*, 2013, no. 7, pp. 44–49.
- Detournay E., Richard T., Shepherd M. Drilling response of drag bits: theory and experiment. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2008, vol. 45 (8), pp. 1347–1360.
- Dvoinikov M.V., Kunshin A.A. Povyshenie effektivnosti bureniya naklonnykh i gorizontalnykh skvazhin [Improving the efficiency of drilling directional and horizontal wells]. *Business magazine NEFTEGAZ.RU*, 2020, no. 4 (100), pp. 98–101.
- Evseev V.D., Mavlyutov M.R. Puti povysheniya effektivnosti razrusheniya gornykh porod [Ways to increase the efficiency of rock destruction]. *Materialy regionalnoy konferentsii geologov Sibiri, Dalnego Vostoka i Severo-Vostoka Rossii,* 2000, vol. I, pp. 463–465.

- Zybinsky P.V., Bogdanov R.K., Zakora A.P., Isonkin A.M. Sverkhtverdye materialy v geologorazvedochnom burenii. Monografiya [Superhard materials in exploration drilling: monograph]. Donetsk, Nord-press, 2007. 244 p.
- Tonon F., Amadei B. Effect of elastic anisotropy on tunnel wall displacements behind a tunnel face. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2002, vol. 35, no. 3, pp. 141–160.
- Bashmur K.A., Petrovsky E.A., Bogachev V.V. Metod izmereniya vibratsiy skvazhinnogo instrumenta pri burenii skvazhin na neft i gaz [Method for measuring vibrations of downhole tools when drilling oil and gas wells]. Avtomatizatsiya v promyshlennosti, 2019, no. 10, pp. 33–36.
- 10. Besson A., Burr B., Dillard S. Reinventing drill bit cutters. *Oil and Gas Review*, 2002, no. 2, pp. 26–30.
- Neskoromnih V.V., Popova M.S., Liu Baochang. Razrushenie gornykh porod pri burenii skvazhin almaznym burovym instrumentom. Monografiya [Destruction of rocks when drilling wells with diamond drilling tools: Monograph]. Krasnoyarsk, Siberian Federal University Publ., 2020. 268 p.
- Neskoromnykh V.V., Popova M.S., Liu Baochang. Influence of the near-wellbore zone environment on the efficiency of rock destruction with a PDC cutter. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering, 2021, vol. 332, no. 9, pp. 119–127. In Rus.
- Neskoromnykh B.B., Popova M.S., Chikhotkin A.V.Methodology for designing bits with PDC cutters, taking into account the dy-

namic processes of cutting-chipping of rocks and the resistance of the environment. *Construction of oil and gas wells on land and sea*, 2020, vol. 7 (331), pp. 13–18. In Rus.

- Neskoromnykh V.V., Popova M.S. Basics of a systematic approach to the design of drilling tool. *Construction of oil and gas wells on land and sea*, 2018, vol. 8, pp. 26–31. In Rus.
- Tretyak A.Ya., Popov V.V., Grossu A.N., Borisov K.A. Innovative approaches to the design of highly efficient rock cutting tools. *Gorny informatsionno-analiticheskii byulleten*, 2017, no. 8, pp. 225–230. In Rus.
- Tretyak A.A., Litkevich Yu.F., Savenok O.V., Turovsky I.G. Stabiliziruyushchaya koltsevaya burovaya koronka [Stabilizing ring drill bit]. Patent RF, no. 2577351, 2016.
- Brook B. Principles of diamond tool technology for sawing rock. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2002, vol. 39 (1), pp. 41–58.
- Mingazov R.R., Ishbaev G.G., Baluta A.G., Dragan A.Yu., Yamaliev V.U. Reducing vibrations while drilling by improving the design of the bit. *Drilling and oil*, 2021, no. 4, pp. 14–17. In Rus.
- Serikov D.Y., Gaffanov R.F. Investigation of the stress-strain state of two adjacent centrifugal-volume-reinforced teeth of the armament of a bit drilling tool. *Scientific-technical journal «Construction of oil and gas wells on land and sea»*, 2018, no. 9, pp. 42–47. In Rus.
- Tretyak A.Ya., Borisov K.A. *Klassifikatsiya polomok plastin PDC*, vyzyvaemykh zaboynymi vibratsiyami pri burenii skvazhin [Classification of PDC plate fractures caused by downhole vibrations during well drilling]. Rezultaty issledovany – 2020. Materialy V Natsionalnoy konferentsii professorsko-prepodavatelskogo nauchnykh rabotnikov YuRGPU (NPI) [Research results – 2020. Materials of the V National Conference of the teaching staff and researchers of the YRSPU (NPI)]. Novocherkassk, 2020. pp. 252–254.
- Frolova M.S. Technological features of the operation of drill bits and drill crowns of *PDC* series in boring of geological prospecting wells. *Proceedings of higher educational establishments. Geology* and Exploration, 2016, no. 6, pp. 91–92. In Rus.
- Ai Z., Han Y., Kuang Y., Wang Y., Zhang M. Optimization model for polycrystalline diamond compact bits based on reverse design. *Advances in Mechanical Engineering*, 2018, vol. 10 (6), pp. 476–479.
- Basarir H., Karpuz C. Preliminary estimation of rock mass strength using diamond bit drilling operational parameters. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 2016, vol. 30 (2), pp. 145–164.
- Che D., Zhu W.-L., Ehmann K.F. Chipping and crushing mechanisms in orthogonal rock cutting. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2016, no. 119, pp. 224–236.

- Do D.-P., Tran N.-H., Dang H.-L., Hoxha D. Closed-form solution of stress state and stability analysis of wellbore in anisotropic permeable rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2019, vol. 113, pp. 11–23.
- Dong G., Chen P. 3D numerical simulation and experiment validation of dynamic damage characteristics of anisotropic shale for percussive-rotary drilling with a full-scale *PDC* bit. *Energies*, 2018, vol. 11 (6), pp. 13–26.
- 27. Gao M., Zhang K., Zhou Q., Zhou H., Liu B., Zheng G. Numerical investigations on the effect of ultra-high cutting speed on the cutting heat and rock-breaking performance of a single cutter. *Journal* of *Petroleum Science and Engineering*, July 2020, vol. 190, article no. 107120.
- Hasan A.R., Kabir C.S. Wellbore heat-transfer modeling and applications. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2012, vol. 96–97, pp. 109–119.
- Huang H., Lecampion B., Detournay E. Discrete element modeling of tool-rock interaction I: Rock cutting. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2013, no. 37 (13), pp. 1913–1929.
- Silveus J.A., Skinner A.H., Chrest B. Drill bit. Patent 2020/0149350 A1 US, 2020.
- Yuelin Shen, Youhe Zhang, Kristiansen S.S. Cutter having shaped working surface with varying edge chamfer. Patent 8739904 US, 2014.
- 32. Su O., Ali Akcin. Numerucal simulation of rock cutting using the discrete element method. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2011, vol. 48 (3), pp. 434–442.
- Brochure «Strike, balance». Products Ulterro's New Counter Force Texnology. Available at: https://ulterra.com/wpcontent/uploads/2020/08/CounterForce-Brochure-2020.pdf (accessed 12 November 2021).
- Magazine of the international Association of Drilling Contractors. Available at: https://www.drillingcontractor.org/peoplecompanies-products-32-23754 (accessed 12 November 2021).
- Katalog tovarov kompanii «BINUR-TEKHNO» [Product catalog of the company «BINUR-TEKHNO» LLC]. Available at: https://binur-tekhno.ru/pic/nom2/bur_koronki_11.jpg (accessed 12 November 2021).
- Zayavka na izobretenie [Application for an invention]. Available at: https://fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet (accessed 12 November 2021).

Received: 8 April 2022.

Information about the authors

Vyacheslav V. Neskoromnykh, Dr. Sc., professor, head of the department of technology and equipment of investigation, Siberian Federal University.

Marina S. Popova, Cand. Sc., associate professor, Siberian Federal University.

Igor A. Komarovsky, graduate student, Siberian Federal University.

Liu Baochang, professor, Jilin University.

УДК 622.276.6

ТЕХНОЛОГИЯ РАЗРАБОТКИ НЕОДНОРОДНОЙ ЗАЛЕЖИ МАССИВНОГО ТИПА С ГАЗОНЕФТЯНЫМ И ВОДОНЕФТЯНЫМ КОНТАКТАМИ

Леонтьев Дмитрий Сергеевич¹,

leontevds@tyuiu.ru

Ваганов Юрий Владимирович1,

vaganovjv@tyuiu.ru

Шаляпин Денис Валерьевич¹, shaljapindv@tyuiu.ru

Шаляпина Аделя Данияровна¹,

shaljapinaad@tyuiu.ru

Жигалковская Мария Игоревна¹,

zhigalkovskajami@tyuiu.ru

¹ Тюменский индустриальный университет, Россия, 625048, г. Тюмень, ул. Мельникайте, 70.

Актуальность. В настоящее время нефтегазодобывающей промышленности России приходится сталкиваться с определенными трудностями, впияющими на эффективность добычи углеводородов и уровень разработанности месторождений нефти и газа, соответственно. Особый интерес добывающих предприятий и научного сообщества представляют трудноизвлекаемые запасы, поскольку их объем велик и с каждым годом повсеместно увеличивается. На данный момент, по оценке Минэнерго РФ, доля трудноизвлекаемых запасов составляет более 65 % от общего объема доказанных запасов в стране. Время «легкой нефти» заканчивается. На данный момент в общероссийской добыче доля трудноизвлекаемых запасов составляет около 10 %. По этой причине существует необходимость разработки и внедрения новых технологий воздействия на пласты, содержащие такую нефть, и усовершенствования существующих методик.

Цель: разработать эффективную технологию повышения коэффициента нефтеизвлечения залежи массивного типа, сложенной неоднородным терригенным коллектором с наличием газонефтяного и водонефтяного контактов.

Объектом является залежь массивного типа, сложенная неоднородным терригенным коллектором с наличием газонефтяного и водонефтяного контактов.

Методы: анализ современной научно-технической литературы и производственных отчетов по результатам применения различных технико-технологических решений по повышению дебита скважин и снижению обводненности продукции; описание новой технологии разработки неоднородной залежи массивного типа с газонефтяным и водонефтяным контактами.

Результаты. Предложена технология разработки неоднородной залежи массивного типа с газонефтяным и водонефтяным контактами. Технология позволит повысить эффективность добычи нефти за счет увеличения зоны охвата залежи в нефтенасыщенной части пласта. Новизна заключается в системе расстановки добывающих скважин с горизонтальным окончанием и наклонными ответвлениями относительно уровней водонефтяного и газонефтяного контактов в залежи массивного типа, а также направленности и очередности бурения наклонных ответвлений скважитов.

Ключевые слова:

Трудноизвлекаемые запасы, скважина с горизонтальным окончанием, Сеноманский ярус, Покурская свита, газонефтяной контакт, водонефтяной контакт, неоднородная залежь.

Введение

Последние годы в нефтегазодобывающей промышленности России возникают проблемы, которые не только негативно влияют на нынешнюю эффективность разработки месторождений углеводородного сырья, но и в будущем могут сказаться на запланированных уровнях добычи нефти и газа. К таким ситуациям относятся: снижение прироста запасов, ежегодное увеличение трудноизвлекаемых запасов (ТРИЗ), вступление большинства крупных и уникальных месторождений в позднюю стадию разработки и проч. [1–7].

Как уже было сказано выше, с каждым годом растет доля ТРИЗ – тех запасов, которые, как правило, заключены в геологически сложнопостроенных пластах (залежах) и представлены нефтью с высокой вязкостью. Добывающие скважины, эксплуатирующие такие залежи, характеризуются сравнительно низкими дебитами, а сами залежи – невысокими темпами разработки.

Все вышеперечисленное обусловливает необходимость разработки и внедрения новых технологий воздействия на продуктивных пласт и систем разработки залежей, содержащих трудноизвлекаемые запасы [8–13].

Предлагаемая авторами технология рекомендуется к применению при разработке залежей массивного типа, которые сложены неоднородным терригенным коллектором, а также с наличием газонефтяного (ГНК) и водонефтяного контактов (ВНК). Технология позволяет обеспечить повышение эффективности добычи нефти за счет увеличения зоны дренирования добывающих скважин с горизонтальными окончаниями, пробуренных в нефтенасыщенном интервале пласта, а также снижение преждевременной обводненности и загазованности добываемой скважинами продукции [14–16].

Технология разработки неоднородной залежи массивного типа с газонефтяным и водонефтяным контактами, залегающей в кровельной части Сеноманского яруса Покурской свиты, можно рекомендовать на одном из месторождений ЯНАО, залежи которого находятся в продуктивном пласте ПК₁₋₃.

Краткие сведения о месторождении. Рассматриваемое месторождение относится к категории сложных в Западной Сибири, что главным образом обусловлено многопластовостью и неоднородностью строения продуктивных пластов, наличием зон замещения пластов-коллекторов непроницаемыми породами и многочисленными дизъюнктивными нарушениями, многофазовым характером флюидонасыщения большинства залежей и свойствами нефти пласта ПК₁₋₃, а именно наличием нефтяной перемычки с обширной газовой шапкой и нижезалегающими подошвенными водами [9].

На месторождении для эффективной разработки пласта ПК₁₋₃ проводятся такие методы увеличения нефтеотдачи пластов, как:

- многостадийный гидроразрыв пласта в скважинах с горизонтальным окончанием;
- строительство скважин по технологии Fishbone (рис. 1);
- организация поддержания пластового давления при реализации уплотненной сетки скважин по различной системе и различной конструкции нагнетательных скважин;
- физико-химические методы увеличения нефтеотдачи пластов, а точнее закачивание полимерных композиций.



Рис. 1. Принципиальная схема реализации технологии Fishbone в продуктивном пласте ΠK_{1-3} **Fig. 1.** Schematic diagram of the implementation of Fishbone technology in the PK_{1-3} productive reservoir

Технология разработки неоднородной залежи массивного типа с газонефтяным и водонефтяным контактами

Предлагаемая авторами технология близка к технологии Fishbone. Технология разработки неоднородной залежи массивного типа с газонефтяным – 1 и водонефтяным – 2 контактами (ГНК и ВНК, соответственно) первоначально включает бурение наклонно направленной скважины – 3 с горизонтальным вхождением – 4 в нефтенасыщенный интервал пласта – 5. Горизонтальный участок скважины проектируют не менее чем на 10 м ниже уровня ГНК. После бурения горизонтального участка ствол скважины обсаживают и цементируют (рис. 2).

После установки клин-отклонителя – 6 (рис. 3) с конца горизонтального участка осуществляют буре-

ние наклонного ответвления (А), направленного в сторону нефтенасыщенной части пласта. Наклонное ответвление при необходимости обсаживают по уровню сложности ТАМL-3. После проведения работ по обсаживанию наклонного ответвления устанавливают клин-отклонитель ближе к вертикальному участку ствола скважины (к примеру, 400 м от первого ответвления) и по аналогии осуществляют бурение наклонного ответвления (В), направленного в сторону нефтенасыщенной части пласта. Наклонное ответвление при необходимости обсаживают по уровню сложности ТАМL-3. Повторяют работы в зависимости от необходимости количества наклонных ответвлений и длины горизонтального участка скважины (к примеру, 5 ответвлений) (рис. 4).



- **Рис. 2.** Скважина с горизонтальным окончанием, где 1 газонефтяной контакт; 2 водонефтяной контакт; 3 наклонно направленный участок скважины; 4 горизонтальный участок скважины; 5 нефтенасыщенная часть пласта
- *Fig. 2.* Horizontal well, where 1 gas-oil contact; 2 water-oil contact; 3 directional part of the well; 4 horizontal part of the well; 5 oil-saturated part of the reservoir



Рис. 3. Бурение бокового ответвления, где 1 – газонефтяной контакт; 2 – водонефтяной контакт; 3 – наклонно направленный участок скважины; 4 – горизонтальный участок скважины; 5 – нефтенасыщенная часть пласта; 6 – клин-отклонитель; A – первое наклонное ответвление

Fig. 3. Drilling of the side track, where 1 – gas-oil contact; 2 – water-oil contact; 3 – directional part of the well; 4 – horizontal part of the well; 5 – oil-saturated part of the reservoir; 6 – whipstock; A – first directional side track



- **Рис. 4.** Бурение боковых ответвлений, где 1 газонефтяной контакт; 2 водонефтяной контакт; 3 наклонно направленный участок скважины; 4 горизонтальный участок скважины; 5 нефтенасыщенная часть пласта; 6 клин-отклонитель; A, B, C, D, E наклонные ответвления
- *Fig. 4.* Drilling of a side tracks, where 1 gas-oil contact; 2 water-oil contact; 3 directional parts of the well; 4 horizontal part of the well; 5 oil-saturated part of the reservoir; 6 whipstock; A, B, C, D, E directional side tracks of the wells

После бурения первой наклонно направленной скважины с горизонтальным окончанием и ответвлениями A, B, C, D, E осуществляют бурение наклоннонаправленной скважины – 7 с горизонтальным вхождением – 8 в нефтенасыщенный интервал пласта. Горизонтальный участок скважины проектируют не менее чем на 10 м выше уровня ВНК. После бурения горизонтального участка ствол скважины обсаживают и цементируют. Далее после установки клинотклонителя с конца горизонтального участка осуществляют бурение наклонного ответвления (А), также направленного в сторону нефтенасыщенной части пласта. Наклонное ответвление при необходимости обсаживают по уровню сложности TAML-3. После проведения работ по обсаживанию наклонного ответвления устанавливают клин-отклонитель ближе к вертикальному участку ствола скважины (к примеру, 300 м от первого ответвления (А)) и по аналогии осуществляют бурение наклонного ответвления (В), направленного в сторону нефтенасыщенной части

пласта. Наклонное ответвление при необходимости обсаживают по уровню сложности TAML-3. Повторяют работы в зависимости от необходимости количества наклонных ответвлений и длины горизонтального участка скважины (к примеру, 5 ответвлений) (рис. 5). Далее в скважины спускается внутрискважинное оборудование, скважины осваиваются и выводятся на режим.

Конструктивная особенность таких скважин заключается в том, что от одного горизонтального ствола отходят многочисленные наклонные ответвления. Такие скважины позволяют существенно увеличить охват нефтенасыщенных участков пласта по сравнению с горизонтальными скважинами. Конструкция позволяет направить каждое из ответвлений в отдельные нефтяные участки, снижая риск пересечения уровней ГНК и ВНК в массивной залежи. Ответвления могут отходить в любом направлении от горизонтального ствола скважины, и их стоимость значительно ниже, чем затраты на бурение отдельных скважин.



Рис. 5. Бурение новой скважины с боковыми ответвлениями, где 1 – газонефтяной контакт; 2 – водонефтяной контакт; 3, 7 – наклонно-направленные участки скважин; 4, 8 – горизонтальные участки скважин; 5 – нефтенасыщенная часть пласта; А, В, С, D, E, A1, B1, C1, D1, E1 – наклонные ответвления скважин

Fig. 5. Drilling of a new well with side tracks, where 1 – gas-oil contact; 2 – water-oil contact; 3, 7 – directional parts of the wells; 4, 8 – horizontal parts of the wells; 5 – oil-saturated part of the reservoir; A, B, C, D, E, A1, B1, C1, D1, E1 – directional side tracks of the wells

Технология добычи газа

Авторами также предлагается к ознакомлению перспективная технология, реализуемая в конструкции газодобывающей скважины с горизонтальным окончанием. Задачей, для решения которой разработана технология, является сохранение газодобывающей скважины с горизонтальным окончанием в действующем фонде за счет оптимизации работы ее горизонтального участка.

Конструкция газодобывающей скважины с горизонтальным окончанием включает: кондуктор; эксплуатационную колонну, спущенную до кровли продуктивного пласта; установленный в горизонтальном необсаженном участке ствола скважины хвостовик с центраторами и заколонными пакерами (может быть оснащен фильтрами разного типа или перфорирован); хвостовик подвешивается к нижней части эксплуатационной колонны с помощью подвесного устройства; выше хвостовика в скважину на колонне насоснокомпрессорных труб спускается внутрискважинное оборудование для добычи газа (пример снизу вверх): воронка с косым срезом, посадочный ниппель для установки датчика давления или температуры, перфорированный патрубок, пакер механического действия, циркуляционный клапан, клапан-отсекатель с подземным управлением. Хвостовик, состоящий из последовательно соединенных между собой обсадных труб с предварительно перфорационными отверстиями (или фильтрами) посредством муфтовых соединений и оснащенный центраторами, заколонными пакерами (расположенными друг от друга на определенном расстоянии), последовательно собирается и спускается в необсаженный участок ствола скважины.

Хвостовик подвешивается к нижней части эксплуатационной колонны с помощью подвесного устройства.

Газожидкостной поток (рис. 6), двигаясь внутри хвостовика, при соприкосновении с внутренней поверхностью обсадных труб за счет канавок приобретает поступательно-вращательное движение. Полная энергия потока увеличивается за счет суммирования кинетической энергии поступательного движения и энергии вращения. Внутри хвостовика образуется так называемая вихревая нить, вдоль которой происходит увеличение кинетической энергии потока [17–20]. При этом общая скорость потока также увеличивается за счет вихревого эффекта.



Рис. 6. Движение газожидкостного потока (схематично) **Fig. 6.** Schematic movement of a gas-liquid flow

Заключение

Ежегодно в России растет доля трудноизвлекаемых запасов в общем объеме доказанных запасов в стране. По причине того, что нефть, добываемая из таких сложнопостроенных залежей, является, как

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Козлова Д. Западная Сибирь: бурить нельзя останавливаться // Нефтегазовая вертикаль. Национальный отраслевой журнал. – 2019. – № 12. – С. 27–33.
- Технологии добычи низконапорного сеноманского газа / А.В. Саранча, И.С. Саранча, Д.А. Митрофанов, С.М. Овезова // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1-1. URL: http://science-education.ru/ru/article/view?id=18496 (дата обращения: 02.05.2021).
- Kemp G. Oil fishing operation: tools and techniques. Houston; London; Paris; Tokyo: Gulf Publ. Company Book Division, 1986. – 126 p.
- Lea J.F., Nickens H.V., Wells M. Gas well deliquification: solution to gas well liquid loading problems. – Houston: Gulf Professional Publishing, 2003. – 245 p.
- Якупов Р.Р., Яркеева Н.Р. Оптимизация работы газовых скважин на Ямбургском нефтегазоконденсатном месторождении // Нефтегазовое дело. – 2018. – Т. 16. – № 3. – С. 41–49.
- Maximize production by continuously dropping soap sticks throughout the day and night // URL: https://jandjsolutionsllc. com/products/automatic-soap-stick-launcher (дата обращения 22.04.2021).

правило, высоковязкой, а сами скважины малодебитными, существует необходимость в разработке и внедрении новых технологий, связанных с добычей углеводорода.

Основными задачами предлагаемой технологии является повышение коэффициента нефтеизвлечения залежи массивного типа, слагаемой неоднородным терригенным коллектором, с наличием газонефтяного и водонефтяного контактов; снижение преждевременной обводненности и загазованности добываемой продукции. Технология позволит повысить эффективность добычи нефти за счет увеличения зоны охвата залежи в нефтенасыщенной части пласта.

Новизна заключается в системе расстановки добывающих скважин с горизонтальным окончанием с наклонными ответвлениями относительно уровней водонефтяного и газонефтяного контактов в залежи массивного типа, а также направленности и очередности бурения наклонных ответвлений от зон газонефтяного и водонефтяного контактов.

Помимо этого, авторами предлагается технология, реализуемая в конструкции газодобывающей скважины с горизонтальным окончанием, новизна которой заключается в разработке конструкции хвостовика, спускаемого в горизонтальный участок ствола скважины, позволяющий оптимизировать добычу газа, предотвратить преждевременный выход скважины из действующего фонда, увеличить срок ее работы.

Статья подготовлена в рамках реализации государственного задания в сфере науки на выполнение научных проектов коллективами лабораторий образовательных организаций высшего образования, подведомственных Министерству науки и высшего образования России по проекту: «Технологии добычи низконапорного газа сеноманского продуктивного комплекса» (№ FEWN-2020-0013, 2020–2022 гг.).

Исследование выполнено с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Центр перспективных исследований и инновационных разработок» Тюменского индустриального университета.

- Отечественные автоматизированные технологические комплексы для месторождений на различных стадиях разработки / П.П. Слугин, В.Е. Петропавлов, А.Р. Закиров, О.А. Николаев, И.В. Мельников, Д.А. Журавлев, Н.М. Бобриков, Р.Р. Гарифуллин // Газовая промышленность. – 2018. – № 12 (778). – С. 12–19.
- Стрижов И.Н., Ходанович И.Е. Добыча газа. М.; Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003. – 376 с.
- Учет палеорусловых отложений при формировании системы разработки газовой залежи Ново-Часельского нефтегазоконденсатного месторождения / В.В. Васильев, Ю.Г. Зенкова, Д.В. Пономарева, А.В. Пермяков, Р.Р. Шакиров // Нефтяное хозяйство. – 2020. – № 8. – С. 47–49. DOI: https://doi.org/10.24887/0028-2448-2020-8-47–49.
- Усовершенствование профиля скважины с горизонтальным боковым стволом / Е.Г. Гречин, В.Г. Кузнецов, Я.М. Курбанов, А.В. Щербаков // Нефтяное хозяйство. – 2021. – № 4. – С. 58–61. DOI: https://doi.org/10.24887/0028-2448-2021-4-58-61.
- Колесов В.А., Скляр К.С. Прогноз емкостных свойств пород по данным буровой механики в процессе роторного бурения скважин с горизонтальным окончанием // Нефтяное хозяйство. – 2021. – № 3. – С. 54–57. DOI: https://doi.org/10.24887/0028-2448-2021-3-54-57.

- Denney D. Successful short-radius re-entry well in deep-gas drilling in Saudi Arabia // Journal of Petroleum Technology. – 2011. – V. 11. – P. 84–87. DOI: https://doi.org/10.2118/1111-0084-JPT.
- Carpenter C. Managed-pressure-drilling technology delivers challenging HP/HT drilling campaign // Journal of Petroleum Technology. – 2016. – V. 4. – P. 77–79. DOI: https://doi.org/10.2118/0416-0077-JPT.
- Core acquisition and analysis for optimization of the Prudhoe bay miscible-gas project / P.L. McGuire, A.P. Spence, F.I. Stalkup, M.W. Cooley // SPE Reservoir Engineering. – 1995. – V. 2. – P. 94–100. DOI: https://doi.org/10.2118/27759-PA.
- Feder J. Fracture hits mitigated successfully in high-pressure stimulation offshore Black Sea // Journal of Petroleum Technology. – 2021. V. 73. – P. 51–52. DOI: https://doi.org/10.2118/0621-0051-JPT.
- Carpenter C. Steerable-drilling-liner technology in unstable shale // Journal of Petroleum Technology. – 2016. – V. 68. – P. 67–69. DOI: https://doi.org/10.2118/0616-0067-JPT.

- Extended-reach drilling to maximize recovery from a mature asset: a case study / N. Muecke, A. Wroth, S. Zharkeshov, R. Anton, I. McCourt, N. Armstrong // SPE Drilling & Completion. – 2018. – V. 33 – P. 385–401. DOI: https://doi.org/10.2118/194000-PA.
- Carpenter C. Development of a stranded tight gas field in the North Sea with hydraulic fracturing // Journal of Petroleum Technology. – 2015. – V. 67. – P. 102–105. DOI: https://doi.org/10.2118/0415-0102-JPT.
- Denney D. Planning short-radius sidetracks with geostatistics // Journal of Petroleum Technology. – 1998. – V. 50. – P. 84–85. DOI: https://doi.org/10.2118/0298-0084-JPT.
- Bybee K. Managing drilling risk in a mature North Sea field // Journal of Petroleum Technology. – 2010. – V. 62. – P. 84–85. DOI: tps://doi.org/10.2118/0910-0076-JPT.

Поступила: 06.08.2021 г.

Информация об авторах

Леонтьев Д.С., кандидат технических наук, доцент кафедры бурения нефтяных и газовых скважин, старший научный сотрудник Лаборатории технологий капитального ремонта скважин и интенсификации притока Тюменского индустриального университета.

Ваганов Ю.В., кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой бурения нефтяных и газовых скважин, ведущий научный сотрудник Лаборатории технологий капитального ремонта скважин и интенсификации притока Тюменского индустриального университета.

Шаляпин Д.В., младший научный сотрудник Лаборатории технологий капитального ремонта скважин и интенсификации притока Тюменского индустриального университета.

Шаляпина А.Д., ассистент кафедры бурения нефтяных и газовых скважин, младший научный сотрудник Лаборатории технологий капитального ремонта скважин и интенсификации притока Тюменского индустриального университета.

Жигалковская М.И., лаборант комплекса лабораторий по направлению нефтегазового дела Центра коллективного пользования «Центр перспективных исследований и инновационных разработок»; лаборант Лаборатории технологий капитального ремонта скважин и интенсификации притока Тюменского индустриального университета.

UDC 622.276.6

TECHNOLOGY FOR DEVELOPMENT OF A MASSIVE TYPE INHOMOGENEOUS DEPOSIT WITH GAS-OIL AND WATER-OIL CONTACTS

Dmitriy S. Leontev¹, leontevds@tyuiu.ru

Yuriy V. Vaganov¹, vaganovjv@tyuiu.ru

Denis V. Shalyapin¹, shaljapindv@tyuiu.ru

Adelya D. Shalyapina¹, shaljanaad@tyuiu.ru

Maria I. Zhigalkovskaya¹,

zhigalkovskajami@tyuiu.ru

¹ Industrial University of Tyumen,

70, Melnikayte street, Tyumen, 625048, Russia.

Relevance. Today due to the entry of most large oil fields into the late stage of development, as well as the increase in the share of hardto-recover reserves, non-standard methods of increasing oil recovery, characterized by increased controllability, energy efficiency and environmental friendliness, are becoming increasingly popular. For hard-to-recover reserves, which are characterized by complex geological features, expressed in the heterogeneity of reservoir layers, low filtration and capacitance properties, controlled physical impact on filtration processes will allow targeted impact on zones with residual reserves.

Objective: to develop an effective technology for increasing the coefficient of oil recovery of a massive type deposit composed of an inhomogeneous terrigenous reservoir with the presence of gas-oil and water-oil contacts.

Object: massive type deposit composed of an inhomogeneous terrigenous reservoir, with the presence of gas-oil and water-oil contacts.

Methods: analysis of modern scientific and technical literature and production reports on the results of the application of various technical and technological solutions to increase the flow rate of wells and reduce the water content of products; the proposal of a new technology for the development of heterogeneous deposits of massive type with gas-oil and water-oil contacts.

Results. The authors have proposed the technology for the development of an inhomogeneous deposit of a massive type with gas-oil and water-oil contacts. The technology will improve the efficiency of oil production by increasing the coverage area of the deposit in the oil-saturated part of the reservoir. The novelty lies in the system of placing producing wells with a horizontal end with inclined branches relative to the levels of water-oil and gas-oil contacts in massive deposits, as well as the direction and sequence of drilling of inclined branches from the zones of gas-oil contact and water-oil contact.

Key words:

Hard-to-recover reserves, horizontal well, Cenomanian tier, Pokurskaya formation, gas-oil contact, water-oil contact, heterogeneous deposit.

The research was carried out within the implementation of the State task in the field of science for fulfilment of scientific projects by the groups of scientific laboratories at the high education bodies under the jurisdiction of the Ministry of Science and Higher Education of the RF in the project: «Techniques of low-pressure gas production in the Cenomanian producing complex» (no. FEWN-2020-0013, 2020–2022).

The research was carried out using the equipment of the Central Research and Development Center «Center for Advanced Research and Innovative Developments» at Tyumen Industrial University.

REFERENCES

- Kozlova D. Western Siberia: can't stop drilling. *Neftegazovaya* vertikal. Natsionalny otraslevoy zhurnal, 2019, no. 12, pp. 27–33. In Rus.
- Sarancha A.V., Sarancha I.S., Mitrofanov D.A., Ovezova S.M. Techniques for production of low pressure Cenomanian gas. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*, 2015, no. 1-1. In Rus. Available at: http://science-education.ru/ru/article/view?id=18496 (accessed 2 May 2021).
- Kemp G. Oil fishing operation: tools and techniques. Houston, London, Paris, Tokyo, Gulf Publ. Company Book Division, 1986. 126 p.
- Lea J.F., Nickens H.V., Wells M. Gas well deliquification: solution to gas well liquid loading problems. Houston, Gulf Professional Publishing, 2003. 245 p.

- Jakupov R.R., Jarkeeva N.R. Optimization of gas wells operation at the Yamburg gas field. *Neftegazovoe delo*, 2018, vol. 16, no. 3, pp. 41–49. In Rus.
- Maximize production by continuously dropping soap sticks throughout the day and night. URL: https://jandjsolutionsllc.com/ products/automatic-soap-stick-launcher (accessed 22 April 2021).
- Slugin P.P., Petropavlov V.E., Zakirov A.R. Nikolaev O.A., Melnikov I.V., Zhuravlev D.A., Bobrikov N.M., Garifullin R.R. Automated process systems produced in Russia for fields under different development stages. *Gazovaya promyshlennost*, 2018, no. 12 (778), pp. 12–19. In Rus.
- Strizhov I.N. Dobycha gaza [Gas production]. Moscow, Izhevsk, Institute of computer researches Publ., 2003. 376 p.
- Vasilev V.V., Zenkova Yu.G., Ponomareva D.V., Permyakov A.V., Shakirov R.R. Accounting for paleo-channel sediments in the formation of a gas reservoir development system for the Novo-

Chaselskoye oil-gas-condensate field (Russian). *Oil and Gas Journal*, 2020, vol. 8, pp. 47–49. In Rus. DOI: https://doi.org/10.24887/0028-2448-2020-8-47-49.

- Grechin E.G., Kuznetsov V.G., Kurbanov Ya.M., Shcherbakov A.V. Method for improving profile of well with horizontal sidetrack (Russian). *Neftyanoe khozyaystvo – Oil Industry*, 2021, vol. 4, pp. 58–61. In Rus. DOI: https://doi.org/10.24887/0028-2448-2021-4-58-61.
- Kolesov V.A., Sklyar K.S. Forecasting rocks reservoir properties on a bit according to the drilling mechanics data while rotary drilling horizontal sidetrack wells (Russian). *Neftyanoe khozyaystvo – Oil Industry*, 2021, vol. 3, pp. 54–57. In Rus. DOI: https://doi.org/10.24887/0028-2448-2021-3-54-57.
- Denney D. Successful short-radius re-entry well in deep-gas drilling in Saudi Arabia. *Journal of Petroleum Technology*, 2011, vol. 11, pp. 84–87. DOI: https://doi.org/10.2118/1111-0084-JPT.
- Carpenter C. Managed-pressure-drilling technology delivers challenging HP/HT drilling campaign. *Journal of Petroleum Technology*, 2016, vol. 4, pp. 77–79. DOI: https://doi.org/10.2118/0416-0077-JPT.
- McGuire P.L., Spence A.P., Stalkup F.I., Cooley M.W. Core acquisition and analysis for optimization of the Prudhoe Bay miscible-gas project. *SPE Reservoir Engineering*, 1995, vol. 2, pp. 94–100. DOI: https://doi.org/10.2118/27759-PA.

- Feder J. Fracture hits mitigated successfully in high-pressure stimulation offshore Black Sea. *Journal of Petroleum Technology*, 2021, vol. 73, pp. 51–52. DOI: https://doi.org/10.2118/0621-0051-JPT.
- Carpenter C. Steerable-drilling-liner technology in unstable shale. Journal of Petroleum Technology, 2016, vol. 68, pp. 67–69. DOI: https://doi.org/10.2118/0616-0067-JPT.
- Muecke N., Wroth A., Zharkeshov S., Anton R., McCourt I., Armstrong N. Extended-reach drilling to maximize recovery from a mature asset: a case study. SPE Drilling & Completion, 2018, vol. 33, pp. 385–401. DOI: https://doi.org/10.2118/194000-PA.
- Carpenter C. Development of a stranded tight gas field in the North Sea with hydraulic fracturing. *Journal of Petroleum Tech*nology, 2015, vol. 67, pp. 102–105. DOI: https://doi.org/10.2118/0415-0102-JPT.
- Denney D. Planning short-radius sidetracks with geostatistics. Journal of Petroleum Technology, 1998, vol. 50, pp. 84–85. DOI: https://doi.org/10.2118/0298-0084-JPT.
- Bybee K. Managing drilling risk in a mature North Sea field. Journal of Petroleum Technology, 2010, vol. 62, pp. 84–85. DOI: tps://doi.org/10.2118/0910-0076-JPT.

Received: 6 August 2021.

Information about the authors

Dmitriy S. Leontev, Cand. Sc., associate professor, senior researcher, Industrial University of Tyumen.

Yuriy V. Vaganov, Cand. Sc., associate professor, head of the department of drilling oil and gas wells, leading researcher, Industrial University of Tyumen.

Denis V. Shalyapin, engineer of the 1st grade, KogalymNIPIneft, Branch of LUKOIL-Engineering LLC; junior researcher, Industrial University of Tyumen.

Adelya D. Shalyapina, assistant, junior researcher, Industrial University of Tyumen.

Maria I. Zhigalkovskaya, laboratory assistant, Central Research and Development Center «Center for Advanced Research and Innovative Developments»; laboratory assistant, Industrial University of Tyumen.

UDC 624.131 (476)

REGIONAL ANALYSIS OF THE OCCURRENCE AND SPREAD OF ENGINEERING-GEOLOGICAL PROCESSES IN THE REPUBLIC OF BELARUS

Alexandr N. Galkin¹,

galkin-alexandr@yandex.ru

Irina A. Krasovskaya¹,

iakrasovskaya@yandex.ru

Alexandr I. Pavlovsky², aipavlovsky@mail.ru

Oleg V. Shershnev²,

natstudy@yandex.ru

- Vitebsk State University named after P.M. Masherov, 33, Moskovskiy avenue, Vitebsk, 210038, Republic of Belarus.
- ² Francisk Skorina Gomel State University, 104, Sovetskaya street, Gomel, 246019, Republic of Belarus.

The relevance. The issues of studying the scale of distribution and causes of engineering-geological processes in the Republic of Belarus are positioned as one of the priority issues among the wide range of geoecological problems. Obtaining such information allows identifying and analyzing the factors of human economic activity that impact the geological environmental state, identifying the emergence and presence of threats in urbanized territories, leading to decrease in the safety and living conditions of humans.

The aim of the research is to analyze the causes and degrees of manifestation of the most noticeable in the regional plan engineeringgeological processes occurring in Belarus.

Objects: urbanized territories, mineral extraction and processing facilities, reclaimed land, phenomena and processes resulting from engineering and geological human activity.

Methods: research and classification engineering-geological processes developing on the territory of Belarus; expert and comparative methods were used to systematize and analyze the main factors of their occurrence and development on the territory of the country, based on the results of earlier published works and present time field investigations carried out by the authors.

Results. The author's expert evaluation and field methods of research have established that the most common factors of occurrence and activation of engineering-geological processes in the Republic of Belarus include: land reclamation, open-pit mining and subsurface mining, groundwater overexploitation, static and dynamic loads from structures and transport, engineering and human economic activities in urbanized areas, natural climatic conditions, and the genesis and composition of rocks. Engineering-geological processes and the phenomena such as groundwater table drawdown, gravitational processes, local earthquakes, suffusion, frost heaving, flooding, and waterlogging are identified and characterized. The spread of engineering-geological processes and phenomena has both a local character within settlements and covers vast areas of dozens of square kilometers. As a result of the study, the mapping of sources of technogenic impact on the geological environment and the manifestations of engineering-geological processes in the territory of Belarus were compiled.

Key words:

Engineering-geological processes, drainage reclamation, groundwater, quarries, mines, dumps, urbanized territories, deformations of buildings.

Introduction

The study of processes occurring in the upper horizons of the lithosphere in relation to human engineering activities can ensure the safe functioning of engineering structures and human economic activities. In this case the subjects of research are most often earthquake and flood which account for 50-90 % of the total number of geological disasters each year, and, to a lesser extent, landslides [1-3]. Most often such geological phenomena are associated with tectonics, the nature of the relief, the impact of water, climatic conditions, and are characterized by a certain geography of occurrence. For example, flooding results from grade lowering and it is a serious problem in coastal cities. Flood incidence also increases in interior basins where stream gradients are affected by subsidence. Earthquake occurrence predominates in three major belts: island chains and land masses forming the Pacific Ocean; the mid-Atlantic ridge; and an east-west zone extending from China through northern India, Turkey, Greece, Italy, and western North Africa to Portugal [4]. The research on such processes mainly focuses on the establishment of disaster prediction models [1–3].

At the same time, various types of human economic activity (industrial, civil, road and hydraulic engineering, land reclamation, development of mineral deposits, etc.) often cause not only the activation of natural, but also the development of engineering-geological processes that create certain dangers and cause losses to human life and property, as well as damage to the environment [1, 5]. The latter are essentially the analogs of natural geological processes; however, they are distinguished by a faster rate of development, a smaller area of distribution, and in some cases by a greater intensity and, of course, a lesser degree of knowledge.

The manifestation of these processes is due to a number of technogenic factors, such as the transformation of the conditions of surface runoff, the earth's surface, changes in the hydraulic gradient, temperature regime, pressure from the weight of structures, shaking, etc. Every engineering-geological process has a major or determinant factor. It should be bear in mind that the same technogenic impact under different engineering-geological conditions of the object can cause different engineeringgeological phenomena. Among the engineering-geological processes in the territory of Belarus, the most noticeable manifestation and development have the processes: a) due to land reclamation; b) arising during the creation of quarries and construction excavations; c) arising during subsurface (mines, wells) development of useful fossils; d) arising during the construction of earth structures; e) arising in urbanized areas (Fig. 1).



- Fig. 1. Schematic map of the sources of technogenic impact on the geological environment and distribution of engineering-geological processes on the territory of Belarus: 1–8 mining operations:1 subsurface mining of potassium salt; 2–7 open-pit mining: 2 granite; 3 dolomite; 4 sand; 5 clay; 6 sand loam; 7 chalk; 8 oil field development territories; 9 areas of intensive land reclamation; 10 large industrial dumps; 11 groundwater intakes in large cities; 12 drainage from quarries; 13 surface subsidence; 14 gravitational processes; 15 increase/decrease groundwater level due to land reclamation; 16 flooding within water reservoirs; 17 deflation (on reclaimed land, in mine workings, industrial dumps); 18 suffusion (in areas of mine workings, industrial dumps, urbanized areas); 19 decomposition of organic matter (on reclaimed land)
- Рис. 1. Схематическая карта источников техногенного воздействия на геологическую среду и распространения инженерно-геологических процессов на территории Беларуси: 1–8 горнодобывающая деятельность: 1 разработка калийных солей подземным (шахтным) способом; 2–7 разработка полезных ископаемых открытым способом: 2 граниты; 3 доломиты; 4 пески; 5 глины; 6 супеси; 7 мел; 8 территории разработки нефтяных месторождений; 9 районы интенсивной мелиорации земель; 10 крупные промышленные шламоотвалы; 11 водозаборы подземных вод в больших городах; 12 водоотлив из карьеров; 13 оседание поверхности земли; 14 гравитационные процессы; 15 повышение/снижение уровня подземных вод в результате мелиорации земель; 16 подтопление в пределах водохранилиц; 17 дефляция (на мелиорированных землях, в горных выработках, промышленных отвалах); 18 суффозия (на участках горных выработок, промышленных отвалах, урбанизированных территориях); 19 разложение органического вещества (на мелиорированных землях)

Processes due to land reclamation

Land reclamation is one of the significant factors affecting the engineering-geological situation of the territory and, as experts admit today, is not always positive. In the conditions of Belarus, reclamation transformations cover more than a century and are mainly associated with the drainage of swamps and wetlands. At present, 34,2 thousand km² have been drained, which is about 16,5 % of the country's territory [6]. However, together with the lands adjacent to the hydrotechnical facilities, the reclamation impact extends to about 1/3 of the country's area.

Drainage reclamation is a powerful means of impact, mainly on groundwater and overburden. It changes the balance of groundwater, the recharge of which can increase or decrease depending on the hydraulic connection of aquifers. In addition, within the reclaimed lands, mainly created with peat soils, deflation processes are observed [7].

To a greater extent, the environmental problems associated with land reclamation were manifested in Belarusian Polesie (Fig. 2). As a result of drainage reclamation, both the micro-component and macro-component composition of groundwater are changing. M.F. Kozlov et al. [8] conducted research on one of the drained bog massifs of the Belarusian Polesie and discovered that the total mineralization of groundwater increased by 1,5-2,5 times in the postreclamation period, owing primarily to bicarbonate, calcium, magnesium, and, at later stages of drying, sulfate. This is caused, firstly, by the increase in the inflow of pressurized bicarbonate calcium water. Secondly, the decrease in the absorption capacity of peat soils and Ca²⁺ and Mg²⁺ removal. Third, oxidation of peat organic matter and iron sulfide minerals, which are present in small quantities in peat. Particular close attention should be paid to the presence of high iron concentrations in groundwater. It leads to a decrease in the efficiency of drainage systems due to their clogging. There is ironification of near-surface strata of drained peatlands due to capillary pulling of groundwater, etc.



Fig. 2. Sites and facilities of engineering-geological processes in the south-east of Belarus. Sites of manifestation of the processes caused by: 1 – land reclamation; 2 – oil field development; 3 – quarrying of non-metallic raw materials; 4 – mining of potassium salts; 5 – water intakes; 6 – waste dumps; 7 – urbanized territories; 8 – lakes and reservoirs; 9 – rivers; 10 – roads: a) railways, b) highways; 11 – state border

Рис. 2. Участки и объекты проявления инженерно-геологических процессов на территории юго-востока Беларуси. Участки проявления процессов, обусловленных: 1 – мелиорацией земель; 2 – разработкой нефтяных месторождений; 3 – карьерной добычей нерудного сырья; 4 – шахтной добычей калийных солей; 5 – водозаборами; 6 – отвалами; 7 – урбанизированными территориями; 8 – озера и водохранилища; 9 – реки; 10 – дороги: а) железные, b) автомобильные; 11 – государственная граница

According to the study [9], fluctuations in the concentration of iron (II, III) in groundwater are primarily determined by the level regime in the bog massifs of various genetic types of the Belarusian Polesie. The highest groundwater levels corresponded to iron concentrations of $0,1-0,5 \text{ mg/dm}^3$. Iron concentrations increased to $8-10 \text{ mg/dm}^3$ and higher during low-water periods. As a result of the deterioration of the connection with the atmosphere, the

oxygen concentration in the upper zone of groundwater decreases from 3,0–5,0 to 0,5–1,0 mg/dm³. This contributed to the formation of a more restorative environment, favorable for the accumulation of iron (II) in the waters. Bog drainage causes a decrease in groundwater levels. When levels drop to 1,0–1,5 m, this leads to a significant increase in iron concentration of 10–18 mg/dm³ and more. Oxygen concentrations in water reach a minimum and are 0,5–0,8 mg/dm³. The greatest increase in iron concentrations is characteristic for lowland floodplain peatlands, which accumulate large reserves of total iron in various forms.

The abundance of organic matter in them has a great influence on iron migration in bog waters. The organmineral form of migration is of the greatest importance for iron (III). In the waters of undrained bogs, the share of these forms averaged 72 %, and in the surface waters of bogs – 54 %. Such waters are capable of maintaining significant supersaturation with respect to $Fe(OH)_3$ for a long time. After draining, a sharp decrease in the concentration of organic substances in groundwater was observed, accompanied by a decrease in the proportion of organically bound iron (III) to 39 % and an increase in the content of the form $Fe(OH)_3$. The degree of supersaturation of groundwater in terms of iron hydroxide has aged 60–300 times, which created favorable conditions for its precipitation at the oxygen barrier when these waters enter the drainage pipes [9].

Processes arising from the creation of quarries and construction excavations

During open-pit mining and transport construction, a large number of excavations appear, which causes significant changes in the relief, surface and underground runoff, the stress state of soil massifs, conditions of heat and mass transfer in the upper layers of the soil, etc.

A striking example of the activation of landslide processes is the Gralevo dolomite quarry. It is located on the left bank of the Western Dvina in the Vitebsk district and occupies an area of $0,39 \text{ km}^2$. The thickness of overburden reaches 20 m or more. They are mainly represented by moraine sandy loamy, loamy soils, and alluvial sands. The confinement to overburden soils of the underground aquifer, the weatheredness of moraine deposits, and a significant steepness of slopes (up to 50°) caused widespread development of landslides (Fig. 3). In dolomite rocks on the slopes there are lateral fissures, the density and strength of the rocky mass decrease, which leads to the formation of scree and rockfall. Drilling and blasting operations, which are often carried out in the quarry, also contribute to their development [10].



Fig. 3. Southern wall of the Gralevo open pit for dolomite mining with numerous rockfall-landslide areas (May 2010). Photo by A.N. Galkin

Рис. 3. Южный борт карьера «Гралево» по добыче доломитов с многочисленными обвально-оползневыми участками (май 2010 г.). Фото А.Н. Галкина

In Belarus, gravity processes are widespread in almost all mining excavations, but they differ in type, shape, and volume of displaced masses of rocks (Fig. 4) [10].

Concentrated water withdrawal is part of the technological process often used in open-pit mining. Drainage from quarries leads to the formation of depression funnels, the area of which can reach dozens of square kilometers. As a result, groundwater levels drop and small rivers and reservoirs dry up. For example, in the Mikashevichi open-pit, the permanent drainage often exceeded 60 thousand m³/day, and the maximum value reached 430 thousand m³/day and more. This led to a lowering of the groundwater table by 3,5–11,0 m, and the zone of influence extended to a distance of up to 3 km. The natural chemical composition of groundwater has changed, and two small rivers in the zone of influence of the quarry have dried up [11].

Zone of influence of concentrated water withdrawal in the amount of 370 thousand m^3/day from the quarry Gralevo spread over a distance of 10–12 km. Within its boundaries, there was a decrease in groundwater levels, which led to a change in the low-water runoff of the river Vitba and the failure of water wells near located rural settlements [10].



- Fig. 4. Gravitational processes in the sides of the quarries: a) talus in the Leskovichi quarry for sand extraction (Shumilinsky district, 2008); b) talus in the Mikashevichi quarry for the extraction of granite (Luninetsky district, 2010); c) landslide in the open pit «Khmelevskie ponds» for sand extraction (Minsk district, 2015) [10]
- Рис. 4. Гравитационные процессы в бортах карьеров: а) осыпи в карьере по добыче строительного песка «Лесковичи» (Шумилинский район, 2008); b) осыпи в карьере по добыче гранита «Микашевичи» (Лунинецкий район, 2010); c) оползень в песчаном карьере «Хмелевские пруды» (Минский район, 2015) [10]

Processes caused by subsurface mining and water withdrawal

Regional changes in engineering-geological conditions can also be observed during subsurface mining or during the withdrawal of water for water supply to large settlements [12–15]. There are a number of artificial and natural causes for ground subsidence. Short- and longterm conversion of underground burning coals to clinker results in a significant volume loss that can lead to subsidence. In other mining areas, trimming of mine pillars can cause their failure, inducing subsidence of overlying geologic materials. Withdrawal of petroleum in many sedimentary basin units results in surface subsidence when proper reservoir pressure management (e.g., secondary water-flood or tertiary fluid pressure support) is not applied [16]. Thus, during the development of minerals by the subsurface method, large cavities are formed, which often leads to deformations on the earth's surface. These are the so-called deflection troughs or sinkholes. They began to form on the territory of the republic relatively recently and began to appear in the areas of subsurface development of potash salts of the Starobinsky deposit (Soligorsk region), oil deposits (Rechitsa region) and large water intakes (Fig. 2).

The most noticeable sinkholes are found near Soligorsk. The total area covered by the deflection troughs is more than 200 km2 with a depth of 4,0–4,5 m. The steepness of the slopes is close to 3–4°. The combination of factors including surface subsidence, shallow groundwater table (from 0 to 2,0–4,0 m), well-developed engineering and reclamation system, numerous shallow reservoirs (lakes, ponds) with water surface area up to 0,01–0,03 km², large Soligorsk reservoir, led to the processes of waterlogging and swamping [17–19] (Fig. 5).



- Fig. 5. Scheme of subsidence of the earth's surface in the territory of the Soligorsk industrial region: 1 – isolines of actual subsidence of the earth's surface; 2 – tectonic faults. Adapted from [20]
- Рис. 5. Фрагмент картосхемы оседания земной поверхности на территории Солигорского промышленного района: 1 – изолинии фактического оседания земной поверхности; 2 – тектонические разломы. Адаптировано по [20]

Surface subsidence from fluid extraction is a common phenomenon and probably occurs to some degree in any location where large quantities of water, oil, or gas are removed. Short-term detection is difficult because surface movements are usually small, are distributed over large areas in the shape of a dish, and increase gradually over a span of many years [4].

The amplitude of subsidence over the exploited oil fields of Belarus is no more than 1 m. It was found that within such areas in the Pripyat Trough, ground surface subsidence can reach up to 10 mm/year [19].

Ground subsidence due to groundwater withdrawal occurs when groundwater is withdrawn from an aquifer faster than it can be replenished [16]. Lowering the groundwater level reduces the buoyant effect of water, thereby increasing the effective weight of the soil within the depth through which the groundwater has been lowered [4].

Water intakes of large cities in Belarus have a serious and growing impact on the subsidence of the earth's surface [21]. This influence is most noticeable in the Minsk region, which is characterized by the maximum water withdrawal in the republic. So, for example, at the Novinki water intake, the long-term operation of groundwater led to the subsidence of the earth's surface by more than 0,5-0,6 m. As in the case of water withdrawal in mining by quarrying, the exploitation of groundwater at water intakes leads to a change in the hydrogeological situation. Basically, the chemical composition and groundwater recharge change, and depression funnels are formed. At water intakes in river valleys with a hydraulic connection between groundwater and surface water, 50 to 90 % of the water received at the water intake is provided by the river. The impact of the water intake leads to reduction in the river flow and a decrease in the groundwater table towards the watershed at a distance of 1-2 km. In shallow aquifers, a groundwater regime is formed due to overflow, and the zone of influence extends to 2-6 km [21, 22].

For deep-lying layers, a transient filtration regime is characteristic during operation. Here, the resulting production rates are provided by the resources of the reservoir itself. In this case, the radius of depression of the piezometric surface of the horizon reaches 10–15 km. As the difference in the heads of the exploited and adjacent horizons increases, overflows form from the latter, which serve as additional sources of power for the exploitable reserves, which often leads to a change in the chemical composition of groundwater [21, 22].

Processes arising during the construction of earthworks

The creation of embankments, dams, dumps leads to a violation of the existing natural balance due to high pressures transmitted over a large area. This entails inhomogeneous deformations with the formation of alternating depressions and shafts, landslides, rockfalls, changes in the relief of the territory, the manifestation of seismic phenomena, violation of the surface runoff regime, waterlogging, etc.

So, for example, in the overburden dumps of the Gralevo dolomite quarry, there are often landslides. Most of them are relatively small in size. But sometimes landslides cover large areas. So, in November 1998, due to frequent rains in the direction of the bridge over the river Western Dvina slipped a vast mass of land, which had a diameter of about 70 m with a displacement height of up to 10 m. This landslide displaced about 20 thousand m³ of soil. As a result, private buildings located near the dumps were destroyed [7].

Long-term operation of the Gomel Chemical Plant led to the creation of phosphogypsum dumps on an area of 0.9 km^2 , a height of 60–70 m and a weight of over 21,3 million tons [6]. Dumps are comb-shaped and plateau-shaped. The dumps significantly change the surface topography, transforming its natural state and morphometry (Fig. 2; Fig. 6, *a*). The storage of wastes from the production of phosphorus fertilizers caused a significant rise in the level of groundwater and, as a consequence, swamping of areas adjacent to the chemical plant at a distance of up to 1 km.

In the Soligorsk mining region, the storage in dumps of large volumes of potash production wastes (over 1 billion tons of halite waste on an area of more than 5 km²) over underworked mine fields due to a violation of the isostatic equilibrium in the earth's interior has caused man-made earthquakes (Fig. 2; Fig. 6, *b*). Such earthquakes in the Soligorsk region are recorded up to a hundred per year, and some of them reach 4–5 points [23, 24].

Processes occurring in urbanized areas

The existence of any city in itself presupposes changes in the geotechnical environment of the territory where it is located. Currently, on the territory of Belarusian cities, a whole complex of engineering-geological processes is sufficiently developed, among which there are the processes caused by static and dynamic loads from structures (industrial and residential) and transport, suffusion, frost heaving, flooding, etc.

The development of multistorey buildings in the cities of Belarus leads to a significant increase in static loads on the rocks, the value of which can be anywhere from 0,5 to 2,0 MPa. Soil compaction and a decrease in its moisture content occur in the zone of active compression at a depth of up to 30 m or more, which can lead to the settlement of engineering structures.

а





Fig. 6. Transforming of the natural surface topography: a) phosphogypsum dumps of the Gomel chemical plant (October 2020); b) salt dumps of the JSC «Belaruskali» (October 2020). Photo by O.V. Shershnev

Рис. 6. Трансформация естественного рельефа: а) отвалы фосфогипса Гомельского химического завода (октябрь 2020); b) солеотвалы ОАО «Беларуськалий» (октябрь 2020). Фото О.В. Шеринёва

Soils of different composition, genesis, and state react differently to stress. For example, the deformations of the foundations of structures, represented by lacustrineglacial clay deposits, are distinguished by significant unevenness. This is evidenced by the experience of construction in Vitebsk, Polotsk, etc. Thus, in the residential building under construction on Moskovsky Avenue in Vitebsk, after two years of conservation, deformation of the foundation wall blocks occurred, expressed in the formation of cracks with an opening width of up to 50 mm. This occurred as a result of the destructuring of the foundation soil caused by uneven watering and the various physical and mechanical properties of the sandy loam underlying the foundation. Dynamic loads affect soils in different ways, depending on the peculiarities of their composition and structure, as a result of which loose underconsolidated soils are compacted (with a density of less than 0,6) and the structure of thixotropic soils is disturbed. Dynamic loads on the ground are transmitted as a result of vibration during vehicle movement, the action of construction and other shock-vibration mechanisms. Deformations of foundations and wall structures in Vitebsk quite often occur in buildings and structures located along streets with heavy traffic. These deformations are especially intense in buildings built on the soils of the cultural layer, which are characterized by low strength and increased compressibility (Fig. 7).



Fig. 7. Building of the first power station in Vitebsk (1897–1898) along Frunze Avenue in the historic part of the city and cracks in wall structures resulting from vibrations during the movement of urban transport (2016) [25]

Рис. 7. Здание первой в Витебске электростанции (1897–1898 гг.) на проспекте Фрунзе в исторической части города и трещины в стеновых конструкциях, образовавшиеся в результате вибрации при движении городского транспорта (2016 г.) [25]

One can observe suffusion on the territory of many settlements of Belarus due to technogenically disturbed hydrodynamic regime. Quite often, it manifests itself along the routes of underground utilities in soils that are not uniform in grain size distribution, causing the formation of craters on the surface of the earth (Fig. 8). This process can also begin in filled up large ravines as they continue to serve as natural drains.

Construction on relatively steep slopes (creation of pits, long-term zero cycle work) can contribute to the activation of suffusion both in terms of creating conditions for unloading and in terms of the formation of large pressure gradients of the filtration flow due to the unhindered entry of atmospheric precipitation into the strata.

Frost heaving is quite widespread. Especially in the northern regions of the country. It occurs due to volumetric deformations of clay, silty and fine sandy soils during their freezing (the volume of soil increases by 10-20 %) and manifests itself mainly in the form of deformations of the asphalt pavement, as well as buildings and structures. This process is especially dangerous for the foundations of structures and engineering communications, laid above the base of the active layer (Fig. 9).

Their composition has a great influence on the depth of freezing of soils. So, inclusions of organic matter with low thermal conductivity significantly reduce the depth of freezing. Lowering the level of groundwater, removing snow cover and other processes increase the depth of freezing. However, the shallow occurrence of groundwater contributes to the inflow of moisture to the freezing front, which activates the heaving process. The process of raising the level of groundwater is typical for many cities in Belarus, up to the flooding of residential buildings and industrial facilities. The reasons for flooding are varied. This is also a change in the existing surface topography, which determines the surface runoff (construction of embankments, dams); destruction of the existing hydrographic network (elimination of small rivers and streams, canalization of rivers, backfilling of ravines, etc.); silting and littering of natural drains; reservoir construction; shielding the earth's surface by buildings and asphalt; loitering with buried structures and structures of the underground stream; leaks from watercarrying communications and dumping of technogenic soils with poorly water-permeable and impermeable layers, etc.

Flooding processes are widespread in many settlements in Belarus. For example, the area of flooding in Gomel reaches 30 km², including up to 50 % of residential buildings. Settlements in the country can be grouped into several categories depending on their proneness to flooding. The first category includes such settlements as Minsk, Bobruisk, Svetlogorsk and Stolbtsy. They are in the zone of local flooding and require preventive measures. The second category includes settlements that are in the zone of probable flooding area and require certain technical measures for protection. Such settlements include the cities of Gomel, Brest, David-Gorodok, Turov, Mogilev, Bykhov and Zhlobin. The cities of Vitebsk, Polotsk, Verkhnedvinsk, Soligorsk and Pinsk are in the zone of active flooding and are referred to the third group of cities requiring engineering protection [7].





Fig. 8. Deformations of sidewalks and highways caused by suffosion: a) in Vitebsk near the Summer Amphitheater (2012); b) in Minsk along Mogilevskaya street (2014); c) in Gomel near the Ice Palace (2013); d) in Zhlobin near gymnasium no. 1 (2014) [10]

Рис. 8. Деформации тротуаров и автомобильных дорог, вызванные суффозией: а) в Витебске вблизи Летнего амфитеатра (2012); b) в Минске по улице Могилевской (2014); c) вблизи Ледового дворца в Гомеле (2013); d) в Жлобине вблизи гимназии № 1 (2014) [10]



Fig. 9. Cracking in a residential building on the Lenin street, 101 in Liozno (Vitebsk region) as a result of heaving of moraine soils (2005) [10]

Рис. 9. Трещинообразование на здании жилого дома по ул. Ленина, 101 в г. Лиозно Витебской области в результате пучения моренных грунтов (2005 г.) [10]

As a result of technogenic waterlogging of soils, their strength and deformation characteristics change. For example, the decrease in the angle of internal friction may reach 10-15 %. There is a 2,0-2,5 times decrease in the cohesion intercept of the soil, and the modulus of deformation may decrease by 2,0-3,5 times. Several examples can be cited as accidents that happened for this reason. Thus, in the building of the joint-stock company Technopark Mogilev in Mogilev, due to uneven deformations of the base because of flooding, inclined and vertical cracks formed along the load-bearing walls, the basement of the building was filled with groundwater. Reinforcement of the outer walls with strained steel straps was carried out, systematic control of the behavior of underground and aboveground structures of the building was established [10]. In the town of Bykhov in the Mogilev region, in the building of the Belagroprombank branch, due to soaking of the base soils and uneven settlements, vertical cracks exceeding 20 mm appeared on the inner bearing wall. The repair work did not stop new cracks from appearing [7]. The flooding of urban areas and the often accompanying chemical and bacterial contamination, increasing temperature and aggressiveness of groundwater can lead to the destruction of the body of the foundations, corrosion of reinforcement and concrete, and leaching of lime mortar from rubble foundations. Such processes are observed almost everywhere in the buildings of the old layout.

Conclusions

Engineering-geological processes, which are widespread on the territory of Belarus, are the most active and most powerful factor in the development (or transformation) of engineering-geological conditions at the present stage. They are also a factor that changes the engineering-geological conditions of both large areas and local areas.

Various types of engineering-geological processes caused by human economic activity have been established in the Republic of Belarus: 1) groundwater table depletion as a result of land reclamation and drainage during open-pit mining; 2) landslides, rockfall and talus actively occurring during the creation of quarries and excavations; 3) subsidence of the earth's surface during subsurface mining or during the direct groundwater abstraction for water supply; 4) landslides, seismic phenomena,

REFERENCES

- Zou L., Gui W. Simulation and prediction of geologic hazards and the impacts on homestay buildings in scenery spots through BIM. *PLOS ONE journal*, 2020, vol. 15 (9). pp. 1–14.
- Liu Y., Wu L. High performance geological disaster recognition using deep learning. *Procedia Computer Science journal*, 2018, vol. 139, pp. 529–536.
- Orozco M.M., Caballero J.M., Nader A. Smart disaster prediction application using flood risk analytics. *EDP Sciences journal*, 2018, vol. 189, pp. 10006–10016.
- 4. Hunt R.E. *Geologic hazards: a field guide for geotechnical engineers.* Boca Raton, FL, USA, CRC Press, 2005. 324 p.
- Giles D.P. Introduction to geological hazards in the UK: their occurrence, monitoring and mitigation. *Engineering Geology Special Publications*, 2020, vol. 29 (1), pp. 1–41.
- Sostoyanie prirodnoy sredy Belarusi: ezhegodnoe informatsionnoanaliticheskoe izdanie [State of the Environment of Belarus: annual information and analytical publication]. Minsk, Belarusian Research Center «Ecology», 2020. 101 p.
- Galkin A.N., Matveev A.V., Zhoglo V.G. Inzhenernaya geologiya Belarusi. Osnovnye osobennosti prostranstvennoy izmenchivosti inzhenerno-geologicheskih uslovij i istoriya ikh formirovaniya [Engineering geology of Belarus. The main features of the spatial variability of engineering-geological conditions and the history of their formation]. Vitebsk, Masherov Vitebsk State University Publ. house, 2006. 208 p.
- Kozlov M.F., Krivetskaya T.D., Grechko A.M., Pashkevich V.I. Vliyanie osushitelnykh melioratsiy na formirovanie rezhima podzemnykh vod [Impact of drainage reclamation on formation of groundwater regime]. Problemy izucheniya zemnoy kory Belorussii i sopredelnykh territoriy [Problems of studying the Earth's crust of Belarus and adjacent territories]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1986. pp. 119–130.
- Kudelskiy A.V., Grechko A.M., Krivetskaya T.D., Pashkevich V.I. Gidrogeologicheskaya ekspertiza shirokomasshtabnykh osushitelnykh melioratsiy Belorusskogo Polesya [Hydrogeological assessment of large-scale drainage land reclamation in the Belarusian Polessye]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1993. 112 p.
- Galkin A.N., Matveev A.V., Pavlovsky A.I., Sanko A.F. Inzhenernaya geologiya Belarusi. Slide 2. Inzhenernaya geodinamika Belarusi [Engineering geology of Belarus. P. 2. Engineering geodynamics of Belarus]. Vitebsk, Masherov Vitebsk State University Publ. house, 2017. 456 p.
- Yasoveev M.G., Gledko Yu.A. Geoecological problems of the development of the Mikashevichsky building stone deposit. *Bulletin* of the Belarusian State University, 2001, Series 2, no. 2, pp. 71–76. In Rus.
- 12. Guzy A., Malinowska A.A. State of the art and recent advancements in the modelling of land subsidence induced by groundwater withdrawal. *Water*, 2020, vol. 12 (7), Article 2051.

violation of the surface runoff regime, waterlogging due to creation of man-made landforms (dumps, waste heaps, dams), which are comparable in size with natural ones; 5) suffusion, frost heaving, flooding, waterlogging within settlements and industrial facilities due to technogenically disturbed hydrodynamic regime, the natural features surface topography and rocks, static and dynamic loads from structures (industrial and residential) and transport.

The regional spread of these processes has a negative impact on the components of the geological environment and complicates the living conditions of human.

The results of the study can be used to make design decisions in capital construction and reconstruction of buildings and structures, in creating a monitoring system of the geological environment of cities, mineral extraction and processing facilities, as well as the formation of a set of measures aimed at optimizing spatial planning.

- 13. Vervoort A. Surface movement above an underground coal longwall mine after closure. *Natural Hazards Earth Systems Sciences*, 2016, vol. 16 (9), pp. 2107–2121.
- Chaussard E., Wdowinski S., Cabral-Cano E., Amelung F. Land subsidence in central Mexico detected by ALOS InSAR timeseries. *Remote Sensing Environment*, 2014, vol. 140, pp. 94–106.
- Sopata P., Stoch T., Wójcik A., Mrocheń D. Land surface subsidence due to mining-induced tremors in the Upper Silesian coal basin (Poland). Remote Sensing, 2020, vol. 12 (23), Article 3923.
- 16. Glass SlideE. Interpreting aerial photographs to identify natural hazards. Amsterdam, Netherlands, Elsevier, 2013. 168 p.
- Smychnik A.D., Bogatov B.A., Shemet S.F. *Geoekologiya kali-ynogo proizvodstva* [Geoecology of potash production]. Minsk, Yunipak Publ., 2005. 201 p.
- Prirodnaya sreda Belarusi [The environment of Belarus]. Ed. by V.F. Loginov. Minsk, NOOOO «BIP-S», 2002. 422 p.
- Matveev A.V. *Istoriya formirovaniya relefa Belorussii* [History of the formation of the topography of Belarus]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1990. 144 p.
- 20. Mikhaylov V.I., Kabatskiy A.V. Deformatsionny monitoring zdaniy i sooruzheniy, nakhodyashchikhsya v zone tekhnogennykh prosadok zemnoy poverkhnosti Soligorskogo promrayona [Deformation monitoring of buildings and structures located in the zone of technogenic subsidence of the Soligorsk industrial area]. *Problemy i perspektivy razvitiya avtomobilnykh dorog SNG* [Problems and prospects for the development of the CIS roads]. Minsk, BNTU Publ., 2019. pp. 150–157.
- 21. Kurilo K.A. The assessment of groundwater natural resources and water intake effect on the geological environment in Belarus. *Environmental Geoscience*, 2005, no. 5, pp. 406–410. In Rus.
- 22. Berezko O.A. The influence of water intake on the underground hydrosphere of Minsk. *Natural Resources*, 2008, no. 2, pp. 17–21. In Rus.
- Aronov A.G. Features of the space-time distribution of the seismic activity within the Soligorsk mining region. *Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2019, vol. 63, no. 2, pp. 216–222. In Rus.
- Gubin V.N. Seysmoaktivnye geodinamicheskie zony Starobinskogo mestorozhdeniya kaliynykh soley po dannym distantsionnogo zondirovaniya Zemli [Seismoactive geodynamic zones of Starobinskiy potassium salt deposit according to remote sensing data]. *Geomatics*, 2015, no. 3, pp. 56–62.
- Torbenko A.B., Galkin A.N., Krasovskaya I.A. Features of the manifestation of modern exogenous geological and engineeringgeological processes in the territory of Vitebsk. *Engineering Geology*, 2018, vol. 13, no. 6, pp. 66–75. In Rus.

Received: 1 April 2022.

Information about the authors

Alexandr N. Galkin, Dr. Sc., professor, Vitebsk State University named after P.M. Masherov.
 Irina A. Krasovskaya, Cand Sc., associate professor, Vitebsk State University named after P.M. Masherov.
 Alexandr I. Pavlovsky, Cand Sc., head of Geology and Geography Department, Francisk Skorina Gomel State University.
 Oleg V. Shershnev, Cand Sc., associate professor, Francisk Skorina Gomel State University.

УДК 624.131 (476)

РЕГИОНАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ

Галкин Александр Николаевич¹,

galkin-alexandr@yandex.ru

Красовская Ирина Анатольевна¹,

iakrasovskaya@yandex.ru

Павловский Александр Илларионович²,

aipavlovsky@mail.ru

Шершнёв Олег Владимирович²,

natstudy@yandex.ru

- ¹ Витебский государственный университет им. П.М. Машерова, Республика Беларусь, 210038, г. Витебск, Московский пр., 33.
- ² Гомельский государственный университет им. Франциска Скорины, Республика Беларусь, 246019, г. Гомель, ул. Советская, 104.

Актуальность. Вопросы изучения масштабов распространения и причин возникновения инженерно-геологических процессов в Республике Беларусь позиционируются в качестве одних из приоритетных среди широкого спектра геоэкологических проблем. Получение такой информации позволяет выделить и проанализировать факторы влияния хозяйственной деятельности человека на состояние геологической среды, выявить возникновение и наличие угроз на урбанизированных территориях, приводящих к снижению безопасности и качества жизни населения.

Цель: анализ причин возникновения и степени проявления наиболее заметных в региональном плане инженерногеологических процессов, происходящих на территории Беларуси.

Объекты: урбанизированные территории, объекты добычи и переработки полезных ископаемых, рекультивированные земли, явления и процессы, возникающие в результате инженерно-геологической деятельности человека.

Методы: исследование и классификация инженерно-геологических процессов, развивающихся на территории Беларуси; для систематизации и анализа основных факторов их возникновения и развития на территории страны были использованы экспертный и сравнительный методы, основанные на результатах ранее опубликованных работ и современных полевых исследований, проведенных авторами.

Результаты. Авторская экспертная оценка и полевые методы исследования позволили установить, что к наиболее распространенным факторам возникновения и активизации инженерно-геологических процессов в Республике Беларусь относятся: мелиорация земель, разработка полезных ископаемых открытым и шахтным способами, чрезмерный водоотбор, статические и динамические нагрузки от сооружений и транспорта, инженерная и хозяйственная деятельность человека на урбанизированных территориях, природные климатические условия, генезис и состав горных пород. Выявлены и охарактеризованы инженерно-геологические процессы и явления, среди которых: снижение уровня подземных вод, гравитационные процессы и локальные землетрясения, суффозия, морозное пучение, затопление и подтопление. Распространение инженерногогеологических процессов и явлений имеет локальный характер в пределах населенных пунктов, но также охватывает обширные территории в десятки квадратных километров. В результате исследования составлены картосхемы источников техногенного воздействия на геологическую среду и проявления инженерно-геологических процессов на территории Беларуси.

Ключевые слова:

Инженерно-геологические процессы, осушительная мелиорация, подземные воды, карьеры, шахты, отвалы, урбанизированные территории, деформации зданий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Zou L., Gui W. Simulation and prediction of geologic hazards and the impacts on homestay buildings in scenery spots through BIM // PLOS ONE journal. – 2020. – V. 15 (9). – P. 1–14.
- Liu Y., Wu L. High performance geological disaster recognition using deep learning // Procedia Computer Science journal. – 2018. – V. 139. – P. 529–536.
- Orozco M.M., Caballero J.M., Nader A. Smart disaster prediction application using flood risk analytics // EDP Sciences journal. – 2018. – V. 189. – P. 10006–10016.
- Hunt R.E. Geologic hazards: a field guide for geotechnical engineers. – Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2005. – 324 p.
- Giles D.P. Introduction to geological hazards in the UK: their occurrence, monitoring and mitigation // Engineering Geology Special Publications. – 2020. – V. 29 (1). – P. 1–41.

- Состояние природной среды Беларуси: ежегодное информационно-аналитическое издание. – Минск: РУП «Бел НИЦ «Экология», 2020. – 101 с.
- Галкин А.Н., Матвеев А.В., Жогло В.Г. Инженерная геология Беларуси. Основные особенности пространственной изменчивости инженерно-геологических условий и история их формирования. – Витебск: Изд-во ВГУ им. П.М. Машерова, 2006. – 208 с.
- Влияние осушительных мелиораций на формирование режима подземных вод / М.Ф. Козлов, Т.Д. Кривецкая, А.М. Гречко, В.И. Пашкевич // Проблемы изучения земной коры Белоруссии и сопредельных территорий. – Минск: Наука и техника, 1986. – С. 119–130.
- Гидрогеологическая экспертиза широкомасштабных осушительных мелиораций Белорусского Полесья / А.В. Кудельский, А.М. Гречко, Т.Д. Кривецкая, В.И. Пашкевич. – Минск: Навука і тэхніка, 1993. – 112 с.

- Инженерная геология Беларуси. Ч. 2. Инженерная геодинамика Беларуси / А.Н. Галкин, А.В. Матвеев, А.И. Павловский, А.Ф. Санько. – Витебск: Изд-во ВГУ имени П.М. Машерова, 2017. – 456 с.
- Ясовеев М.Г., Гледко Ю.А. Геоэкологические проблемы разработки Микашевичского месторождения строительного камня // Вестник Белорусского государственного университета. Сер. 2, Химия. Биология. География. – 2001. – № 2. – С. 71–76.
- Guzy A., Malinowska A.A. State of the art and recent advancements in the modelling of land subsidence induced by groundwater withdrawal // Water. - 2020. - V. 12 (7). -Article 2051.
- Vervoort A. Surface movement above an underground coal longwall mine after closure // Natural Hazards Earth Systems Sciences. – 2016. – V. 16 (9). – P. 2107–2121.
- Land subsidence in central Mexico detected by ALOS InSAR time-series / E. Chaussard, S. Wdowinski, E. Cabral-Cano, F. Amelung // Remote Sensing Environment. – 2014. – V. 140. – P. 94–106.
- Land surface subsidence due to mining-induced tremors in the Upper Silesian coal basin (Poland) / P. Sopata, T. Stoch, A. Wójcik, D. Mrocheń // Remote Sensing. – 2020. – V. 12 (23). – Article 3923.
- Glass SlideE. Interpreting aerial photographs to identify natural hazards. – Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2013. – 168 p.
- Смычник А.Д., Богатов Б.А., Шемет С.Ф. Геоэкология калийного производства. – Минск: Юнипак, 2005. – 201 с.
- Природная среда Беларуси / под ред В.Ф. Логинова. Минск: НОООО «БИП-С», 2002. – 422 с.

- Матвеев А.В. История формирования рельефа Белоруссии. Минск: Навука і тэхніка, 1990. – 144 с.
- Михайлов В.И., Кабацкий А.В. Деформационный мониторинг зданий и сооружений, находящихся в зоне техногенных просадок земной поверхности Солигорского промрайона // Проблемы и перспективы развития автомобильных дорог СНГ. – Минск: БНТУ, 2019. – С. 150–157.
- Курило К.А. Оценка естественных ресурсов подземных вод и последствий водоотбора на окружающую среду Беларуси. – Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2005. – № 5. – С. 406–410.
- Березко О.А. Влияние водоотбора на подземную гидросферу г. Минска. – Природные ресурсы. – 2008. – № 2. – С. 17–21.
- Аронов А.Г. Особенности пространственно-временной сейсмической активности в Солигорском горнопромышленном регионе // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2019. – Т. 63. – № 2. – С. 216–222.
- 24. Губин В.Н. Сейсмоактивные геодинамические зоны Старобинского месторождения калийных солей по данным дистанционного зондирования Земли // Геоматика. 2015. № 3. С. 56–62.
- 25. Торбенко А.Б., Галкин А.Н., Красовская И.А. Особенности проявления современных экзогенных геологических и инженерно-геологических процессов на территории Витебска // Инженерная геология. – 2018. – Т. 13. – № 6. – С. 66–75.

Поступила 01.04.2022 г.

Информация об авторах

Галкин А.Н., доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры географии Витебского государственного университета им. П.М. Машерова.

Красовская И.А., кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры географии Витебского государственного университета им. П.М. Машерова.

Павловский А.И., кандидат географических наук, заведующий кафедрой геологии и географии Гомельского государственного университета им. Франциска Скорины.

Шершнёв О.В., кандидат географических наук, доцент кафедры переподготовки и повышения квалификации Гомельского государственного университета им. Франциска Скорины.

UDC 665.775:66.011

INFLUENCE OF THE OXIDIZER ON THE FORMATION AND PURIFICATION EFFICIENCY OF ACID GASES PRODUCED DURING ASPHALTENE GASIFICATION

Denis V. Ermolaev¹,

energoed@mail.ru

Ayrat Z. Daminov¹,

daminov@list.ru

¹ FRC Kazan Scientific Center, Russian Academy of Sciences, 2/31, Lobachevsky street, Kazan, 420111, Russia.

The relevance of the study is determined by the need to understand the influence of the oxidizer on the formation of acid gases (CO_2 , H_2S , COS and CS_2) during thermal decomposition of high-viscosity hydrocarbons. This is important for predicting the purification efficiency of the produced gasification products and estimating the economic costs.

The aim: using the simulation to study the effect of an oxidizer in the form of steam on the composition and properties of asphaltene gasification products obtained from natural bitumen, as well as to determine the cleaning efficiency depending on the amount of steam and the absorbent based on NaOH water-alkaline solution.

Object: asphaltene of natural bitumen of Ashalchinskoe field of the Tatarstan Republic (Russia), oxidizer in the form of steam, the value of which varied from 0,1 to 1 depending on the amount of asphaltene.

Methods: simulation of asphaltene gasification and acid gas absorption taking into account influence of an oxidizer in a form of steam with regard for basic chemical kinetics, ultimate analysis and TGA.

Simulation results of gasification and absorption showed that steam used as an oxidizer during asphaltene gasification has a significant influence on the composition and properties of gasification products, as well as on the purification of syngas. With the increase of steam, a parabolic dependence of the concentrations of syngas components is observed, which values decrease with time, except for CO₂. The calorific value of syngas decreases from 11,3 to 7,2 MJ/m³ and the cold gas efficiency increases from 53,4 to 62,5 % due to growth of syngas yield. As the amount of steam increases, the amount of absorbent decreases and the purification efficiency of acid gases rises. Thus, the amount of absorbed CO₂ increases by 20,7 % while the absorbent decreases by 6,7 %. At the same time the amount of absorbed H₂S increased by 0,39 % with decrease of NaOH by 40,9 %.

Key words:

Asphaltene, gasification, syngas, acid gas purification, NaOH.

Introduction

According to the International Energy Agency, in 2021 global CO₂ emissions increased by nearly 4,8 percent to 33 Gigatons, thereby approaching the 2018–2019 peak [1]. This increase, as noted by the International Energy Agency, is due to a recovery in demand for classic energy sources such as coal, oil and gas in the second year of the Covid-19 pandemic. In this regard, the use of conventional energy technologies will lead to an increase in acid gases, which will not only worsen the environmental situation, but also have a negative impact on energy equipment. One way to solve this problem is to use clean technologies, which reduce the negative impact on the environment by significantly improving energy efficiency, sustainable use of resources or environmental protection activities. Clean technologies include a wide range of technologies related to recycling, renewable energy, etc.

In this regard, the use of fuel gasification is a more environmentally attractive technology compared to direct combustion. According to the Global Syngas Technologies Council, there are several hundred gasification plants work in the USA, Europe, Asia, South Africa and other countries which process various raw materials for the production of liquid and gaseous fuels [2]. Oil sands and bitumen are the important sources of raw materials and are being studied in Canada, USA, Venezuela and other countries. According to [3], bitumen reserves are estimated at 5,9 billion tons in the United States, 24,1 billion tons in Canada, and 36,4 billion tons in Venezuela. A significant amount of bitumen in Russia is concentrated in the Tatarstan Republic (about 7 billion tons). Gasification of bitumen will produce syngas and related products for various industries.

Natural gas, associated petroleum gas, syngas may contain acid gaseous components – carbon dioxide (CO₂) and hydrogen sulfide (H₂S), as well as sulfur compounds – carbonyl sulfide (COS), carbon disulfide (CS₂), and other impurities that negatively affect the environment and equipment. For example, the presence of CO₂ and H₂S creates conditions for metal corrosion and also reduces the efficiency of catalytic processes. In addition, H₂S and COS are highly toxic substances. Removal of these acid gases is driven by operational, economic, and environmental factors [4].

Various absorbents and methods, including alkanolamines [5], organic solvents [6], membrane separation [7], adsorption, and biological methods [8], are used to purify acid gases. One way to purify acid gases in industry is to use aqueous-alkaline solutions, particularly based on sodium hydroxide (NaOH) [9]. One of the advantages of the latter is that it does not contain harmful impurities. Waste NaOH can be used for simple neutralization or in pulp and paper mills after quality control analysis [10].

The use of NaOH today is quite widespread and still relevant. A study [11] described the simultaneous removal of gaseous NO_x and SO_2 from the flue gases of coal-

fired power plants, where NaOH was used as an absorbent in the wet scrubber cleaning process, are described.

In [12] the authors conduct a comparative analysis of the use of different membrane contactor for effective and selective removal of SO_2 from the exhaust gases of ships using NaOH.

The authors of [13] used NaOH to reduce H_2S concentrations in wastewater collection system wells, which reduced the average H_2S content by a factor of about 10.

A work [14] proposes using NaOH in a scrubber to remove H_2S from the geothermal fluid in the pilot plant of the Castelnuovo geothermal power plant. Due to the adopted countercurrent scrubber nozzle design, H_2S removal efficiency was achieved and allowed high CO_2 concentrations to be treated.

One of the recent works related to NaOH concerns its application as a catalyst together with Ni to effectively increase hydrogen production and decompose phenol in the treatment of complex phenolic wastewater [15].

NaOH is mainly used in the form of a solution in liquid form. However, the authors of the work [16] proposed a technology for purification of flue gases of power plants from CO_2 and obtaining from it a solid carbonate, which uses NaOH in solid form.

In addition to technical solutions for the use of NaOH, scientific research related to this alkali is being conducted.

Paper [17] presents a method for measuring CO_2 in synthetic biogas by passing it through a dilute NaOH solution.

The authors of the paper [18] developed a polarizable sodium hydroxide force field for modeling the structure and thermodynamics of concentrated NaOH solutions. This force field allows us to describe the structural and thermodynamic properties of NaOH salt in aqueous solutions, which is confirmed with experiments for a wide range of concentrations.

In [19] four mass transfer rate models and two enhancement factors were estimated using CFD modeling for CO_2 uptake in aqueous NaOH solution by comparing simulation results with previously published experimental data.

The purpose of this work is to evaluate the influence of the oxidizer on the formation of syngas components and the efficiency of its purification from acid gases using NaOH-based aqueous-alkaline solution.

Model development

Model description

Bitumen contains heteroatomic compounds, including sulfur, oxygen, nitrogen, metals, and high-molecular oil hydrocarbons [20]. Asphaltene of natural bitumen of the Ashalchinskoe oilfield (Russia) was chosen as the object of numerical simulation as a substance containing a significant amount of carbon and hydrogen.

The ultimate analysis and properties of asphaltene under study are presented in Table 1. According to work [21] the structural formula of asphaltene was chosen. CHNS contents were determined using elemental analyzer (EuroEA3000, Eurovector SpA, Italy). The calorific value of the sample was determined in an IKA C200 calorimeter (Germany).

Table 1.	Ultimate analysis and properties of the asphal-
	tene under study

Таблица 1. Элементный анализ и свойства исследуемого асфальтена

-	
Formula/Формула	$C_{164}H_{150}N_4O_4S_3$
Carbon/Углерод	84,28 %
Hydrogen/Водород	6,47 %
Oxygen/Кислород	2,73 %
Nitrogen/A30T	2,4%
Sulfur/Cepa	4,12 %
Molar mass/Молярная масса	2,337 kg/mol/кг/моль
Calorific value/Теплота сгорания	35,4 MJ/kg/MДж/кг

Fig. 1 shows a flow chart of asphaltene gasification and syngas purification. Asphaltene is sprayed in the internal space of the gasifier and interacts with the steam. As a result, syngas and a solid residue in the form of unreacted hydrocarbon are formed. The produced syngas containing sulfur products is directed to the absorber for purification, where it is purified from acid gases by a NaOH-based aqueous-alkaline solution.



Fig. 1. Flow chart of asphaltene gasification and syngas purification

Рис. 1. Схема газификации асфальтена и очистки синтез-газа

For the numerical simulation, steam was taken as the oxidizer. The steam/asphaltene ratio (S/A) was chosen as a variable parameter, on which the amount of formed gasification products depends. A temperature value of 1400 °C corresponds to the gasification temperature of heavy oil residues according to Texaco technology. The gasification pressure was calculated based on the ideal gas law. The values given in Table 2 were used as operating parameters for asphaltene gasification simulation.

Table 2.Operating parameters of tgasificationТаблица 2.Режимные параметры процесса газификации

, 1 1	1, 1,
Gasification temperature Температура газификации	1400 °C
Asphaltene flow rate/Расход сырья	100 kg/h/кг/ч
Oxidizer/Окислитель	H ₂ O (steam)/(пар)
Steam/asphaltene ratio (S/A)/Пар/асфальтен	0,1–1

NaOH-based aqueous-alkaline solution was chosen as an absorbent for purification of acid gases produced during asphaltene gasification simulation. Table 3 shows the absorption specifications based on data from work [22].
Таблица 3. Характер	чистики процесса	абсорбции
---------------------	------------------	-----------

Absorption temperature Температура абсорбции	25 °C
Absorbent/Абсорбент	NaOH
Solution concentration Концентрация раствора	10 % NaOH, 90 % H ₂ O
Molar mass/Молярная масса	0,019 kg/mol/кг/моль

The methodology for evaluating the oxidizer effect on the formation and purification efficiency of acid gases produced during asphaltene gasification included several steps (Fig. 2).



Рис. 2. Алгоритм исследования

Stage 1 – development of the asphaltene gasification model, including the following tasks:

- gathering information about the gasified feedstock (elemental composition, molar mass, calorific value, formula);
- determination of operating parameters of gasification (temperature, oxidizer, oxidizer/feedstock ratio, flow rates);
- determination of the kinetics of gasification (initial concentrations of reagents, gasification reactions, reaction rate constants);
- obtaining gasification simulation results (concentrations of gasification products, calorific value of syngas, cold gas efficiency, gasification pressure);

• comparison of simulated results with the known data. Stage 2 – development of the syngas purification model, including the following tasks:

- gathering information about the absorbent (solution composition and concentration, molar mass);
- determination of absorption specifications (temperature, acid gas and absorbent flow rates);
- determination of the absorption kinetics (initial concentrations of reagents, absorption reactions, reaction rate constants);
- obtaining absorption simulation results (concentrations of absorption products);

• comparison of simulated results with the known data.

Stage 3 – determination of acid gas purification efficiency depending on the amount of oxidizer and absorbent, including the following tasks:

- determination of maximum permissible concentrations (MPC) of acid gases in accordance with regulatory documents;
- determination of the necessary amount of absorbent to achieve safe values of the acid gas content at different S/A ratios;
- determination of the purification efficiency of acid gases at different S/A ratios.

Model assumptions

In order to simplify the simulation, some assumptions are made as follows:

- The reaction of asphaltene and steam produces syngas and a solid residue in the form of unreacted carbon (reaction R1).
- Part of the carbon interacts with CO₂, H₂ and steam.
- The produced dry syngas consists of CO, CO₂, H₂, CH₄, N₂ and H₂S.

Methods

Gasification kinetics

Gasification kinetics can be viewed as a complex of several stages (Fig. 1). Having reached the required spray temperature, fuel and oxidizer continue heating until microcracks form on the asphaltene surface due to water evaporation. As a result, light hydrocarbons are released. Then oxidation-reduction, steam-methane reforming and water-gas shift reactions take place. At this time solid residue and syngas are formed.

In developing the asphaltene gasification model, the following chemical reactions were considered.

Chemical reactions with steam and asphaltene:

$Asphaltene+H_2O \longrightarrow H_2+CO+CO_2+CH_4+H_2O+H_2S+N_2+C (H_2) = -2 + 2 + 2 + 2 + 2 + 2 + 2 + 2 + 2 + 2 $	R1)
---	-----

$$CH_4 + 2H_2O \longleftrightarrow CO_2 + 4H_2 \tag{R2}$$

 $H_2O \leftrightarrow H_2+0,5O_2$

Steam-Reforming reaction:

 $CO+3H_2 \leftrightarrow CH_4+H_2O$ (R4)

 $CH_4+0,5O_2 \rightarrow CO+2H_2$ (R5) Water-gas shift reaction:

$$CO_2 + H_2 \leftrightarrow CO + H_2O$$
 (R6)

Methanation reaction: $2CO+2H_2 \leftrightarrow CH_4+CO_2$ (R7)

$$C_{H_4} \leftrightarrow C_{+2} H_2 \qquad (R8)$$

$$C+2H_2O\leftrightarrow CO_2+2H_2$$
(R9)
$$C+2H_2O\leftrightarrow CO_2+2H_2$$
(R10)

$$+2H_2O \leftrightarrow CO_2 + 2H_2 \qquad (R10)$$

 $C+CO_2 \leftrightarrow 2CO$ (R11)

Chemical reactions with sulfur-containing substances:

$$CH_4+2H_2S \leftrightarrow CS_2+4H_2$$

$$CO_2+H_2S \rightarrow COS+H_2O$$
(R12)
(R13)

$$2COS \rightarrow CO \rightarrow CS \qquad (R13)$$

$$2COS \rightarrow CO_2 + CS_2 \tag{R14}$$

217

(R3)

$$CS_2 + 2H_2O \longrightarrow CO_2 + 2H_2S \tag{R15}$$

Oxidation reaction:

$$C+0,5O_2 \rightarrow CO$$
 (R16)

To determine the rate constant in the reaction R1, the experiments were carried out to determine the mass change using TGA and DSC methods and a NETZSCH STA 449 F3 thermal analyzer (Germany) [23].

Using the relation from work [24], the rate constant of the second-order reaction was calculated as:

$$k = \frac{c_0 - c}{\tau \cdot c_0 \cdot c},$$

 τ is the time, min; c_0 is the initial sample mass, kg; c is the sample mass at time τ , kg.

The obtained average value of the rate constant for the reaction R1 was 5,997.10⁻⁵. This value was used for asphaltene gasification model. For the other reactions R2-R16, the rate constants and equilibria were obtained from the data from the works [25-27].

Kinetics of the absorption process

The absorber is supplied with a water-alkaline solution, which is spraye the acid gases. The production, and the stock in various indu

The following rea hydrogen sulfide and tion model [10]:

$$H_2S+NaOH \longrightarrow NaHS+H_2O$$
(R17)

$$H_2S+2NaOH \rightarrow Na_2S+2H_2O$$
 (R18)

The interaction of CO₂ with NaOH was based on the following kinetics [22]:

$$CO_2 + NaOH \rightarrow NaHCO_3$$
 (R19)

$$CO_2 + 2NaOH \rightarrow Na_2CO_3 + H_2O$$
 (R20)

The produced additional organosulfur compounds also interact with NaOH:

$$COS+4NaOH \rightarrow Na_2S+Na_2CO_3+2H_2O$$
 (R21)

Fig. 3 shows the non-stationary dependences of the concentrations of the syngas components at S/A=0,1, 0,5 and 1. As can be seen from the figure, in the beginning of gasification there is a rapid increase in the concentration of CO and H₂, then the process slows down. At the same time, there is an increase in the concentration of CO_2 . With the increase of steam, a parabolic dependence of the concentrations of syngas components is observed, which values decrease with time, except for CO₂.



Fig. 3. Dependences of syngas component concentrations on time at S/A=0,1, 0,5 and 1

Рис. 3. Зависимости нестационарных концентраций компонентов синтез-газа при S/A=0,1, 0,5 и 1

$$CS_2+6NaOH \rightarrow 2Na_2S+Na_2CO_3+3H_2O$$
 (R22)

According to Kopylov [22] the values of the reaction rate constants for sulfur compounds [R17, R18, R21, R22] were taken as $1,87 \cdot 10^{-4}$ and for CO₂ [R19, R20] - $1,23 \cdot 10^{-5}$.

Methods of data analysis

The cold gas efficiency (CGE) is defined as [28]:

$$CGE = (HHV_{gas} \cdot \phi) / HHV_{feedstock}$$

Here, ϕ is the gas yield in m³/kg; HHV_{gas} is the higher heating value of the producer gas in MJ/m³; and HHV_{feedstock} is the higher heating value of the asphaltene in MJ/kg.

Model Validation

As for validation purpose the results of simulation of asphaltene gasification and syngas absorption were compared with known literature data. The accuracy of the proposed models is estimated by the root mean square error (RMSE) using follow equation:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} \left(Exp_i - Mod_i \right)^2}{n}}.$$

imental (literary) value; Mod is ne number of values.

Fig. 4 shows the dependence of the calorific value of syngas (HHV_{gas}) on the S/A ratio. It can be seen that as the amount of steam increases, the calorific value decreases from 11,3 to 7,2 MJ/m³. Meanwhile, CGE increases from 53,4 to 62,5 % due to the increase in syngas yield.

Fig. 5 shows the dependence of the change in the average gasification pressure on S/A ratio. It can be seen that with increasing steam, the average gasification pressure declines. This is due to a decrease in the initial molar concentrations of the reagents as the S/A ratio increases.



Fig. 4. Dependence of HHV syngas and CGE value on the S/A ratio

Рис. 4. Зависимость теплоты сгорания синтез-газа и КПД газификации от S/A



For validation of the results of asphaltene gasification simulation, the concentrations of syngas components were compared with the data [29, 30] at S/A=0,4 and T=1400 °C (Fig. 6). Our results showed good convergence with the results of other researchers (RMSE=4,7 and RMSE=6,13 respectively). The low values of CO and CO₂ are related to the deficit of oxygen during steam gasification.

The values of acid gas concentrations obtained during asphaltene gasification simulation at different S/A ratios are presented in Table 4. For comparison, the values of maximum permissible concentrations (MPC) for acid gases according to Sanitary-hygienic standard 2.2.5.2100-06 [31] are also presented. The table shows that concentration of CO_2 exceeds the standard by 2–5 times. For H₂S this indicator is higher by 3000 times. COS and CS₂ concentrations do not exceed MPC, so we did not consider them further.



Fig. 6. Comparison of the results of asphaltene gasification simulation with the known data

- **Рис. 6.** Сравнение результатов моделирования газификации асфальтенов с известными данными
- Table 4.
 Obtained values of acid gas concentrations at different S/A

Таблица 4. Полученные значения концентраций кислых газов при различных S/A

24300 hpu pushu mota 5/11					
C/A	CO ₂	H ₂ S	COS	CS_2	
S/A	mg/m ³ /мг/м ³				
0,1	56 109	10 307	0,251	0,936	
0,2	84 894	9 042	0,198	0,362	
0,3	102 309	8 164	0,165	0,188	
0,4	112 446	7 556	0,143	0,115	
0,5	119 579	7 046	0,126	0,073	
0,6	124 929	6 577	0,111	0,046	
0,7	127 965	6 243	0,101	0,032	
0,8	130 394	5 901	0,091	0,022	
0,9	131 815	5 626	0,084	0,016	
1	132 704	5 368	0,077	0,011	
МРС/ПДК	27 000	3	10	10	

Absorption simulation results

As a result of syngas purification simulation, the values of purification efficiency and amount of absorbent at different S/A ratios were obtained.

Fig. 7, 8 show the dependences of the absorption degree of acid gases on the amount of absorbent at S/A=0,1, 0,5 and 1. According to results of calculation it is visible that with increase of steam, purification efficiency increases and amount of required absorbent declines. Meanwhile, the curves of CO_2 purification efficiency become parabolic with increasing S/A ratio, while for H_2S it is closer to a linear dependence.



Fig. 7. Dependence of CO_2 absorbed on the absorbent at different S/A

Рис. 7. Зависимость поглощенного CO₂ от абсорбента при различных S/A



Fig. 8. Dependence of H_2S absorbed on the absorbent at different S/A

Рис. 8. Зависимость поглощенного H₂S от абсорбента при различных S/A

For validation the results of syngas purification simulation, we compared them with the known data [32, 33] under similar conditions (Figs. 9, 10) and they showed good convergence (RMSE=3,62 and 4,98 respectively).



Fig. 9. Comparison of the dependence of CO_2 absorbed with the known data

Рис. 9. Сравнение зависимости поглощения CO₂ с известными данными



Fig. 10. Comparison of the dependence of H_2S absorbed with the known data

Рис. 10. Сравнение зависимости поглощения H₂S с известными данными

Effect of the oxidizer on acid gases

Table 5 shows the safe values of acid gases (below the MPC value) depending on the amount of absorbent, steam and purification efficiency. The table shows that as

the amount of steam increases, there is a decrease in the amount of absorbent and an increase in purification efficiency. Thus, the amount of absorbed CO_2 increases by 20,7 % (from 53,68 to 74,38 %) with a decrease in the amount of NaOH for purification by 6,7 % (from 1,5 to 1,4). At the same time, the amount of absorbed H₂S increased by 0,39 % (from 96,34 to 96,73 %) with a decrease in NaOH by 40,9 % (from 4,4 to 2,6). The obtained dependence of purification efficiency on the amount of absorbent agrees with the results of Álvarez-Cruz et al. [34].

Table 5.	Safe acid gas	ses values d	at differe	nt S/A		
Таблица 5.	Безопасные	значения	кислых	газов	при	раз
	THUHHY S/A					

			5/11			
S/A	NaOH/CO ₂	CO ₂ , mg/m ³ CO ₂ , MI/M ³	CO ₂ absorbed, % Уловленный CO ₂ , %	NaOH/H ₂ S	${ m H_2S, mg/m^3}$ ${ m H_2S, mr/m^3}$	Н ₂ S absorbed, % Уловленный Н ₂ S, %
0,1	1,5	26552	53,68	4,4	2,93	96,34
0,2	1,5	23808	57,05	3,6	2,96	96,38
0,3	1,5	22295	60,42	3,3	2,79	96,43
0,4	1,4	24306	63,79	3,1	2,84	96,47
0,5	1,4	23096	67,16	2,9	2,98	96,52
0,6	1,4	22284	68,61	2,8	2,95	96,56
0,7	1,4	21773	70,05	2,8	2,75	96,60
0,8	1,4	21435	71,49	2,7	2,81	96,65
0,9	1,4	21148	72,94	2,6	2,93	96,69
1	1,4	21056	74,38	2,6	2,78	96,73

Conclusions

It was revealed that steam used as an oxidizer during asphaltene gasification has a significant effect on the composition and properties of gasification products, as well as on the syngas purification.

The results of asphaltene gasification simulation showed that in the beginning of gasification there is a rapid increase in the concentration of CO and H₂, then the process slows down. With the increase of steam, a parabolic dependence of the concentrations of syngas components is observed, which values decrease with time, except for CO₂. The calorific value of syngas decreases from 11,3 to 7,2 MJ/m³ and the cold gas efficiency increases from 53,4 to 62,5 % due to an increase in syngas yield.

Comparing the obtained concentrations of acid gases with MPC, it was found that the concentration of CO_2 exceeds the standard by 2–5 times, H_2S – by 3000 times. COS and CS₂ concentrations do not exceed the MPC.

The results of syngas purification simulation showed that as the amount of steam increases, there is a decrease in the amount of absorbent and an increase in purification efficiency. Thus, the amount of absorbed CO₂ increases by 20,7 % (from 53,68 to 74,38 %) with a decrease in the amount of NaOH for purification by 6,7 % (from 1,5 to 1,4). At the same time, the amount of absorbed H₂S increased by 0,39 % (from 96,34 to 96,73 %) with a decrease in NaOH by 40,9 % (from 4,4 to 2,6).

This work was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (project no. FMEG-2021-0001).

REFERENCES

- International Energy Agency. Global Energy Review 2021. Assessing the effects of economic recoveries on global energy demand and CO₂ emissions in 2021. Available at: https://www.iea.org/ reports/global-energy-review-2021 (accessed 5 July 2021).
- Higman C., Van der Burgt M. Gasification. 2nd ed. Burlington, VT, USA, Gulf Professional Publ., 2008. 456 p.
- Kashirtsev V.A., Hein F.J. Overview of natural bitumen fields of the Siberian platform, Olenek uplift, Eastern Siberia, Russia. Heavy-oil and oil-sand petroleum systems in Alberta and beyond: AAPG Studies in Geology. *The American Association of Petroleum Geologists*, 2013, vol. 64, pp. 509–529.
- Kohl A.L., Nielsen R.B. Gas Purification. 5th ed. USA, Houston, Gulf Professional Publ., 1997. 1395 p.
- Rufford T.E., Smart S., Watson G.C.Y., Graham B.F., Boxall J., Diniz da Costa J.C., May E.F. The removal of CO₂ and N₂ from natural gas: a review of conventional and emerging process technologies. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2012, vol. 94–95, pp. 123–154.
- Tanthana J., Rayer A.V., Gupta V., Mobley P.D., Soukri M., Zhou J., Lail M. Experimental study of a hydrophobic solvent for natural gas sweetening based on the solubility and selectivity for light hydrocarbons (CH₄, C₂H₆) and acid gases (CO₂ and H₂S) at 298–353 K. *Journal* of Chemical & Engineering Data, 2019, vol. 64 (2), pp. 545–556.
- Hedayat M., Soltanieh M., Mousavi S.A. Simultaneous separation of H₂S and CO₂ from natural gas by hollow fiber membrane contactor using mixture of alkanolamines. *Journal of Membrane Science*, 2011, vol. 377, pp. 191–197.
- Castellani B., Rossi F., Filipponi M., Nicolini A. Hydrate-based removal of carbon dioxide and hydrogen sulphide from biogas mixtures: experimental investigation and energy evaluations. *Biomass and Bioenergy*, 2014, vol. 70, pp. 330–338.
- Tippayawong N., Thanompongchart P. Biogas quality upgrade by simultaneous removal of CO₂ and H₂S in packed column reactor. *Energy*, 2010, vol. 35 (12), pp. 4531–4535.
- Üresin E., Saraç H.İ., Sarıoğlan A., Ay Ş., Akgün F. An experimental study for H₂S and CO₂ removal via caustic scrubbing system. *Process Safety and Environmental Protection*, 2014, vol. 94, pp. 196–202.
- Kang M.S., Shin J., Yu T.U., Hwang J. Simultaneous removal of gaseous NO_x and SO₂ by gas-phase oxidation with ozone and wet scrubbing with sodium hydroxide. *Chemical Engineering Journal*, 2020, vol. 381, 122601.
- Xu P., Huang Y., Kong X., Gong D., Fu K., Chen X., Qiu M., Fan Y. Hydrophilic membrane contactor for improving selective removal of SO2 by NaOH solution. *Separation and Purification Technology*, 2020, vol. 250, 117134.
- Wiley P.E. Reduction of hydrogen sulfide gas in a small wastewater collection system using sodium hydroxide. Water Environment Research, 2019, vol. 91, pp. 483–490.
- Colucci V., Niknam P.H., Fiaschi D., Talluri L., Manfrida G. Acid gas removal in a geothermal pilot power plant via caustic scrubbing system: the case study of Castelnuovo. *The 12th European Congress of Chemical Engineering*. Florence, 2019. pp. 1–3.
- Zhang H., Zhang R., Ling Z., Li W., Yan Y., Gong M., Ma J. Partial oxidation of phenolic wastewater using NaOH and Ni addition for hydrogen production and phenolics degradation in supercritical water. *Separation and Purification Technology*, 2021, vol. 268, 118685.
- Ruiz C., Rincón L., Contreras R.R., Sidney C., Almarza J. Sustainable and negative carbon footprint solid-based NaOH technology for CO₂ capture. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2020, vol. 8, pp. 19003–19012.
- Fahim F., Shayegan J. CO₂ measurement of synthetic biogas by passing it through dilute NaOH solution. *Iranian Journal of Chemis*try and Chemical Engineering, 2020, vol. 39 (3), pp. 107–116.

- Coste A., Poulesquen A., Diat O., Dufrêche J.-F., Duvail M. Investigation of the structure of concentrated NaOH aqueous solutions by combining molecular dynamics and wide angle X-ray scattering. *The Journal of Physical Chemistry B*, 2019, vol. 123, pp. 5121–5130.
- Junda L., Ping Z., Liu L., Si C., Yanpo S., Hongjie Y. CFD modeling of reactive absorption of CO₂ in aqueous NaOH in a rectangular bubble column: comparison of mass transfer and enhancement factor model. *Chemical Engineering Science*, 2020, vol. 230, 116218.
- Read J., Whiteoak D. The Shell bitumen handbook. London, U.K., Thomas Telford Publ., 2003. 464 p.
- Ancheyta J. Modeling and simulation of catalytic reactors for petroleum refining. Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons, Inc., 2011. 528 p.
- 22. Kopylov A.Y. Tekhnologii podgotovki i pererabotki sernistogo uglevodorodnogo syrya na osnove ekstraktsionnykh protsessov. Dis. Dokt. nauk [Technologies of the preparation and processing of sulfur hydrocarbon feedstocks based on extraction processes. Dr. Diss.]. Kazan, 2010. 396 p.
- Ermolaev D.V. The prediction of the concentrations of syngas components produced during non-catalytic steam gasification of bitumen. *Petroleum Science and Technology*, 2018, vol. 36 (5), pp. 392–397.
- 24. Pismenko V.T., Kalukova E.N. Kinetika khimicheskikh reaktsiy. Opredelenie konstanty skorosti i energii aktivatsii reaktsiy. Metodicheskie ukazaniya k laboratornoy rabote [Kinetics of chemical reactions. Determination of the rate constant and the activation energy of the reactions. Methodological instructions for laboratory work on physical chemistry]. Ulyanovsk, UISTU Publ., 2002. 20 p.
- Nikolsky B.P. Spravochnik khimika. T. 3. *Khimicheskoe ravnovesie i kinetika svoystva rastvorov* [Chemist's Handbook. Vol. 3. Chemical equilibrium and kinetics of the properties of solutions]. Moscow; Leningrad, Khimiya Publ., 1965. 1006 p.
- Luo Y.-R. Comprehensive handbook of chemical bond energies. Boca Raton, London; New York, CRC Press, 2007. 1688 p.
- Mingaleeva G.R., Ermolaev D.V., Galkeeva A.A. Physicochemical foundations of produced syngas during gasification process of various hydrocarbon fuels. *Clean Techn Environ Policy*, 2016, vol. 18 (1), pp. 297–304.
- Hu Y., Qiurong Cheng Q., Wang Y., Guo P., Wang Z., Liu H., Akbari A. Investigation of biomass gasification potential in syngas production: characteristics of dried biomass gasification using steam as the gasification agent. *Energy Fuels*, 2020, vol. 34, pp. 1033–1040.
- Vaezi M., Passandideh-Fard M., Moghiman M., Charmchi M. Gasification of heavy fuel oils: a thermochemical equilibrium approaslide *Fuel*, 2011, vol. 90 (2), pp. 878–885.
- Ancheyta J. Modeling of processes and reactors for upgrading of heavy petroleum. USA, Boca Raton, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2013. Vol. XXIII, 524 p.
- GN 2.2.5.2100-06 Predelno dopustimye kontsentratsii vrednykh veshchestv v vozdukhe rabochey zony [Sanitary-hygienic standard 2.2.5.2100-06 Maximum permissible concentrations of harmful substances in occupational air]. Moscow, Ministry of Health of the Russian Federation, 2006. 3 p.
- Trisnaliani L., Pranata D.E., Fatria Tahdid Ridwan K.A., Alfarizi M.N., Lumbantoruan M.P. The Effect of flowrate and NaOH concentration to CO₂ reduction in biogas products using absorber. *Journal* of *Physics: Conference Series*, 2020, vol. 1500, 012054.
- Chen L., Huang J., Yang C.-L. Absorption of H₂S in NaOCl caustic aqueous solution. *Environmental Progress*, 2001, vol. 20 (3), pp. 175–181.
- Älvarez-Cruz R., Sánchez-Flores B.E., Torres-González J., Antaño-López R., Castañeda F. Insights in the development of a new method to treat H₂S and CO₂ from sour gas by alkali. *Fuel*, 2012, vol. 100, pp. 173–176.

Received: 8 April 2022.

Information about the authors

Denis V. Ermolaev, Cand. Sc., senior researcher, Institute of Power Engineering and Advanced Technologies, FRC Kazan Scientific Center, Russian Academy of Sciences.

Ayrat Z. Daminov, Cand. Sc., leading researcher, Institute of Power Engineering and Advanced Technologies, FRC Kazan Scientific Center, Russian Academy of Sciences.

УДК 665.775:66.011

ВЛИЯНИЕ ОКИСЛИТЕЛЯ НА ОБРАЗОВАНИЕ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОЧИСТКИ КИСЛЫХ ГАЗОВ, ПОЛУЧЕННЫХ В ПРОЦЕССЕ ГАЗИФИКАЦИИ АСФАЛЬТЕНА

Ермолаев Денис Васильевич1,

energoed@mail.ru

Даминов Айрат Заудатович¹,

daminov@list.ru

Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук», Россия, 420111, г. Казань, ул. Лобачевского, 2/31.

Актуальность исследования определяется необходимостью понимания влияния окислителя на образование кислых газов (CO₂, H₂S, COS и CS₂) в процессе термического разложения высоковязких углеводородов. Это важно для прогнозирования эффективности очистки полученных продуктов газификации и оценки экономических затрат.

Цель: с помощью математического моделирования исследовать влияние окислителя в виде пара на состав и свойства продуктов газификации асфальтена, полученного из природных битумов, а также определить степени очистки в зависимости от количества пара и абсорбента на основе водно-щелочного раствора NaOH.

Объект: асфальтен природного битума Ашальчинского месторождения Республики Татарстан (Россия), окислитель в виде пара, величина которого варьировалась от 0,1 до 1 в зависимости от количества асфальтена.

Метод: математическое моделирование процессов газификации асфальтенов и абсорбции кислых газов при воздействии окислителя в виде пара с учетом основ химической кинетики, элементного и термогравиметрического анализов.

Результаты моделирования процессов газификации и абсорбции показали, что пар, используемый в качестве окислителя при газификации асфальтенов, оказывает существенное влияние на состав и свойства продуктов газификации, а также на очистку синтез-газа. С увеличением пара наблюдается параболическая зависимость концентраций компонентов синтез-газа, значения которых со временем уменьшаются, за исключением CO₂. Теплотворная способность синтез-газа снижается с 11,3 до 7,2 МДж/м³, а КПД газификации повышается с 53,4 до 62,5 % за счет увеличения выхода синтез-газа. По мере роста количества пара уменьшается количество абсорбента и увеличивается эффективность очистки синтез-газа от кислых газов. Таким образом, количество поглощенного CO₂ увеличивается на 20,7 % при снижении абсорбента на 6,7 %. При этом количество поглощенного H₂S выроспо на 0,39 % при снижении NaOH на 40,9 %.

Ключевые слова:

Асфальтен, газификация, синтез-газ, очистка кислых газов, NaOH.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (Гос. задание № FMEG-2021-0001).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- International Energy Agency. Global Energy Review 2021. Assessing the effects of economic recoveries on global energy demand and CO₂ emissions in 2021 // Docslide. 2021. URL: https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2021 (дата обращения 05.07.2021).
- Higman C., Van der Burgt M. Gasification. 2nd ed. Burlington, VT, USA: Gulf Professional Publishing, 2008. – 456 p.
- Kashirtsev V.A., Hein F.J. Overview of natural bitumen fields of the Siberian platform, Olenek uplift, Eastern Siberia, Russia. Heavy-oil and oil-sand petroleum systems in Alberta and beyond: AAPG Studies in Geology // The American Association of Petroleum Geologists. – 2013. – V. 64. – P. 509–529.
- 4. Kohl A.L., Nielsen R.B. Gas Purification. 5th ed. USA, Houston: Gulf Professional Publishing, 1997. – 1395 p.
- The removal of CO₂ and N₂ from natural gas: a review of conventional and emerging process technologies / T.E. Rufford, S. Smart, G.C.Y. Watson, B.F. Graham, J. Boxall, J.C. Diniz da Costa, E.F. May // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2012. – V. 94–95. – P. 123–154.
- Experimental study of a hydrophobic solvent for natural gas sweetening based on the solubility and selectivity for light hydrocarbons (CH₄, C₂H₆) and acid gases (CO₂ and H₂S) at 298–353 K / J. Tanthana, A.V. Rayer, V. Gupta, P.D. Mobley, M. Soukri, J. Zhou, M. Lail // Journal of Chemical & Engineering Data. – 2019. – V. 64 (2). – P. 545–556.
- Hedayat M., Soltanieh M., Mousavi S.A. Simultaneous separation of H₂S and CO₂ from natural gas by hollow fiber membrane contactor using mixture of alkanolamines // Journal of Membrane Science. – 2011. – V. 377. – P. 191–197.

- Hydrate-based removal of carbon dioxide and hydrogen sulphide from biogas mixtures: Experimental investigation and energy evaluations / B. Castellani, F. Rossi, M. Filipponi, A. Nicolini // Biomass and Bioenergy. – 2014. – V. 70. – P. 330–338.
- Tippayawong N., Thanompongchart P. Biogas quality upgrade by simultaneous removal of CO₂ and H₂S in packed column reactor // Energy. – 2010. – V. 35 (12). – P. 4531–4535.
- An experimental study for H₂S and CO₂ removal via caustic scrubbing system / E. Üresin, H.I. Saraç, A. Sarıoğlan, Ş. Ay, F. Akgün // Process Safety and Environmental Protection. – 2014. – V. 94. – P. 196–202.
- Simultaneous removal of gaseous NOx and SO₂ by gas-phase oxidation with ozone and wet scrubbing with sodium hydroxide / M.S. Kang, J. Shin, T.U. Yu, J. Hwang // Chemical Engineering Journal. – 2020. – V. 381 – P. 122601.
- Hydrophilic membrane contactor for improving selective removal of SO₂ by NaOH solution / P. Xu, Y. Huang, X. Kong, D. Gong, K. Fu, X. Chen, M. Qiu, Y. Fan // Separation and Purification Technolog. – 2020. – V. 250. – P. 117134.
- Wiley P.E. Reduction of hydrogen sulfide gas in a small wastewater collection system using sodium hydroxide // Water Environment Researslide – 2019. – V. 91. – P. 483–490.
- Acid gas removal in a geothermal pilot power plant via caustic scrubbing system: the case study of Castelnuovo / V. Colucci, P.H. Niknam, D. Fiaschi, L. Talluri, G. Manfrida // The 12th European Congress of Chemical Engineering. – Florence, 2019. – P. 1–3.
- Partial oxidation of phenolic wastewater using NaOH and Ni addition for hydrogen production and phenolics degradation in supercritical water / H. Zhang, R. Zhang, Z. Ling, W. Li, Y. Yan,

M. Gong, J. Ma // Separation and Purification Technology. - 2021. - V. 268. - P. 118685.

- Sustainable and negative carbon footprint solid-based NaOH technology for CO₂ capture / C. Ruiz, L. Rincón, R.R. Contreras, C. Sidney, J. Almarza // ACS Sustainable Chemistry & Engineering. – 2020. – V. 8. – P. 19003–19012.
- Fahim F., Shayegan J. CO₂ measurement of synthetic biogas by passing it through dilute NaOH solution // Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering. – 2020. – V. 39 (3). – P. 107–116.
- Investigation of the structure of concentrated NaOH aqueous solutions by combining molecular dynamics and wide angle X-ray scattering / A. Coste, A. Poulesquen, O. Diat, J.-F. Dufrêche, M. Duvail // The Journal of Physical Chemistry B. – 2019. – V. 123. – P. 5121–5130.
- CFD modeling of reactive absorption of CO₂ in aqueous NaOH in a rectangular bubble column: comparison of mass transfer and enhancement factor model / L. Junda, Z. Ping, L. Liu, C. Si, S. Yanpo, Y. Hongjie // Chemical Engineering Science. – 2020. – V. 230. – P. 116218.
- Read J., Whiteoak D. The Shell bitumen handbook. London, U.K.: Thomas Telford Publishing, 2003. – 464 p.
- Ancheyta J. Modeling and simulation of catalytic reactors for petroleum refining. – Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2011. – 528 p.
- Копылов А.Ю. Технологии подготовки и переработки сернистого углеводородного сырья на основе экстракционных процессов: дис....д-ра техн. наук. – Казань, 2010. – 396 с.
 Ermolaev D.V. The prediction of the concentrations of syngas
- Ermolaev D.V. The prediction of the concentrations of syngas components produced during non-catalytic steam gasification of bitumen // Petroleum Science and Technology. – 2018. – V. 36 (5). – P. 392–397.
- Письменко В.Т., Калюкова Е.Н. Кинетика химических реакций. Определение константы скорости и энергии активации реакций: Методические указания к лабораторной работе по физической химии. – Ульяновск: УлГТУ, 2002. – 20 с.

- Никольский Б.П., Рабинович В.А. Справочник химика. Т. 3. Химическое равновесие и кинетика свойства растворов. Электродные процессы. – М.; Л.: Химия, 1965. – 1006 с.
- Luo Y.-R. Comprehensive handbook of chemical bond energies. Boca Raton; London; New York: CRC Press, 2007. – 1688 p.
- Mingaleeva G.R., Ermolaev D.V., Galkeeva A.A. Physicochemical foundations of produced syngas during gasification process of various hydrocarbon fuels // Clean Techn Environ Policy. - 2016. - V. 18 (1). - P. 297-304.
- Investigation of biomass gasification potential in syngas production: characteristics of dried biomass gasification using steam as the gasification agent / Y. Hu, Q. Qiurong Cheng, Y. Wang, P. Guo, Z. Wang, H. Liu, A. Akbari // Energy Fuels. – 2020. – V. 34. – P. 1033–1040.
- Gasification of heavy fuel oils: a thermochemical equilibrium approach / M. Vaezi, M. Passandideh-Fard, M. Moghiman, M. Charmchi // Fuel. – 2011. – V. 90 (2). – P. 878–885.
- Ancheyta J. Modeling of processes and reactors for upgrading of heavy petroleum. – USA, Boca Raton, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2013. – V. XXIII. – 524 p.
- ГН 2.2.5.2100-06 Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны. – М.: Минздрав РФ, 2006. – 3 с.
- The Effect of flowrate and NaOH concentration to CO₂ reduction in biogas products using absorber / L. Trisnaliani, D.E. Pranata, K.A. Fatria Tahdid Ridwan, M.N. Alfarizi, M.P. Lumbantoruan // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – V. 1500. – P. 012054
- Chen L., Huang J., Yang C.-L. Absorption of H2S in NaOCI caustic aqueous solution / // Environmental Progress. – 2001. – V. 20(3). – P. 175–181.
- Insights in the development of a new method to treat H₂S and CO₂ from sour gas by alkali / R. Álvarez-Cruz, B.E. Sánchez-Flores, J. Torres-González, R. Antaño-López, F. Castañeda // Fuel. – 2012. – V. 100. – P. 173–176.

Поступила 08.04.2022 г.

Информация об авторах

Ермолаев Д.В., кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории ЭСТ Института энергетики и перспективных технологий Федерального исследовательского центра «Казанский научный центр Российской академии наук».

Даминов А.З., кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории ЭСТ Института энергетики и перспективных технологий Федерального исследовательского центра «Казанский научный центр Российской академии наук». UDC 621.311.001.57

OPTIMIZATION OF OPERATIONAL CONTROL OF AUTONOMOUS PHOTO-DIESEL POWER SUPPLY SYSTEM WITH DC BUS

Boris V. Lukutin¹,

lukutin48@mail.ru

Dmitry I. Muravyev¹,

dim15@tpu.ru

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

The relevance. An increase in the contribution of renewable energy sources to the generation of the autonomous hybrid energy industry is important in order to reduce the environmental impact of diesel generator plants and decrease operating costs in the production of electrical energy in smart microgrids with distributed generation, including so-called «green» generation. This issue has the highest relevance for cell towers of mobile communication, rotational residential camps, meteorological stations and other remote consumers, the rated capacity of which is tens to hundreds of kW.

Objective: the development of computer models for optimizing the management of the operational staff and modes of an autonomous photo-diesel power supply system with a DC bus, so as to make it possible to minimize the operating time of a diesel generator plant by increasing the contribution of the photovoltaic plant at optimal technical and economic indicators. The use of a DC bus for the electricity integration from distributed energy sources is considered promising in reducing the number of hours of inefficient operation of a diesel generator plant, which will make it possible to save diesel fuel and extend the life expectancy of the diesel generator.

Novelty. This work expands the known options for modeling and optimizing the modes of a standalone hybrid DC power plant in terms of using an objective function with appropriate restrictions, adapting models of power equipment for the intended purposes of modeling, presenting the structure of a feasibility study based on commercially available characteristics of the elements of the power supply system.

Methods. The study entails the development of computer models of the intelligent control architecture of a standalone hybrid power plant including a photovoltaic plant, a diesel generator plant, an electric energy storage system, a remote consumer, as well as auxiliary converter devices. Modeling of control processes is implemented in the Stateflow library, as well as by using the language syntax of the Matlab high-level package, the capabilities of which are acceptable for the intended purposes.

Results. The analysis of the results shows that DC PV-diesel power supply systems can be cost-effective in all scenarios that include different types of batteries while for systems without power storage, DC distribution is often not cost-effective. The results will be of interest to specialists developing or operating standalone power supply systems and organizations planning to upgrade existing diesel power plants.

Key words:

Solar energy, renewable energy, northern territories, photovoltaics, microgrid energy efficiency.

Introduction

The natural increase in demand for electricity, as well as the forecast depletion of fossil fuels, are causing active discussions among countries that are the leaders of the energy sector: the use of traditional hydrocarbon energy sources has led to a significant increase in the level of carbonization of the air. Today, it is the growth of the carbon footprint that is the main cause of global warming [1-3]. The concentration of carbon dioxide in the atmosphere has increased by about 40 % since the beginning of the industrial revolution [4]. Today it is feasible to improve the ecological situation by the reintroduction of renewable energy sources (RES). The contribution of RES has been increasing in recent years: by the end of 2019, 30 % of the world's electricity had been produced from RES (Fig. 1) [5]. Renewable energy sources such as solar, wind, hydropower, geothermal energy and biomass, as the name suggests, are easily renewable and relatively eco-friendly.

It has been proven that RES can be effectively and rationally used in microgrid solutions due to some technical and economic advantages. A microgrid is a localized energy system that involves distributed generation, including renewable energy sources, electric energy storage devices, loads, a power plant and energy consumption control system, communications, etc. World total electricity generation: 26 936 TWh



Fig. 1. Energy balance of world electricity production, end of 2019 [5]



This is a small power system that can operate independently or in conjunction with centralized networks. The microgrid is capable of disconnecting from the centralized network and working autonomously in case of critical situations: lightning strikes, storms, planned and unplanned power outages, fallen trees, earthquakes, interactions with animals, earthworks, etc. It is RES technologies that are used as the most appropriate in terms of ensuring an autonomous mode of operation of microgrids that produce environmentally friendly electricity.

An urgent problem of today's research is to increase the contribution of RES, in particular photovoltaic (PV) systems, to the overall energy balance of the microgrid. Attention to photoenergy is explained by a steady trend towards improving its technical and economic characteristics. It is this trend that has shaped the relevance of this work: to optimize the microgrid with photo-diesel generation according to economic and environmental criteria.

Today, a common way to reduce the operating costs of diesel AC power supply systems is the integration of solar power plants with grid inverters, partially replacing the generation of diesel generator (DG) plants [6-8]. A disadvantage of such systems is the limitation of the generation capacity of the solar power plant relative to the power of the DG in terms of the condition of the stability of the solar power plant grid inverter in the local diesel network. It is possible to eliminate this disadvantage by building photodiesel power plants (PDPP) on direct current at optimal rated capacities of power equipment controlled by an intelligent control system. The choice of rational control algorithms is of decisive importance: it sets the direction of energy flows in the system components and determines the priority of functioning of each energy source [9].

The authors analyzed some of the literature. In particular, B.K. Das et al. [10] presented a genetic algorithm (GA) for the formation of costs of energy (COE), of CO_2 emissions and waste heat from a standalone hybrid power plant (SHPP). SHPP includes a PV system, an electric energy storage system (EES), a DG and gas turbines. In another study, I.R. Cristóbal-Monreal and R. Dufo-López [11] analyzed the impact of RES on the microgrid, which consists of an EES, DG and PV system, also using GA. Their innovation was to take into account the monthly ambient temperature, as well as the average solar radiation. W-W. Kim et al. [12] presented the optimal structure of the EES, taking into account the reliability and economy for the microgrid. Battery state of charge (SOC) was taken in the work as a parameter of the influence of the entire EES on the reliability of the power system. P. Cicilio et al. [13] presented a set of tools for microgrid performance design and planning, as well as the optimization of system size for power generation based on statistical load estimates. B. Li et al. [14] proposed a method for energy flow control and sizing for an autonomous system that includes PV, fuel cells (FC), and EES. The goal of the work was achieved using linear integer linear programming and constraint-based GA. B. Zhao et al. [15] proposed a method for determining the size of important components of an autonomous system, such as a solar power plant, a wind power plant (WPP), an EES, and a DG. The multi-objective function took into account the following key performance indicators: greenhouse gas emissions, construction costs, and renewable energy production.

Thus, the correct energy control strategy, the optimal value of the rated capacity of energy sources can increase

the stability of the energy system, ensure the reliability of power supply, minimize electricity costs and increase the contribution of renewable energy. Depending on the system configuration and optimization goals, different energy management strategies are implemented based on different technical and economic criteria. These strategies can vary in complexity, requiring the use of different optimization algorithms [16].

Application options of PV DC power supply systems in the Russian Federation

In Russia, autonomous generation is a practical option for remote consumers to access to electricity. Autonomous power supply systems are the most widely used to provide electrical energy to the following groups of consumers: individual consumers of small rated capacity from units to tens of kW: cottages and country houses, weather stations, cell towers, field facilities and expeditions, farms, border, radar and navigation posts. This also concerns domestic power consumer groups of rated capacity from tens to hundreds of kW: individual large residential buildings and districts, various social facilities, villages, and low-rise settlements.

The objective, i. e. saving on maintenance, construction of power lines, roads and fuel delivery services, has long been technically and economically justified for such systems running on diesel generator plants. However, at the current exchange rates, the cost of energy generated from small-scale generation sources operating on fossil fuels is at least 0,40-0,50 \$ per kWh. For this reason, increasing energy efficiency and the use of renewable energy are becoming extremely attractive. The scale of renewable energy use in Russia is still lagging behind that in Europe or Asia, but the trend towards expansion is noticeable. According to [17], more than 50 billion rubles is spent annually from the federal budget to subsidize electricity tariffs in remote regions. Taking into account the goals of the Russian energy strategy until 2035, it is necessary to create premises for an increase in the share of renewable energy: to achieve up to 3,7 % of the share of RES in the total volume of commissioned power plants, up to 2,2 % in the production of electricity from RES, and subsequently, the replacement of local diesel generation. Consideration of DC systems may contribute to the achievement of these indicators.

DC photo-diesel power plants can be used for the consumer groups described above. The experience of Alaska, Norway, and the Arctic part of Canada proves the costeffectiveness of such solutions [18–20]. According to the authors, the implementation of such projects will significantly reduce the fuel delivery expenses of the budget. To ensure high reliability of the supply to autonomous consumers, the system contains a guaranteed power source: a diesel or gasoline generator. The authors propose a block diagram for constructing a DC photo-diesel power plant (DC PDPP), which is advisable to use for low-power power supply systems; it is shown in Fig. 2. In this design of the PDPP with a DC bus, the sources are connected through their own converters to the DC bus. The EES is connected to the same bus through a bi-directional DC/DC converter. The alternating current bus (AC bus) is

used to connect the load to it. If there is a sufficient energy reserve in the EES, the load is powered by the PV plant through an autonomous voltage inverter. When the residual capacity of the EES drops below the allowable limit (the SOC indicator is monitored), the control system generates a control signal to turn on the generator, which provides electricity to consumers, and the EES switches to the charge mode.



Fig. 2. Scheme of a photodiesel power supply system of small capacity



The authors propose analyzing and suggesting an upgrade of such a microgrid for a non-industrial consumer, the village of Kmovaara, the Republic of Karelia, Russia (63°39' N, 31°30' E). The consumer consists of low-rise buildings, and the village is supplied with electricity around the clock. A feature of this consumer is that the existing diesel-electric plant consists of four DGs with a total capacity of 138 kW. At the same time, only one DG [21] with a rated capacity of 32 kW is in constant operation while the rest perform the function of a reserve. It is not difficult to conclude that all the unused DGs increase the rated capacity of the DPP, which leads to a significant decrease in the rated capacity utilization factor and an increase in the cost of the equipment.

Methodology for optimizing DC PDPP in Matlab

In this article, the authors use the regular integer linear programming solver of the Matlab software package, intlinprog. The official website of MathWorks provides help on this function [22]. The unique features of the solver are the simplicity of the call syntax, relatively low computational time. This meets all the necessary requirements for solving the problem of optimizing the composition of the DC PDPP. Below are the input parameters of the solver in general form:

$$\min_{x} f^{T}x \text{ subject to} \begin{cases} x(\operatorname{int} con) \ are \ \operatorname{int} egers \\ A \cdot x \le b \qquad (1) \\ Aeq \cdot x = beq \\ lb \le x \le ub \end{cases}$$

The intlinprog function (1) includes a system of constraints that contains variables that must be declared before the solver is called: x is the vector of the variables to be solved for, i. e. the solver is able to optimize the function in regard to several variables; *intcon* is a vector that determines which of the variables to solve for must be integers. This is followed by various kinds of restrictions: since the required variables are a vector, the parameters Aand Aeq are matrices, because for each of the unknowns there may be more than one restriction; *lb*, *ub* are the lower and upper limits for the vector of the unknown variables. The main condition for the operation of the program code is the fulfillment of the power balance.

The optimization process is carried out for each average day of each season, i. e. 4 times. It is first necessary to calculate the energy generated by the photovoltaic module in each case. This process will be presented below. Further below is a code fragment of the program that calls the solver:

lb = [0,0]; ub = [N_pv,W_dg]; x_all = zeros(1,2); fval_all = zeros(1,1); for i = 1:4 f_on_i_step=f(i,[1,2]); A_on_i_step=Aeq(i,[1,2]); b_on_i_step=beq(i); [x,fval]=intlinprog(f_on_i_step,intcon,[],[] ,A_on_i_step,b_on_i_step,lb,ub,options); x_all(i,[1,2]) = x; fval_all(i) = fval;

end

The intlinprog function is used to optimize the objective function of the total cost of building and operating the system. This approach makes it possible to distribute the generated power among the components of the power system as a basis for maximizing the technical and economic advantages of DC technology. Below there is the objective minimization function (2):

$$f(x) = n_1 C_{spec}^{PV} W_{PV} + n_2 C_{spec}^{DG} W_{DG} + n_3 C_{spec}^{EES} W_{EES}, \quad (2)$$

where W_{PV} , W_{DG} , and W_{EES} are the actual annual electricity generation by each generating source, as well as the amount of energy stored in the EES; C_{spec}^{PV} , C_{spec}^{DG} , C_{spec}^{EES} are the specific costs for the generation of 1 kWh by each generating source; n_1 , n_2 , n_3 are the vectors of required variables: the optimal number of photovoltaic modules, part of the energy taken from the DG, the optimal number of EES monoblocks, respectively. The system of restrictions for the objective function (3) is presented below:

$$\begin{cases} n_{1}, n_{2}, n_{3} \ge 0; \\ n_{1} \le n_{\max}^{PV}; \\ n_{2} \le W_{DG}; \\ n_{1}W_{PV} + n_{2}W_{DG} + n_{3}W_{EES} = W_{load}. \end{cases}$$
(3)

As initial data, we use the nominal data of the equipment, insolation values in the area of the power supply facility, ambient temperature, the calculated data on the orientation of the photovoltaic module in space, as well as the proposed options for the location of the photovoltaic power station. Based on these data, the actual annual electricity generation from one photovoltaic module is determined. Next, the unit costs per unit of generated electricity are calculated for the resulting annual output. By minimizing the objective cost function (2), we determine the optimal number of reference photovoltaic modules for each season, the expected use of energy from the DG, and the number of EES monoblocks.

W_sum_pv_y = 0; for i = 1:4 W_sum_pv_s = 0; for j = 1:24 W_pv = KPD_pv * S_pv * Insol(i,j); W_sum_pv_s = W_sum_pv_s + W_pv; end if W_sum_pv_s > P_nom_pv / 1000 W_sum_pv_s = P_nom_pv / 1000; end W_sum_pv_s = W_sum_pv_s * 90; W_sum_pv_y = W_sum_pv_y + W_sum_pv_s; end

In the presented fragment of the program code, the calculation is carried out according to the principle of summing the energy generated by each PV module for each hour of the average day of each season. Two nested for loops are declared. They change the season and the average day, respectively. Throughout the program code, the variable *i* means the number of the season (the first season is summer), the variable *j* means the current hour. The code provides for the limitation of electricity generation by one photovoltaic module, based on its maximum (nominal) power. In this regard, every hour we check whether the generated hourly energy exceeds the limit set in the source data (the variable $W_{sum_pv_s}$). If the limit is not exceeded, then the hourly energy is calculated according to a linear functional dependence; otherwise, it is limited by the maximum (nominal) power. Next, the volume of electricity for each season is calculated by evaluating daily – not hourly – energy by 90 days.

After determining the actual annual energy, it is necessary to calculate its cost and the profitability of using certain sources compared to others. The authors conclude that today the dependences of the cost of rated capacity units of PV plant equipment on their nominal rated capacities are close to linear; therefore, the optimization results are flexible and the recommended number of reference elements can be replaced by a proportional number of elements with other rated capacities. However, this statement is hardly applicable to EES; therefore, it is necessary to provide for a more accurate, hourly calculation of the energy deficit/surplus and determine the number of references EES monoblocks recommended for installation. For a PV electric system, the costs are calculated approximately, taking into account only the main components. The yearly maintenance costs of a photovoltaic module are determined and the resulting annual costs (4) are divided by each kWh of electricity generated per season.

$$C_{spec}^{PV} = \frac{Price^{PV}}{LT_{PV} \cdot W_{sum - PV - V}},$$
(4)

where $Price^{PV}$ is the price of one photovoltaic module; LT_{PV} is the nominal service life. Accounting for the cost of operating a DG (5) consists of two components: the cost of the apparatus and the cost of fuel. Fuel consumption is given at the average load factor (Load_factor2) of the average day of each season:

$$C_{spec}^{DG} = \frac{Fuel_cost}{Load_factor2 \cdot P_{nom_DG}} + \frac{\operatorname{Price}^{DG}}{Load_factor2 \cdot P_{nom_DG} \cdot 8760 \cdot LT_{DG}},$$
(5)

where *Fuel_cost* is the cost of fuel; $Price^{DG}$ is the price of a DG; LT_{DG} is its service life.

The main criterion of cost-effectiveness is the cost of 1 kWh of electricity (6). This criterion is determined based on the following expression:

$$COE = \frac{\frac{1}{T} \cdot K + C}{P_{rated}},$$
(6)

where P_{rated} is the rated capacity of the power supply facility (kW); *K* is the total investment in the power plant, \$; *T* is the economic service life of the equipment, years; *C* is the total annual operating costs, \$.

By this time, the number of photovoltaic modules has been determined, as well as the predicted use of DG power. Since weather conditions are predictable only statistically and pre-calculated RES capacities are not always available, it is impossible to specify the exact number of batteries necessary and sufficient for the uninterrupted power supply to the load. To guarantee the supply to the load during periods when it is impossible to generate sufficient energy from RES, for example, in winter, or in case of emergency situations, the following method is proposed for determining the number of batteries in the EES.

Nb=zeros(1,4); Cost_b1=zeros(1,4); Cost_b2=zeros(1,4); for i = 1:4 Wb=0; for j = 1:24 if Del(i,j) < 0 Wb = Wb + Del(i,j); end end Nb(i) = round(-Wb / P_b1); Cost_b1(i)=round(Nb(i) * Price_b1 / LT_b1 / 365); Cost_b2(i)=round(Nb(i) * Price_b2 / LT_b2 / 365); end

The unbalance matrix Del(i,j) was preliminarily formed: the energy deficit or surplus was determined hourly for each average day of the season. Next, the available total hourly energy of all photovoltaic modules is determined (the process is similar to the annual output of photovoltaic modules that were presented above), then the energy required by the load at a given hour is subtracted from the obtained value. It is necessary to exclude any energy surplus from the resulting matrix and analyze only scarce hours. After the minimization of the cost function, the estimated use of DG power will be indicated for each average day; therefore, it is necessary to mitigate the most scarce hours with this energy. When all the estimated energy of the DG has been used, the remaining total energy deficit for the day is calculated. This amount of energy should be covered by EES monoblocks.

The authors propose considering two types of storage technologies that have become frequently used in solar power plants: lithium iron phosphate batteries (LiFePO₄, LFP) and armored subclass of batteries (OPzS). These technologies meet the requirements of PV power plants: high cycling (number of sustained charge/discharge cycles), low self-discharge, a wide operating temperature range, minimal maintenance, and the acceptability of deep discharge (up to 80 %). Such technologies have a significant resource for cyclic operation in summer, as well as a good

potential for a predominantly buffer operation in winter. The authors compare these technologies and give their recommendations for their use as part of DC PDPP.

Results and discussion

Case A. The technical indicators of the Kimovaara power supply system without upgrading to DC PDPP are shown in Fig. 3. An autonomous power supply system based on a DG operates at extremely high consumption of diesel fuel per 1 kWh, a significant level of anthropogenic impact on the environment, as well as an unsatisfactory net capacity factor (NCF) of the DG. The generator is operated in such modes in accordance with the energy consumption schedule, with a life expectancy of more than 3000 hours. A detailed analysis of the system is presented below.



Рис. 3. Показатели системы электроснабжения п. Кимоваара для летних и зимних суток (Matlab)

The dependence of the inefficient use of the electricity generated from the DG, as well as the indicator of electricity demand for a specific hour (W_load_sum, W_load_wint), are shown on the time scale of the average summer and winter days (NCF). The DG in operation does not provide the desired load in the range between 30 (bottom limit) and 85 % of the rated load (the LF indicator). Most of the time, both seasons are characterized by low consumption, which significantly increases the fuel consumption rate, which averages 0,42 kg/kWh. An additional negative effect is manifested in the form of a carbonization caused by the accumulation of unburned fuel fractions in the cylinders, which, in its turn, adversely affects the engine life of the diesel engine (7).

 Table 1.
 Emission costs and emission factors

 Таблица 1.
 Стоимость и наименование выбросов

Emission factor	Costs per 1-ton emissions, \$/t
Наименование	Стоимость выброса компонента
выброса	за 1 т, \$/t
CO ₂	1,45
NO _x	1,87
SO_2	0,61

Table 1 shows the cost of emissions of pollutants in accordance with Russian legislation, where the Kimovaara DG produces 2,35 tons of emissions of air pollutants per year.

This number is determined based on the following expression:

$$W_{e_i} = \frac{g_{e_i} G_m}{1000},$$
 (7)

 g_{e_i} is the specific mass emission of the *i*-th substance per 1 kg of diesel fuel; G_m is the DG fuel consumption per year.

The graphs in Fig. 3 do not show significant fluctuations between summer and winter consumption. Most of the energy is consumed by 120 local residents for electric heating. In summer, there is a clear difference between morning and evening with insignificant fluctuation. The peak of energy production is 13 kWh (6:00 PM – 7:00 PM) in summer and 18 kWh (8:00 PM – 9:00 PM) in winter. The base load on the system is 9 kW with 90 % accuracy.

 Table 2.
 Parameters of the diesel generator AKSA AJD 45 [21]

 Таблица 2.
 Параметры дизель-генератора AKSA AJD 45 [21]

AKSA	Parameter	Value
AJD 45	Параметр	Значение
	Maximum power Maксимальная мощность Output voltage Выходное напряжение Fuel cons. prime with 75 % load Расход топлива при 75 % нагрузке Price/Цена Life cvcle/Срок службы	32 kW/кВт 380/400 V (AC)/B (AC) 7,5 lt/hr/л/ч 11 700 \$ 10 vears/лет

The technical parameters of DG of interest are collated and presented in Table 2. The operation of one DG with a capital cost of about \$18,000 also entails maintenance costs of about \$2,000 per year, where most of the operating costs are the cost of diesel fuel and its delivery, which in its turn costs \$21,980 per year. These economic indicators formed a high cost of electricity generated for the autonomous consumer, 0,48 \$/kWh. The cost of fuel, which accounts for the largest share of total costs, can be reduced with the use of a DC PDPP. Partially, this is confirmed by the fact that the operating costs of the DG are a function of the power demand, which is clearly seen in dependence (5), because there is no other generating source that could satisfy the load requirements.

The authors emphasize that the configuration of an autonomous DG is unjustified, primarily from an environmental and economic point of view, due to its high fuel consumption, any hikes in the cost of which significantly affects the total costs. However, due to the results obtained from other studies [23, 24], in the conditions of continuous operation in the specified DG modes, it may seem worth considering alternative designs of invertertype DGs in AC systems.

Case B. The results of the system analysis using the intlinprog solver made it possible to develop various energy management strategies for the classic seasons in terms of power consumption: summer and winter. These strategies are also applicable to the transitional seasons of the year (spring, autumn), in which pronounced fluctuations in insolation, ambient temperature, and load are observed. Of course, for the transitional seasons, alternative regimes should be provided for the priority of the operation of generating sources. Based on the solution of the program, it follows that the most economically justified season of «delay» for the design of a DC PDPP is summer. However, the use of only the PV plant-EES combination as the cheapest and most efficient is not always possible, as there are a number of limitations, for example, the inability of the municipality of the power supply facility to allocate several hundred square meters, and sometimes even kilometers, for photovoltaic modules. The code of the program takes into account this nuance, which limits the stationing area of photovoltaic modules in current case study to 210 m².



Fig. 4. Indicators of a DC PV-alesel power supply system for a summer day in Matlab **Puc. 4.** Показатели фотодизельной системы электроснабжения постоянного тока для летних суток в Matlab

Technical indicators for the average summer day of the power supply system after upgrading to a PDPP on direct current are shown in Fig. 4. The PV energy varies depending on the amount of incoming solar radiation (*W_pv*). In the absence of PV energy, the exchange energy of the EES discharge follows the change in the level of power consumption (*W_discharge*). The voltage on the DC bus remains constant despite the PV plant changes during the period from 07:00 AM to 4:00 PM, the PV plant generates more power than it is required by the load. To determine the excess in the program code, the standard Matlab function *trapz* (x,y) was used, which returns in numerical form the area of the trapezoid between the PV_output and W_load functions. In doing so, based on results for the summer season, the Matlab intlinprog solver offers 165 photovoltaic modules as the minimum in terms of solving the objective cost function (2). The Matlab *trapz* (x,y) function has determined 147 kWh of electrical energy for 10 hours of excess generation for the accumulation in the EES. The number of hours of autonomous power supply from the EES is determined by the requirements of the consumer, and in most cases is between 6 and 24 hours. Fig. 4 shows that during this time the SOC indicator increases, remaining within the operating limits of the optimal operation of the cyclic mode, from 20 to 95 %.

It should be noted that the proposed SOC change graph in Fig. 4 is an iteratively tested result of supplying during three successive average summer days, starting with a fully charged EES. Thus, the capacity of the EES is enough to ensure the same operation mode for the next summer day, even with an initial charge level of 47,5 %, provided that the outcome is unfavorable in terms of the level of solar radiation, as well as the ambient temperature. The NCF indicator was calculated taking into account the joint work of the generation of the PV plant and the charge/discharge of the EES. The NCF varies from 16 to 24 % over time, taking into account the correction for the efficiency of the charge/discharge of the EES, as well as the efficiency of the DC/DC converter devices. The technical indicators of the photovoltaic module are presented in Table 3.

 Table 3.
 Parameters of the monocrystalline solar module SilaSolar 200W

Таблица 3. Параметры монокристаллического солнечного модуля SilaSolar 200W

SilaSolar	Parameter	Value
200W	Параметр	Значение
	Maximum power Максимальная мощность Optimum operating voltage	200 W/BT
	Оптимальное рабочее напряжение Efficiency of solar module	36,7 V/B
	КПД солнечного модуля	17,2 %
	Temperature range Температурный диапазон	-40 +85 ℃
	Solar module area/Площадь модуля	1,28 m ² /м ²
	Degradation factor per year	0.5.4
	Фактор деградации за год	0,6 %
	Price/Цена	120 \$
	Life cycle/Срок службы	30 years/лет

The constant and noticeable reduction in prices for renewable energy generating equipment has led to the fact that batteries are becoming the most expensive element of the energy complex. In addition, batteries, with their relatively short lifespan, are expendable in practice. It is necessary to pay special attention to the choice of batteries for the project, as well as their subsequent correct operation. Typically, in the documentation for batteries, manufacturers indicate the service life in buffer mode and under ideal operating conditions (temperature 20 °C, rare shallow discharges, constant optimal charge). Even in a system with a backup, it is difficult to provide such conditions; in an autonomous system, batteries operate in the most difficult cyclic mode, charge/discharge.

Table 4 shows the main technical and economic indicators of two types of batteries: LFP and OPzS, a comparison of which should help to make quality recommendations for EES use for various consumer groups. A wide range of batteries on the market allows choosing the right ones for a particular consumer, taking into account their territorial, temperature, and regime features.

Table 4.Comparison of batteries for DC PV-diesel pow-
er supply system [25]

Таблица 4. Сравнение аккумуляторов для фотодизельной системы электроснабжения постоянного тока [25]

Parameter/Параметр	LiFePO ₄	OPzS
Nominal voltage		
Номинальное напряжение	3,22 V/B	2,0 V/B
Usable capacity/Рабочая ёмкость	90 %	80 %
Efficiency of battery/КПД батареи	92 %	88 %
Operating temperature range		
Диапазон рабочих температур	0+45 °C	−20…+50 °C
Cost/Стоимость	65	34
Lifespan (stand-alone)		
Срок службы (автономный)	\$/kWh/кВт·ч	\$/kWh/кВт·ч
Lifespan (floating)	20 years/лет	12 years/лет
Срок службы (буферный)	30 years/лет	17 years/лет
Number of cycles (DoD=80 %)	5000	1500
Количество циклов (DoD=80 %)		
Environmental friendliness	High	Medium
Экологичность технологии	Высокая	Средняя
Cost of operating and maintenance	Not required	18
Стоимость обслуживания и ремонта	Не требуется	\$/year/\$/год

The test results show that the energy management strategy to minimize the operation of the DG is working correctly. It should be concluded that all components of the system work correctly, namely, the load schedule is fully supplied with energy, the EES unit switches as it discharges/charges in accordance with the developed operation logic. Let us consider the case where during the hours of shortage of energy stored in the EES and the energy of the FES, the DG should be started (autumn). In such cases, the DG is operated in such a way as to generate a power deficit if the exchange energy of the PV and EES do not meet the load requirements.

According to the results shown in Fig. 5, electricity generation from the DG is inefficient: the DG plans to cover the load demand in the morning hours from 03:00 AM to 08:00 AM, where the average 6-hour NCF is 8 %, the DG load factor (CSF_dg) will be 21 % on average. From 08:00 AM to 11:00 PM, the DG is completely disa-

bled due to generation from the PV plant-EES combination. During this time, the power generated by the PV can satisfy the load demand, while the excess electrical energy is used to charge the EES. The charge capacity of the EES will be enough to ensure the same operation mode for the next autumn day, even with an initial charge level of 35,7 %, provided that the outcome is unfavorable in terms of the level of solar radiation, as well as the ambient temperature. Taking into account the obtained data, it is recommended that the option of installing two diesel generator units with a lower nominal value be considered. These will operate simultaneously during the seasons with maximum load consumption (winter) while using the diesel generator resource more efficiently. To model the mode of PDPP operation on a winter day, the input data were also changed. The performance of the PDPP system at a low level of PV power generation is shown in Fig. 6. The PV power generation is less than the required load from 09:00 AM to 03:00 PM. Based on the input parameters and operating conditions of the control logic of the central controller, the system responds to the implementation of the mode of using the EES to equalize the load curves of the DG, participating in peak coverage. Until 09:00 AM, the DG provides the load in full. The EES is in the state of running in the discharge mode at times of the peak voltage drop on the DC bus.



Fig. 5. Indicators of a DC PV-diesel power supply system for an autumn day in Matlab Puc. 5. Показатели фотодизельной системы электроснабжения постоянного тока для осенних суток в Matlab



Fig. 6. Indicators of a DC PV-diesel power supply system for a winter day in Matlab Puc. 6. Показатели фотодизельной системы электроснабжения постоянного тока для зимних суток в Matlab

Fig. 6 shows the EES and DG performance during their joint operation. After the morning and evening peaks, it can be seen that the EES-PV plant combination receives sufficient charging power to supply the next day (parameter SOC). However, the current command generated by the power controller performs a fast recuperation of the load power without optimizing the optimal load of the DG. This condition can be achieved by discharging the battery by supplying a proportional current according to the characteristics of the DC/DC converter. In this case, it is necessary to consider a rectifier DG with a controlled converter link.

The graphs in Fig. 6 show that the developed exchange energy management and control system is acceptably operable in the absence of sufficient electricity generation from renewable sources. A smooth transition between the charge and discharge states is also observed under different input conditions.

Conclusions

In this research paper, the authors explored the cost, technical and environmental benefits that can be gained from upgrading a standalone power system to a DC PV-diesel power supply system. The initial data of the analysis are the latitude of the area, the atmospheric transparency index, the albedo of the earth's surface, the number of the day of the year, the azimuthal and vertical angles of installation of photovoltaic panels, the average daily air temperature, the technical characteristics of the PV plant, as well as the characteristics of the EES and DG. The studies were carried out using the Matlab software package. Original code for optimizing the composition of a DC PV-diesel power supply system was developed.

The simulation results showed that the program code makes it possible to justify the choice of the optimal operating mode of the power plant, the required capacity of storage devices, rated capacity and rated voltage of the photovoltaic panels. It also helps determine effective algorithms for managing the energy complex. Various combinations of accumulators as part of a DC PDPP are considered. Thus, a decrease in the level of fuel consump-

REFERENCES

- Mehrpooya M., Mohammadi M., Ahmadi E. Techno-economicenvironmental study of hybrid power supply system: A case study in Iran. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2018, vol. 25, pp. 1–10. Available at: https://doi.org/10.1016/ j.seta.2017.10.007 (accessed 18 March 2022).
- Energy Profile. Russian Federation. Available at: https://www.irena.org/europe (accessed 18 March 2022).
- Makarov A.A., Grigorev L.M., Mitrova T.A., Ivashchenko A.S., Kurdin A.A., Kozina E.O., Grushevenko D.A., Melnikova S.I., Kulagin V.A., Filippov S.P. Prognoz razvitiya energetiki mira i Rossii do 2040 goda [Forecast of development of energy in the World and Russia until 2040]. Moscow, The Energy Research Institute of the Russian Academy of Sciences Publ., 2013. 110 p.
- World Energy Transitions Outlook: 1,5 °C Pathway. Available at: https://irena.org/publications/2021/Jun/World-Energy-Transitions-Outlook (accessed 18 March 2022).
- Global electricity generation mix, 2010–2020. Available at: https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-electricitygeneration-mix-2010-2020 (accessed 18 March 2022).
- Opiyo N.N. Droop control methods for PV-based mini grids with different line resistances and impedances. *Smart Grid and Renewable Energy*, 2018, vol. 9 (6), pp. 101–112. DOI: 10.4236/sgre.2018.96007.

tion entails a decrease in the economically justified tariff for electricity from 0,48 to 0,43 \$/kWh with LFP batteries, and to 0,39 \$/kWh with OPzS batteries considering stepup converters. The level of carbonization of air from a DG is reduced from 2,35 to 1,9 tons per year. However, the practical implementation of a certain type of battery requires further comprehensive research on a wide range of issues, in particular, the development of hybrid intelligent systems, for example, for cell towers, which differ significantly in terms of energy consumption. Of note that the difference in the frequency of maintenance of this kind of power supply systems, where more cycles is beneficial (LFP batteries), increases the cost of the system and worsens the economic performance indicators.

Based on the foregoing, it can be concluded that the DC PDPP architecture is more economical and less hazardous to the environment, compared to other options, such as AC DGs. It is essential to highlight a piece of information that economical calculations did not include accompanying components of PV: fastening structures, connecting cables, installation and commissioning. For the EES was not included racks, battery management system etc. However, the results clearly demonstrate that environmental friendliness, technical and economic efficiency are achievable through the use of renewable energy. Although it is worth noting that the use of DGs only makes practical sense as the most economical solution at the initial stage of investment in the short term. In addition, a feature of these results is the transferability of the developed code to other packages for embedding, for example, MS Excel, Python, etc. Future research by the authors may also be combined and compared with the results of this article. Thus, in order to study the technical, economic and environmental consequences of the integration of other renewable energy sources into autonomous systems, it is deemed promising to conduct studies, according to the proposed methodology, of autonomous power supply systems from wind farm stations, fuel cells, and other energy sources.

- Vallve X., Serrasolses J. Design and operation of a 50 kWp PV rural electrification project for remote sites in Spain. *Solar Energy*, 1997, vol. 59 (1–3), pp. 111–119. Available at: https://doi.org/10.1016/S0038-092X(96)00124-7 (accessed 18 March 2022).
- Rossiya prisoedinilas k Parizhskomu soglasheniyu po klimatu. Chto eto znachit? [Russia joined the Paris agreement on climate. What does it mean?]. Available at: https://zen.yandex.ru/ media/info24/rossiia-prisoedinilas-k-parijskomu-soglasheniiu-poklimatu-chto-eto-znachit-5d89f261a3f6e400ad100205?utm_ source=serp (accessed 18 March 2022).
- Cheng L., Wang W., Wei S., Lin H., Jia Z. An improved energy management strategy for hybrid energy storage system in light rail vehicles. *Energies*, 2018, vol. 11, 423. Available at: https://doi.org/10.3390/en11020423 (accessed 18 March 2022).
- Das B.K., Al-Abdeli Y.M., Kothapalli G. Optimization of standalone hybrid energy systems supplemented by combustionbased prime movers. *Applied Energy*, 2017, vol. 196, pp. 18–33. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.03.119.
- Cristóbal-Monreal I.R., Dufo-López R. Optimization of photovoltaic-diesel-battery standalone systems minimizing system weight. *Energy Conversion and Management*, 2016, vol. 119, pp. 279–288. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.04.050.
- 12. Kim W-W., Shin J-S., Kim S-Y., Kim J-O. Operation scheduling for an energy storage system considering reliability and aging. *En*-

ergy, 2017, vol. 141, pp. 389–397. Available at: https://doi.org/ 10.1016/j.energy.2017.09.091 (accessed 18 March 2022).

- Cicilio P., Orosz M., Mueller A., Costilla-Sanchez E. uGrid: reliable minigrid design and planning toolset for rural electrification. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, vol. 163988–163999. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2952896.
- Li B., Roche R., Paire D., Miraoui A. Sizing of a standalone microgrid considering electric power, cooling/heating, hydrogen loads and hydrogen storage degradation. *Applied Energy*, 2017, vol. 205, pp. 1244–1259. Available at: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.08.142 (accessed 18 March 2022).
- Zhao B., Zhang X., Li P., Wang K., Xue M., Wang C. Optimal sizing, operating strategy and operational experience of a standalone microgrid on Dongfushan Island. *Applied Energy*, 2014, vol. 113, pp. 1656–1666. Available at: https://doi.org/10.1016/ j.apenergy.2013.09.015 (accessed 18 March 2022).
- Zambrana M.N.F.V. System design and analysis of a renewable energy source powered microgrid. M.Sc. Thesis. MD, USA, 2018.
 92 p. Available at: https://doi.org/10.13016/M2F47GX8G (accessed 18 March 2022).
- Grigorev L. Energosnabzhenie izolirovannykh territorii [Energy supply of isolated territories]. Moscow, Analytical Center for the Government of the Russian Federation Publ., 2017. Vol. 51, 28 p.
- Javad Mirazimi S., Fathi M. Analysis of hybrid wind/fuel cell /battery/ diesel energy system under Alaska condition. The 8th Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI) Association of Thailand. Conference 2011. Khon Kaen, 2011. pp. 917–920. DOI: 10.1109/ECTICON.2011.5947990.
- Clara G. Solar energy for residential electric vehicle charging in Northern Norway – a feasibility study. *Solar Integration Workshop 2018*. Stockholm, 2018. pp. 1–7.

- Das I., Cañizares C.A. Renewable energy integration in dieselbased microgrids at the Canadian Arctic. *Proceedings of the IEEE*, 2019, vol. 107, no. 9, pp. 1838–1856. DOI: 10.1109/JPROC.2019.2932743.
- AKSA Power Generation. Available at: https://aksaeurope.com/enus/product-detail/9 (accessed 18 March 2022).
- MathWorks. intlinprog. Available at: https://www.mathworks. com/help/optim/ug/intlinprog.html (accessed 18 March 2022).
- Obukhov S., Plotnikov I., Surkov M., Sumarokova L. Development of the structural and functional design of the laboratory bench for experimental research diesel generator sets on variable speed. *The Fourth International Youth Forum. Smart Grids 2016:* MATEC Web of Conferences. Tomsk, 2017, vol. 91. Available at: https://doi.org/10.1051/matecconf/20179101036 (accessed 18 March 2022).
- Obukhov S.G., Plotnikov I.A., Masolov V.G. Method for selecting parameters and assessing efficiency of wind-diesel power plants for autonomous electrical supply systems. 6th International Conference. Modern Technologies for Non-Destructive Testing: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Tomsk, 2018, vol. 289. DOI: 10.1088/1757-899X/289/1/012026.
- 25. 2020 Grid Energy Storage Technology Cost and Performance Assessment. Available at: https://www.energy.gov/energy-storage-grand-challenge/downloads/2020-grid-energy-storage-technology-cost-and-performance#:~:text=Pacific%20Northwest%20 National%20Laboratory's%202020,categories%20of%20energy%20stora ge%20systems (accessed 18 March 2022).

Received: 15 April 2022.

Information about the authors

Boris V. Lukutin, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University. *Dmitry I. Muravyev*, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 621.311.001.57

ОПТИМИЗАЦИЯ ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНОЙ ФОТО-ДИЗЕЛЬНОЙ СИСТЕМОЙ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С ШИНОЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Лукутин Борис Владимирович¹,

lukutin48@mail.ru

Муравьев Дмитрий Игоревич¹,

dim15@tpu.ru

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

Актуальность. Увеличение вклада возобновляемых энергоносителей в генерацию автономного гибридного энергетического комплекса актуально для снижения воздействия на окружающую среду дизель-генераторных установок и уменьшения эксплуатационных издержек при производстве электрической энергии в интеллектуальных микросетях с распределённой, в том числе «зелёной», генерацией. Наиболее актуален этот вопрос для сотовых вышек мобильной связи, вахтовых жилых посёлков, метеорологических станций и других децентрализованных потребителей, установленная мощность которых составляет десятки–сотни кВт.

Цель: разработка компьютерных моделей оптимизации управления оперативным составом и режимами автономной фотодизельной системы электроснабжения с шиной постоянного тока, позволяющих минимизировать время работы дизельгенераторной установки за счёт увеличения вклада фотоэлектрической станции при оптимальных технико-экономических показателях. Использование шины постоянного тока для интеграции электроэнергии от распределённых энергоисточников рассматривается как перспективный вариант уменьшения количества часов неэффективной работы дизель-генераторной установки, что позволит существенно экономить дизельное топливо и продлить моторесурс дизель-генератора.

Новизна. Данная работа расширяет известные варианты моделирования и оптимизации режимов автономной гибридной энергетической установки на постоянном токе в плане использования критериальной целевой функции с соответствующими ограничениями, адаптацией моделей энергетического оборудования для поставленных целей моделирования, представлением структуры технико-экономического анализа, основанной на коммерчески доступных характеристиках элементов системы электроснабжения.

Методы. Исследование предусматривает разработку компьютерных моделей интеллектуальной архитектуры управления автономного гибридного энергетического комплекса на базе фотоэлектрической станции, дизель-генераторной установки, системы накопления электрической энергии, децентрализованного потребителя, а также вспомогательных преобразовательных устройств. Моделирование процессов управления реализуется в библиотеке Stateflow, а также использованием синтаксиса языка пакета высокого уровня Matlab, возможности которого приемлемы для поставленных целей.

Результаты. Анализ результатов показывает, что фотодизельные системы электроснабжения на постоянном токе могут быть экономически эффективными во всех сценариях, которые включают в себя разные виды аккумуляторных батарей, тогда как для систем без аккумулирования электроэнергии распределение постоянного тока часто не является экономически эффективным. Результаты будут интересны специалистам, разрабатывающим или эксплуатирующим автономные системы электроснабжения, и организациям, планирующим модернизацию существующих дизель-электрических станций.

Ключевые слова:

Солнечная энергия, возобновляемая энергетика, северные территории, фотоэлектричество, энергоэффективность, микросети.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Mehrpooya M., Mohammadi M., Ahmadi E. Techno-economicenvironmental study of hybrid power supply system: A case study in Iran // Sustainable Energy Technologies and Assessments. – 2018. – V. 25. – Р. 1–10. URL: https://doi.org/10.1016/ j.seta.2017.10.007 (дата обращения 18.03.2022).
- Energy Profile. Russian Federation // IRENA. 2018. URL: https://www.irena.org/europe (дата обращения 18.03.2022).
- Прогноз развития энергетики мира и России до 2040 года / А.А. Макаров, Л.М. Григорьев, Т.А. Митрова, А.С. Иващенко, А.А. Курдин, Е.О. Козина, Д.А. Грушевенко, С.И. Мельникова, В.А. Кулагин, С.П. Филиппов. – М.: ИНЭИ РАН, 2013. – 110 с.
- IRENA (2021), World Energy Transitions Outlook: 1,5 °C Pathway. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency. URL: https://irena.org/publications/2021/Jun/World-Energy-Transitions-Outlook (дата обращения 18.03.2022).
- Global electricity generation mix, 2010–2020 // IRENA. 2021. URL: https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-electricitygeneration-mix-2010-2020 (дата обращения 18.03.2022).
- Opiyo N.N. Droop control methods for PV-based mini grids with different line resistances and impedances // Smart Grid and

Renewable Energy. – 2018. – V. 9 (6). – P. 101–112. DOI: 10.4236/sgre.2018.96007.

- Vallve X., Serrasolses J. Design and operation of a 50 kWp PV rural electrification project for remote sites in Spain // Solar Energy. – 1997. – V. 59 (1–3). – Р. 111–119. URL: https://doi.org/10.1016/S0038-092X(96)00124-7 (дата обращения 18.03.2022).
- Gubenko A. Russia Joined the Paris Agreement on Climate // Info24. – 2019. URL: https://zen.yandex.ru/media/info24/rossiiaprisoedinilas-kparijskomu-soglasheniiu-po-klimatu-chto-etoznachit-5d89f261a3f6e400ad100205?utm_source=serp (дата обращения 18.03.2022).
- An improved energy management strategy for hybrid energy storage system in light rail vehicles / L. Cheng, W. Wang, S. Wei, H. Lin, Z. Jia // Energies. – 2018. – V. 11. – 423. https://doi.org/10.3390/en11020423.
- Das B.K., Al-Abdeli Y.M., Kothapalli G. Optimization of standalone hybrid energy systems supplemented by combustionbased prime movers // Applied Energy. – 2017. – V. 196. – P. 18–33. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.03.119.
- Cristóbal-Monreal I.R., Dufo-López R. Optimization of photovoltaic-diesel-battery standalone systems minimizing

system weight // Energy Conversion and Management. – 2016. – V. 119. – P. 279–288. URL: https://doi.org/10.1016/j.enconman. 2016.04.050 (дата обращения 18.03.2022).

- Kim W-W., Shin J-S., Kim S-Y., Kim J-O. Operation scheduling for an energy storage system considering reliability and aging // Energy. – 2017. – V. 141. – Р. 389–397. URL: https://doi.org/ 10.1016/j.energy.2017.09.091 (дата обращения 18.03.2022).
- uGrid: reliable minigrid design and planning toolset for rural electrification / P. Cicilio, M. Orosz, A. Mueller, E. Costilla-Sanchez // IEEE Access. – 2019. – V. 7. – P. 163988–163999. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2952896.
- Sizing of a standalone microgrid considering electric power, cooling/heating, hydrogen loads and hydrogen storage degradation / B. Li, R. Roche, D. Paire, A. Miraoui // Applied Energy. – 2017. – V. 205. – P. 1244–1259. URL: https://doi.org/10.1016/j.apenergy. 2017.08.142 (дата обращения 18.03.2022).
- Optimal sizing, operating strategy and operational experience of a standalone microgrid on Dongfushan Island / B. Zhao, X. Zhang, P. Li, K. Wang, M. Xue, C. Wang // Applied Energy. – 2014. – V. 113. – P. 1656–1666. URL: https://doi.org/10.1016/j.apenergy. 2013.09.015 (дата обращения 18.03.2022).
- Zambrana M.N.F.V. System design and analysis of a renewable energy source powered microgrid: M.Sc. Thesis. – MD, USA, 2018. – 92 p. URL: https://doi.org/10.13016/M2F47GX8G (дата обращения 18.03.2022).
- Энергоснабжения изолированных территорий / под ред. Л. Григорьева. – М.: Аналитический центр при правительстве Российской Федерации, 2017. – 28 с.
 Javad Mirazimi S., Fathi M. Analysis of hybrid wind/fuel
- Javad Mirazimi S., Fathi M. Analysis of hybrid wind/fuel cell/battery/diesel energy system under Alaska condition // The 8th Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI) Association of Thailand. – Conference 2011. – Khon Kaen, 2011. – P. 917–920. DOI: 10.1109/ECTICON.2011.5947990.

- Clara G. Solar energy for residential electric vehicle charging in Northern Norway – a feasibility study // Solar Integration Workshop 2018. – Stockholm, 2018. – P. 1–7.
- Das I., Cañizares C.A. Renewable energy integration in dieselbased microgrids at the Canadian Arctic // In Proceedings of the IEEE. – 2019. – V. 107. – № 9. – P. 1838–1856. DOI: 10.1109/JPROC.2019.2932743.
- AKSA Power Generation // AJD 45. 2020. URL: https://aksaeurope.com/en-us/product-detail/9 (дата обращения 18.03.2022).
- MathWorks. intlinprog // Mixed-integer linear programming (MILP). 2021. URL: https://www.mathworks.com/help/ optim/ug/intlinprog.html (дата обращения 18.03.2022).
- Development of the structural and functional design of the laboratory bench for experimental research diesel generator sets on variable speed / S. Obukhov, I. Plotnikov, M. Surkov, L. Sumarokova // Smart Grids 2016: The Fourth International Youth Forum: MATEC Web of Conferences. – Tomsk, 2017. – V. 91. URL: https://doi.org/10.1051/matecconf/20179101036 (дата обращения 18.03.2022).
- Obukhov S.G., Plotnikov I.A., Masolov V.G. Method for selecting parameters and assessing efficiency of wind-diesel power plants for autonomous electrical supply systems // Modern Technologies for Non-Destructive Testing: 6th International Conference: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – Tomsk, 2018. – V. 289. DOI: 10.1088/1757-899X/289/1/012026.
- ENERGY.GOV // 2020 Grid Energy Storage Technology Cost and Performance Assessment. URL: https://www.energy.gov/energystorage-grand-challenge/downloads/2020-grid-energy-storagetechnology-cost-and-

performance#:~:text=Pacific%20Northwest%20National%20Labo ratory's%202020,categories%20of%20energy%20storage%20syste ms (дата обращения 18.03.2022)

Поступила: 15.04.2022.

Информация об авторах

Лукутин Б.В., доктор технических наук, профессор отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Муравьев Д.И., аспирант отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

УДК 621.315.145, 621.316.11

УВЕЛИЧЕНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ И ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ДЕЙСТВУЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НЕФТЕГАЗОПРОМЫСЛОВЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

Латыпов Ирек Салихович^{1,4},

Irek.tat.Latypov@gmail.com

Сушков Валерий Валентинович^{1,2}, SushkovVV@gray-nv.ru

Хмара Гузель Азатовна¹,

hmaraga@tyuiu.ru

Паршуков Андрей Николаевич¹, parshukovan@tyuiu.ru

Хамитов Рустам Нуриманович^{1,3},

apple_27@mail.ru

- ¹ Тюменский индустриальный университет, Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38.
- ² Нижневартовский государственный университет, Россия, 628605, г. Нижневартовск, ул. Ленина, 56.
- ³ Омский государственный технический университет, Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11.
- ⁴ ООО «Тюменский нефтяной научный центр», Россия, 425048, г. Тюмень, ул. Максима Горького, 42.

Актуальность обусловлена тем, что электроэнергетические системы нефтегазопромысловых потребителей представлены преимущественно воздушными линиями электропередачи, выполненными неизолированными витыми проводами типа A, AC. При этом на долю воздушных линий класса напряжения 6–35 кВ, эксплуатируемых более 35 лет, приходится порядка 55 % от всей протяженности линий данного класса напряжения, что говорит о необходимости их модернизации в ближайшем будущем. Имея низкую стоимость и хорошие показатели теплоотдачи, данные провода уступают другим типам в надежности и механической прочности при ветровой и гололедной нагрузках. В меньшей степени в электроэнергетических системах нефтегазопромысловых потребителей представлены самонесущие изолированные провода, обладающие, однако, меньшей теплоотдачей в сравнении с A и AC проводами. С целью увеличения механической прочности в системах электроснабжения используют провода типа ACBП, AAAC, ACCC, Aero-Z и другие, также уступающие проводам типа A и AC в теплоотдаче. Таким образом, поиск новых технических решений и обоснованный выбор типов проводов с точки зрения энергоэффективности передачи электрической энергии с учетом действия на них механических нагрузок являются актуальными научнотехническими задачами.

Цель: увеличение пропускной способности электрической сети и повышение энергоэффективности действующей электроэнергетической системы нефтегазопромысловых потребителей

Объекты: электроэнергетическая система нефтегазопромысловых потребителей, представленная распределительной электрической сетью, выполненной воздушными линиями электропередачи. Предмет исследования – зависимость пропускной способности электрической сети и энергоэффективности передачи электрической энергии линии электропередачи от конструкции провода воздушной линии.

Методы: математического анализа, положения теоретических основ электротехники, математическое моделирование в программном комплексе RastrWin3.

Результаты. В процессе математического моделирования установлено, что применение предложенной авторами энергоэффективной конструкции провода способно снизить операционные затраты на потери электроэнергии на проблемных участках воздушных линий на 11,8 %. При этом пропускная способность реконструируемых участков электрической сети увеличится на 19,6 % без строительства дополнительных ВЛ-6 кВ.

Ключевые слова:

Электроэнергетическая система, нефтегазопромысловые потребители, воздушная линия электропередачи, энергоэффективность, пропускная способность электрической сети.

Введение

В настоящее время в электроэнергетических системах нефтегазопромысловых потребителей (ЭСНП) наблюдается значительное развитие техники и технологий, направленных на непрерывное и безаварийное электроснабжение электроприемников [1]. К основным задачам развития электроэнергетических систем нефтегазопромысловых потребителей следует отнести [2–7]:

- Совершенствование технологического управления электроэнергетическими объектами и применение современных методов планирования развития, включая принципы системного анализа.
- Внедрение современных технологий эксплуатации, повышающих эффективность процессов производства, передачи, распределения и потребления электрической энергии с использованием современных средств диагностики, мониторинга, идентификации, а также технических и информационно-измерительных систем.
- 3. Обеспечение достаточной надежности электроснабжения.
- Разработка экономически обоснованных мероприятий по снижению потерь мощности и электроэнергии в электрических сетях.
- 5. Перспективное планирование развития электрических систем с применением актуальных достижений науки и техники, внедрение инновационных технических решений и технологий обслуживания, управления, защиты и передачи информации, систем связи и систем технического и коммерческого учетов электроэнергии.
- Обеспечение промышленной, пожарной безопасности, природоохранных мероприятий и охраны труда.
- Снижение времени участия человека в процессах эксплуатации, технического обслуживания и управления энергосистемами.
- 8. Совершенствование нормативно-технической документации и методического сопровождения направлений деятельности в энергетике.

В данной работе рассматривается задача развития электроэнергетических систем нефтегазопромысловых потребителей, связанная с передачей электрической мощности от источника электроэнергии до конечных потребителей – это преимущественно распределительные сети среднего класса напряжения 6–35 кВ, представленные неизолированными проводами типа A и AC [8, 9]. Для решения данной задачи в работе рассмотрены особенности построения электроэнергетических систем нефтегазопромысловых потребителей.

Электроэнергетические системы нефтегазопромысловых потребителей

Для электроснабжения нефтегазопромысловых потребителей в электроэнергетических системах применяются следующие варианты источников энергии: сторонний источник электроснабжения (внешнее электроснабжение); изолированный источник электроэнергии (электростанции собственных нужд), преобразующие газообразное и/или жидкое топливо в электрическую энергию; совместная работа внешнего электроснабжения и изолированных источников электроэнергии [10].

Технические решения, принятые в электроэнергетических системах нефтегазопромысловых потребителей, должны обеспечивать [11–15]: нормированные категории надёжности электроснабжения для каждой группы потребителей; требуемое качество электроэнергии; экономически обоснованный уровень потерь электроэнергии в элементах сети; поддержание требуемых параметров технологического режима работы оборудования при изменении электрических нагрузок; минимальные капитальные и эксплуатационные затраты.

Для вновь возводимых систем электроснабжения нефтегазопромысловых объектов на сегодняшний день принято руководствоваться следующими принципами [16, 17]:

- номинальные напряжения объектов электрических сетей переменного тока следует выбирать из следующего ряда номинальных напряжений: 10, 35, 110 кВ;
- перевод действующих электрических сетей на более высокий обоснованный класс напряжения может производиться для увеличения их пропускной способности и одновременного уменьшения потерь электрической энергии в элементах сети, а также для обеспечения показателей качества электроэнергии у потребителей;
- при одинаковой удельной стоимости воздушных линий (ВЛ) разных классов предпочтение следует отдавать габаритам ВЛ большего класса напряжения;
- при выборе сечения проводов и кабелей по потерям напряжения необходимо выполнять расчет потерь активной мощности для вариантов с близкими стандартными сечениями с учетом тарифа электроэнергии. Необходимо выполнять сравнительные технико-экономические обоснования на применение вариантов сечений проводов и кабелей с горизонтом на весь срок службы.

Электроснабжение отдаленных потребителей в электроэнергетических системах нефтегазопромысловых потребителей осуществляется, как правило, по двум одноцепным взаиморезервируемым ВЛ 10(6) кВ, подключенным к независимым источникам для электроснабжения потребителей I и II категории надёжности электроснабжения, и одноцепными ВЛ 10(6) кВ для электроснабжения потребителей III категории надёжности электроснабжения.

В электроэнергетических системах нефтегазопромысловых потребителей присутствуют электроприемники:

- получающие питание по одному вводу III категория;
- получающие питание от двух независимых источников питания с ручным переключением II категория;
- получающие питание от двух независимых источников питания с АВР І категория;
- получающие питание от трех независимых источников питания с АВР особая группа.

При распределении нагрузки в сети 10(6) кВ и выше применяется комплексный подход, учитывается и проводится анализ изменений характера нагрузок и их влияния в сети более высокого класса напряжения, выполняется прогноз потерь электрической энергии при различных режимах работы сети, оптимизация мест размыкания ВЛ с двухсторонним питанием, внедрение установок компенсации реактивной мощности.

Технические решения, применяемые для повышения энергоэффективности и пропускной способности электрической сети в ЭСНП

Повышение энергоэффективности передачи электроэнергии и увеличение пропускной способности электрической сети в ЭСНП можно достичь путем регулирования основных параметров, характеризирующих работу системы: активная *P* и реактивная *Q* мощности; напряжение питающей сети *U*; ток *I* нагрузки.

В работах [18-20] предлагается проводить регулирование по одному из выбранных параметров P, Q, U и I, связанных переменными потерями в ВЛ и наибольшей передаваемой по линии активной мощностью, тем самым увеличивая пропускную способность электрической сети. В случае регулирования электрической нагрузки выполняют мероприятия по компенсации реактивной составляющей (продольная и поперечная компенсация реактивной мощности), а также применяют автоматику разгрузки сети, оставляя в работе ответственных потребителей. Для регулирования напряжения сети в распределительных сетях ЭСНП чаще всего применяются вольтодобавочные трансформаторы, которые обеспечивают требуемый уровень напряжения на шинах отдаленных от энергоцентра потребителей.

Еще одним способом регулирования потерь электроэнергии и увеличения пропускной способности распределительных сетей ЭСНП является использование проводов большего сечения, а также расщепление фазных проводов (увеличение длительно допустимого тока линии) [21]. Данный способ требует значительных капитальных затрат, связанных не столько с повышением стоимости самих проводников, сколько с необходимостью строительства ВЛ с применением опор с большей несущей способностью изза увеличения веса проводов.

Известно, что активное сопротивление воздушной линии электропередачи зависит от материала проводника и температуры окружающей среды [3, 22–24], то есть сопротивление уменьшается с увеличением интенсивности охлаждения, которое зависит от площади теплообмена с окружающей средой, что позволяет дополнительно снизить потери электроэнергии в воздушной линии электропередачи.

Следовательно, снижение потерь электроэнергии и увеличение пропускной способности в распределительной сети ЭСНП можно достичь путем одновременного регулирования всех параметров, характеризирующих работу системы.

В работе предложен способ, отличный от рассмотренных, основанный на определении энергоэффективной формы поперечного сечения провода, применение которого позволяет дополнительно снизить потери электроэнергии и повысить пропускную способность линии электропередачи за счет увеличенной поверхности охлаждения провода линии электропередачи, с учетом условий окружающей среды. С целью обоснования данного способа ниже приведен математический анализ процессов нагрева и охлаждения проводника в зависимости от формы его сечения.

Математическая модель нагрева и охлаждения проводника электрическим током

$$\rho_{\Pi} \cdot C_{\mathrm{P}\Pi} \, \frac{\partial T}{\partial t} = Q - div \big(\vec{q} \big), \tag{1}$$

где $\rho_{\rm n}$ – плотность проводника, кг/м³; $C_{\rm PII}$ – удельная теплоёмкость проводника при постоянном давлении, Дж/(кг×К); *T* – температура проводника, К; *t* – время, с.; *Q* – объёмная мощность нагрева проводника то-ком, Вт/м³; \vec{q} – вектор плотности теплового потока, обусловленного теплопроводностью, Вт/м².

Объёмная мощность нагрева проводника током равна:

$$Q = \frac{r_{\rm II} \cdot I^2}{S_{\rm II}^2},\tag{2}$$

где r_{Π} – идентифицированное удельное сопротивление проводника, Ом/м; I – сила тока, А; S_{Π} – площадь сечения проводника, м².

Согласно закону теплопроводности Фурье вектор плотности теплового потока \vec{q} равен:

$$\vec{q} = -\lambda_{\Pi} \cdot \operatorname{grad}(T), \qquad (3)$$

где λ_{Π} – коэффициент теплопроводности проводника, Вт/(м·K).

В цилиндрической системе координат уравнение (1) принимает вид:

$$\rho_{\Pi}C_{\mathrm{P\Pi}}\frac{\partial T(r,t)}{\partial t} = -\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\vec{q}(r,t)\right) + Q(r,t),\qquad(4)$$

где *r* – радиус точки, м.

Таким образом, для одножильного кабеля цилиндрической геометрии из системы уравнений (3), (4) получаем:

$$\rho_{\Pi}C_{\Pi\Pi}\frac{\partial T(r,t)}{\partial t} = -\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\bar{q}(r,t)\right) + Q(r,t), \qquad (5)$$
$$q(r,t) = -\lambda_{\Pi}\frac{\partial T(r,t)}{\partial t}.$$

Определим граничные условия для системы уравнений (5). На оси проводника (r=0) в силу симметрии тепловой поток q(r, t) должен обращаться в ноль:

$$q(r,t)\Big|_{r=0} = 0. \tag{6}$$

Тепловой поток с границы проводника и окружающей среды описывается законом Ньютона-Рихмана:

$$q(r,t)\Big|_{r=R} = \alpha \Big(T(R,t) - T_0\Big), \tag{7}$$

где α – коэффициент теплоотдачи с поверхности проводника, Вт/м²; R – радиус проводника, м; T_0 – температура окружающей среды, К.

Система уравнений (5), дополненная граничными условиями (6), (7), является математической моделью одножильного проводника.

Коэффициент теплоотдачи излучения зависит от температуры наружной поверхности провода и находится по закону Стефана–Больцмана:

$$\alpha_{\rm H} = \varepsilon \cdot C_0 \cdot \frac{T^4 - T_0^4}{T - T_0},\tag{8}$$

где ε – коэффициент черноты поверхности провода; C_0 – постоянная излучения абсолютно черного тела; *T* – абсолютная температура провода; *T*₀ – абсолютная температура окружающей среды.

Коэффициент теплоотдачи конвекции, который зависит от периметра поперечного сечения провода и определяется соотношением:

$$\alpha_{\rm K} = \frac{b \cdot \lambda \cdot v^a}{v^a \cdot (0,5P)^{1-a}},\tag{9}$$

где a, b – постоянные коэффициенты; λ – теплопроводность воздуха; v – кинетическая вязкость воздуха; v – скорость ветра; P – периметр поперечного сечения провода.

Значения коэффициентов *а* и *b* принимаются из следующих условий:

$$\begin{cases} \text{если } 10^2 \le \frac{0,5 \cdot P \cdot \upsilon}{\nu} \le 10^3, \text{ то } a = 0,44; b = 0,813; \\ \text{если } 10^3 \le \frac{0,5 \cdot P \cdot \upsilon}{\nu} \le 10^5, \text{ то } a = 0,59; b = 0,288. \end{cases}$$

Значение отношения $\frac{b\lambda}{v^a}$ принимается из следу-

ющих условий:

$$\begin{cases} \text{если } 10^2 \leq \frac{36364 \cdot P \cdot \upsilon}{1 + 0,0068 \cdot T_0} \leq 10^3, \text{ то } \frac{b\lambda}{\nu^a} = 2,73; \\ \text{если } 10^3 \leq \frac{36364 \cdot P \cdot \upsilon}{1 + 0,0068 \cdot T_0} \leq 10^5, \text{ то } \frac{b\lambda}{\nu^a} = 5,19. \end{cases}$$

Соотношение (9) показывает, что увеличение периметра поперечного сечения *P* провода уменьшает коэффициент теплоотдачи конвекции.

Тогда коэффициент теплоотдачи нагретого провода, обтекаемого воздухом, температура которого меньше температуры провода, равен:

$$\alpha = \alpha_{\rm M} + \alpha_{\rm K},\tag{10}$$

где $\alpha_{\rm K}$ – коэффициент теплоотдачи конвекцией; $\alpha_{\rm H}$ – коэффициент теплоотдачи излучением.

Стационарный режим нагрева

В стационарном режиме нагрев проводника протекающим током компенсируется теплоотдачей с его поверхности, а температурное поле T(r,t) не зависит от времени. Приравнивая в (5) нулю производную от T по времени получаем:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda_{\Pi} \frac{\partial T(r)}{\partial r} \right) + r Q(r) = 0.$$
 (11)

Интегрируя уравнение (7) по переменной *r* от 0 до *R*, с учётом граничного условия (6) получим:

$$T(r) = T_0 + \frac{Q_s}{4\pi\lambda_{\Pi}} \left(1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2 \right), \quad r \le R, \quad (12)$$

где с учётом (2) $Q_s = \pi R^2 Q = (\pi R r_{\Pi} I^2) / S_{\Pi}$ (Вт/м) представляет собой мощность нагрева током провода длиной 1 м.

Аналогично выводится стационарный профиль температуры в проводнике, состоящем из двух материалов (сталь и алюминий). Пусть R_1 – радиус внутренней жилы (сталь) проводника, а R – радиус внеш-

ней (алюминий). Установившуюся температуру на границе двух жил обозначим за T_1 , тогда получим систему уравнений:

$$T(r) = \begin{cases} T_{1} + \frac{Q_{S,1}}{4\pi\lambda_{\Pi,1}} \left(1 - \left(\frac{r}{R_{1}}\right)^{2} \right), \ r \leq R_{1}; \\ T_{0} + \frac{Q_{S,2}}{4\pi\lambda_{\Pi,2}} \left(1 - \left(\frac{r}{R}\right)^{2} \right), \ R_{1} < r \leq R, \quad (13) \end{cases}$$

где

$$Q_{s,1} = \frac{\pi R_1^2 r_{\Pi,1} I^2}{S_{\Pi,1}} \quad (BT/M),$$
$$Q_{s,2} = \frac{\pi (R^2 - R_1^2) r_{\Pi,2} I^2}{S_{\Pi,2}} \quad (BT/M).$$

Температура T_1 в (10) определяется из условия непрерывности теплового потока на границе двух жил:

$$T_1 = T_0 + \frac{Q_{s,2}}{4\pi\lambda_{\Pi,2}} \left(1 - \left(\frac{R_1}{R}\right)^2\right).$$

Из формулы (13) следует, что максимальная температура будет на оси проводника, она определяется по формуле:

$$T(0) = T_1 + \frac{Q_{S,1}}{4\pi\lambda_{\Pi 1}}$$

С удалением от оси проводника температура падает пропорционально квадрату расстояния.

Наматывание провода не меняет его цилиндрической формы, следовательно, формулы (10)–(12) остаются справедливыми и для витого проводника. Для проводника, состоящего из нескольких витых жил, формула (6) остается справедливой, но лишь в направлении контакта жилы с внешней средой. Распределение температуры в направлении контакта двух жил проводника описывается формулой:

$$T(r) = \begin{cases} T_1 + \frac{Q_{S,1}}{4\pi\lambda_{\Pi,1}} \left(1 - \left(\frac{r}{R_1}\right)^2 \right), & r \le R_1; \\ T_1, & R_1 < r \le R, \end{cases}$$

По условию теплового баланса получим выражение для определения длительно допустимого тока:

$$I_{\text{дл. доп}} = \sqrt{\frac{\alpha P L (T - T_0) S_{\Pi} \chi_3}{p_t}}.$$
 (14)

Из выражения (14) видно, что длительно допустимый ток зависит от температуры нагрева провода, которая, в свою очередь, зависит от боковой поверхности охлаждения провода, – при увеличении периметра огибающей сечение провода длительно допустимый ток увеличивается, а уменьшение этого периметра приводит к снижению величины тока.

Режим остывания провода

Остывание проводника описывается системой уравнений (12) с *Q*=0:

$$\rho_{\Pi}C_{\Pi}\frac{\partial T(r,t)}{\partial r} = \frac{\lambda_{\Pi}}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial T(r,t)}{\partial r}\right).$$
 (15)

Раскрывая скобки в правой части уравнения (15), окончательно получаем:

$$\frac{\rho_{\Pi}C_{P\Pi}}{\lambda_{\Pi}}\frac{\partial T(r,t)}{\partial r} = \frac{\partial^2 T(r,t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial T(r,t)}{\partial r}.$$
 (16)

Выражение (16) представляет собой дифференциальное уравнение в частных производных, для его решения необходимо задать граничные условия по типу уравнений (6), (7). Решение уравнения в частных производных возможно только численно.

Известно, что эквивалентные тепловые потери для трехпроводной линии определяются по выражению [24]:

$$\Delta W_{\text{Heppen}} = 3I_{\text{Harp}}^2 R_{\Theta} \Delta t, \qquad (17)$$

где $I_{\text{нагр}}$ – ток нагрузки, принимаемый на интервале времени Δt неизменным; R_{Θ} – сопротивление линии при температуре Θ на интервале времени Δt ; Δt – промежуток времени расчетного интервала.

Принимая для расчетов установившийся режим работы системы при температуре окружающей среды 20 °С (средняя температура воздуха самого жаркого месяца (июль)), выражение (17) можно представить в виде:

$$\Delta W_{\text{перем}} = 3I_{\text{нагр}}^2 \times \left(R_{20} \left(1 + \alpha \left(\frac{I_{\text{нагр}}^2 R_{20}}{2\alpha_{\text{T}} P_{\text{пров}} L} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) - 20 \right) \right) \right) \Delta t,$$

где R_{20} – удельное электрическое сопротивление проводов при температуре провода 20 °C; α – температурный коэффициент активного сопротивления алюминиевых проводов, который равен примерно 0,004 °C⁻¹; $\alpha_{\rm T}$ – коэффициент теплоотдачи; $P_{\rm пров}$ – периметр фигуры в поперечном сечении провода; L – длина проводника; $T=Gc\chi_{\rm зап}m_{\rm np}/(2\alpha_{\rm T}L(F_{\rm HOM}\pi)^{1/2})$ – постоянная времени нагрева; G – вес проводника; c – удельная теплоемкость материала проводника.

Энергоэффективный провод ЭСНП

В рамках написания исследовательской работы было разработано и запатентовано конструктивное исполнение энергоэффективного неизолированного провода воздушной линии электропередачи класса напряжения 6–35 кВ [22, 25]. Аналогом для разработки энергоэффективного провода является провод с трапецеидальными проволоками в повивах [17]. На рис. 1 представлено конструктивное исполнение проводов: *a*) провод типа AC [9]; *б*) [17]; *в*) [25].



Puc. 1. Конструктивные исполнения неизолированных проводов ВЛ *Fig. 1.* Structural variations of non-insulated overhead line wires

По методике, приведенной в [22], коэффициент заполнения полного сечения материалом определяется по формуле:

$$\chi_{3a\pi} = \frac{(S_{\text{серд}} + S_{\text{токовед. части}})}{S_{\text{провода}}},$$
(18)

где $S_{\text{серд}}$ – номинальная площадь стального сердечника провода (при наличии несущей части); $S_{\text{токовед. части}}$ – номинальная площадь токоведущей части; $S_{\text{провода}}$ – полная площадь фигуры в сечении провода с учетом проводников и зазоров между ними, образующихся при скрутке провода.

Коэффициент гладкости поверхности из [22]:

$$m_{\rm np} = \frac{L_{\rm on.\ okp}}{P_{\rm ob}},\tag{19}$$

где $L_{\text{оп. окр}}$ – длина окружности, описанная вокруг фигуры в сечении провода; P_{ϕ} – периметр фигуры в сечении провода.

Сравнительный анализ энергоэффективного провода с проводом типа AC одинакового номинального сечения алюминиевого и стальной частей представлен в табл. 1. В таблицу также внесены коэффициенты заполнения полного сечения материалом χ_{3an} и гладкости поверхности провода m_{np} , описание которых представлено в работе [22]. В программной системе конечно-элементного анализа ANSYS 16.0 проведено моделирование процесса нагрева и остывания проводов в зависимости от формы поперечного сечения. Распределение векторов теплового потока, а также изменение температуры нагрева поверхности провода сечения 35 мм² в зависимости от формы поперечного сечения поперечного сечения поверхности провода сечения провода представлены на рис. 2.

Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2022. Т. 333. № 4. 236–247 Латыпов И.С. и др. Увеличение пропускной способности электрической сети и повышение энергоэффективности действующей ...



Рис. 2. Распределение векторов теплового потока и изменение температуры нагрева поверхности провода: а) представление участков с разной формой поперечного сечения; б) распределение векторов теплового потока с поверхности провода; в) температура поверхности участков провода при протекании тока нагрузки

Fig. 2. Distribution of heat flux vectors and change in the heating temperature of the wire surface: a) representation of sections with different cross-sectional shapes; b) distribution of heat flux vectors from the wire surface; c) surface temperature of wire sections during the flow of load current

Анализ рис. 2 показывает, что увеличение площади боковой поверхности охлаждения повышает плотность векторов теплового потока, при этом снижается температура нагрева провода при протекании тока нагрузки на 18,4 и 28,7 % для участков провода 1 и 2 соответственно, в сравнении с участком 3 в рассмотренном примере.

I ubic 1. Comparative analysis of whe	s [) j unu j	[25]
Провод/Wire	AC	Патент Patent 2631421
Сечение, мм ² (алюминий/сталь) Cross-section, mm ² (aluminium/steel)	95,4/15,9	95/16,3
Коэффициент заполнения полного сечения материалом $\chi_{\text{зап}}(18)$ Coefficient of filling a wire full cross-section with material (18)	0,92	0,99
Коэффициент гладкости поверхности про- вода m_{np} (19) Coefficient of a wire smoothness (19)	0,832	0,61
Диаметр провода, мм Wire diameter, mm	13,5	12,52
Периметр поперечного сечения провода, мм Perimeter of wire cross-section, mm	48,86	52,38
Длительно допустимый ток при температу- pe 90 °C (вне помещений), A Current-carrying capacity of the wire at 90 °C (outside), A	330	395
Увеличение тока, % Increase in current, %	-	16,4
Удельное активное сопротивление провода при температуре окружающей среды 20 °C, Ом/км Wire resistivity at the ambient temperature of 20 °C, Ohm/km	0,3007	0,265
Удельное реактивное сопротивление про- вода при температуре окружающей среды 20 °C, Ом/км Specific wire reactance at the ambient temper- ature of 20 °C, Ohm/km	0,385	0,379
Экономия активного материала, % * (на 1 км) Saving of active material. % * (per 1 km)	-	16

Таблица 1.	Сравнительный анализ проводов [9] и [25]
Table 1.	Comparative analysis of wires [9] and [25]

* экономия материала рассчитана при условии, что длительно допустимый ток запатентованного провода равен длительно допустимому току AC.

* saving of active material calculated assuming that the continuous carrying current of the patented wire is equal to the continuous carrying current of AC.

Анализ табл. 1 показывает, что запатентованная конструкция провода позволяет увеличить величину передаваемого по линии тока (>10 %) и сэкономить материал на изготовление провода (~16 %).

Рассмотрим пример возможного использования проводов для ВЛ энергоэффективной формы для реконструкции участка электрической сети нефтяного месторождения.

Моделирование электроэнергетической системы нефтяного месторождения в программном комплексе RastrWin3

Исследуемое нефтяное месторождение расположено в северной части Западно-Сибирской низменности, в междуречье рек Айваседопур и Пякупур.

В табл. 2 представлены электрические расчетные мощности кустовых площадок, определенные с учетом технологических нагрузок и режимов работы оборудования по РТМ 36.18.32.4-92 «Руководящий технический материал. Указания по расчету электрических нагрузок».

Таблица 2. Электрические расчетные мощности кустовых площадок ЭСНП

Table 2.	Electric	calculated	power of	of well	pads PSOC
----------	----------	------------	----------	---------	-----------

	-	-	-	
	Расч Са	K ent		
Наименование ЭП Name of the electrical receiver	активная, Вт active, kWt	реактивная, вар reactive, kvar	полная, кВА apparent, kVA	Pacyerthbiñ To Ha BH, A Calculated curro on HV, A
Кустовая площадка № 1 Well pad no. 1	1233,6	175,8	1246,06	114,2
Кустовая площадка № 2 Well pad no. 2	993,8	141,6	1003,84	92,0
Кустовая площадка № 3 Well pad no. 3	1163,4	165,7	1175,14	107,7
Кустовая площадка № 4 Well pad no. 4	970,7	138,2	980,49	89,8
Кустовая площадка № 5 Well pad no. 5	1219,0	173,7	1231,3	112,8
Буровая установка на ку- стовой площадке № 5 Drilling rig on the well pad no. 5	1500	675	1644,9	150,7

Обозначение Designation	Наименование/Name
ПС 35/6 кВ.	Наименование источника питания,
КРУН-6 кВ. 1 с.ш.	секция шин
Substation 35/6 kV.	Name of power-supply,
CDEI-6kV. 1 s.b.	substation of busbars
Куст 1 (Т1)	Наименование узла нагрузки (номер
Well pad 1 (T1)	трансформатора)
	Name of the consumer (transformer number)
1,5+J0,2	Активная (кВт) и реактивная (квар) мощ-
\rightarrow	ности передачи
	Active (kWt) and reactive (kvar)
	power of supply
0,6+J0,1	Активная (кВт) и реактивная (квар)
	нагрузки узла
	Active (kWt) and reactive (kvar)
	power of consumer
6,05	Уровень напряжения в узле (кВ)
	Voltage level in network node (kV)
	Падение напряжения на участке от источ-
2 76	ника питания до узла нагрузки (%)
-3,70	Voltage drop on branch of a network
	from the power-supply to the consumer (%)

Таблица 3. Условные обозначения **Table 3.** Legend

Выполним расчет режимов сети на период эксплуатации и бурения кустовых площадок в программном комплексе RastrWin3 для двух вариантов: первый – питающий провод AC-95/16; второй – провод предложенной энергоэффективной формы. В работе применены следующие условные обозначения (табл. 2).

Исходные данные:

- питающая линия фидеров №№ 1, 2 вариант 1: провод АС-95/16, вариант 2: провод энергоэффективной формы;
- электрические нагрузки кустов скважин представлены в табл. 2;
- длины ВЛ представлены в табл. 4.

Графическое изображение ЭСНП рассматриваемого месторождения в программном комплексе RastrWin3 представлено на рис. 3.

Результаты расчетов токовых нагрузок и потерь электроэнергии в ветвях представлены в табл. 4.

Из анализа расчетных данных следует, что вариант питания потребителей кустовой площадки от существующей сети (вариант 1, рис. 3) невозможен, так как падение напряжения на участках от отпайки на кустовую площадку № 2 до кустовой площадки № 5 при питании буровой установки от сети превышает допустимую величину более 10 % (п. 4.2.2 ГОСТ 32144-2013). При этом токовая загрузка ветвей превышает допустимую величину (табл. 4) I_{дл.доп.AC95/16}>330 А для ветвей 1–101, 101–102 (от источника питания до отпайки на второй куст скважин (*l*=2,36 км, рис. 3).



Рис. 3. Схема электроснабжения потребителей кустовой площадки N_2 5 **Fig. 3.** Power supply drawing of wells of the multiple well platform no. 5

ьного узла g node no. IHOГО Узла node no.		Название узла Node name	Длина участка ВЛ, км Scope of branch OL, km	Активное сопротивление ветви R, Ом Wire resistance R, Ohm <u>Вариант 1</u> Вариант 2 <u>Variant 1</u> Variant 2	Реактивное сопротивление ветви X, Ом Wire reactance X, Ohm <u>Вариант 1</u> Вариант 2 <u>Variant 1</u> Variant 2	Расчетный ток Ірасч., А Calculated current I _{cal.} , А		Потери активной мощности ΔP , кВт Active power losses ΔP , kWt		Потери реактивной мощности, ΔQ, квар Reactive power losses ΔQ, kvar	
Ne начал Beginnin Ne конеч Ending	Вариант 1 Variant 1					Вариант 2 Variant 2	Вариант 1 Variant 1	Вариант 2 Variant 2	Вариант 1 Variant 1	Вариант 2 Variant 2	
101	102	Куст 1 (T1) – Куст 2 (T1) Well pad 1 (T1) – Well pad 1 (T1)	0,46	<u>0,138322</u> 0,1219	<u>0,1771</u> 0,17434	330,20	322,15	45,245	43,065	57,929	55,139
201	202	Куст 1 (T2) –Куст 2 (T2) Well pad 1 (T2) – Well pad 1 (T2)	0,47	0,141239	0,18095	148,17	-	9,308	11,918	_	Ι
102	103	Kyct 2 (T1) – Kyct 3 (T1) Well pad 2 (T1) – Well pad 3 (T1)	0,2	<u>0,06014</u> 0,053	<u>0,077</u> 0,0758	281,93	273,31	14,341	13,477	18,361	17,255
202	203	Kyct 2 (T2) – Kyct 3 (T2) Well pad 2 (T2) – Well pad 3 (T2)	0,22	0,066154	0,0847	102,34	_	2,079	2,661	-	_
103	104	Kyct 3 (T1) – Kyct 4 (T1) Well pad 3 (T1) – Well pad 4 (T1)	0,8	<u>0,24056</u> 0,2120	<u>0,308</u> 0,3032	222,55	215,86	35,744	33,627	45,764	43,054
203	204	Kycr 3 (T2) – Kycr 4 (T2) Well pad 3 (T2) – Well pad 4 (T2)	0,81	0,243567	0,31185	46,37	-	1,571	2,012	-	_
104	105	Kycr 4 (T1) – Kycr 5 (T1) Well pad 4 (T1) – Well pad 5 (T1)	0,2	<u>0,06014</u> 0,053	<u>0,077</u> 0,0758	174,58	166,86	5,499	5,023	7,040	6,431
1	101	ПС 35/6 кВ. КРУН-6 кВ. 1 с.ш. – Куст 1 (Т1) Substation 35/6 kV (Т1) – Well pad 1 (Т1)	1,9	<u>0,57133</u> 0,5035	<u>0,7315</u> 0,7201	392,35	382,64	263,849	250,951	337,818	321,304
2	201	ΠC 35/6 κB. KPYH-6 κB. 2 c.m. – Kycτ 1 (T2) Substation 35/6 kV (T2) – Well pad 1 (T2)	1,88	0,565316	0,7238	206,36	-	72,221	92,467	-	-

Таблица 4	. Результаты расчетов
Tahle A	Calculation results

Загрузка ветви превышает пропускную способность провода ВЛ/Branch loading exceeds the capacity of the OL.

Потери активной и реактивной энергии снижены при использовании энергоэффективного провода Losses of active and reactive energy are reduced by using an energy efficient wire.

Увеличить пропускную способность электрической сети можно путем реконструкции проблемных участков фидера № 1 представленной схемы. Так как реконструкция не предполагает замену опор для ВЛ, то необходимо выбрать тип провода, удовлетворяющий условиям: вес проводника не должен превышать вес реконструируемой ВЛ; пропускная способность линии электропередачи должна быть выше на 11 %. Таким образом, для исследуемого участка фидера № 1 целесообразно использовать энергоэффективную конструкцию провода (вариант 2, рис. 2).

Из расчета видно, что по варианту 2 токовая загрузка ветвей не превышает допустимую величину (табл. 4) І_{дл.доп.энергоэф.пр}<395 А. Падение напряжения на участках от отпайки на кустовую площадку № 2 до кустовой площадки № 5 при питании буровой установки от сети не превышает допустимую величину 10 % (п. 4.2.2 ГОСТ 32144-2013). Следовательно, электроснабжение кустовой площадки от сети возможно при замене проблемных участков ВЛ фидера № 1 на энергоэффективный провод.

Выполним предварительную экономическую оценку для двух вариантов строительства: первый – строительство дополнительного участка сети, включающего установку опор для параллельной ВЛ; воторой – замена проводов типа AC на энергоэффективные провода, то есть с использованием существующих опор и арматуры.

Вариант 1. Затраты на закупку и строительство одного километра ВЛ-6 кВ по объекту аналогу составляет 9523 тыс. р. с учетом НДС. С учетом протяженности проблемного участка 2,36 км итоговая сумма составит 22474,28 тыс. р.

Вариант 2. Реконструкция участка сети будет включать: техническое обследование реконструируемых участков ВЛ-6 кВ (2 млн р.); изготовление энергоэффективных проводов (дороже на 20 %) – 234 тыс. р. км (с учетом НДС); работы по монтажу энергоэффективных проводов (в том числе транспортные услуги) – 1785 тыс. р. за один километр с учетом НДС. С учетом протяженности расматриваемого участка 2,36 км итоговая сумма составит 7933,04 тыс. р.

Из сравнения расчетов видно, что использование энергоэффективных проводов позволит увеличить пропускную способность проблемных участков ВЛ нефтяного месторождения. Предварительная оценка показала, что замена проводов типа AC на энергоэффективные провода экономически обоснована.

Заключение

Представлены результаты исследования повышения пропускной способности распределительных сетей класса напряжения 6–35 кВ, выполненные преимущественно неизолированными проводами типа А и АС. Проведено математическое моделирование процесса нагрева и охлаждения проводов в стационарных режимах, на основе исследования моделей предложены энергоэффективные формы проводов.

На примере схемы электроснабжения потребителей кустовой площадки № 5 нефтяного месторождения от энергосистемы был рассмотрен способ повышения пропускной способности электрической сети за счет использования энергоэффективной формы. Известно, что строительство дополнительного участка ВЛ для параллельной работы увеличит пропускную способность «проблемных участков» линии электропередачи в два раза. Предложено увеличение

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Меньшов Б.Г., Ершов М.С., Яризов А.Д. Электротехнические установки и комплексы в нефтегазовой промышленности. – М.: Изд-во «Недра», 2000. – 487 с.
- Макаров А.А. Достижения и проблемы стратегического планирования развития энергетики России // Энергетическая политика. – 2018. – № 3. – С. 2–9.
- Латыпов И.С., Хмара Г.А., Сушков В.В. Подход к обоснованию выбора энергоэффективной формы витого неизолированного провода воздушной линии электропередачи класса напряжения 6–35 кВ // Промышленная энергетика. 2017. № 4. С. 8–12.
- Arkhipova O.V. Principles of system analysis for sustainable electric power supply to agro-industrial complexes operating in energy isolated territories // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 723, 2021, 052032. URL: https://doi.org/10.1088/1755-1315/723/5/052032 (дата обращения 15.01.2022).
- Identification of parameters of power circuits pulse energy conversion systems of electromechanical equipment / E.A. Godovnikov, E.G. Andreeva, V.Z. Kovalev, R.T. Usmanov // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. URL: https://doi.org/10.1088/1742-6596/1260/5/052007 (дата обращения 15.01.2022).
- Identification of mathematical models parameters of electromechanical consumers of regionally isolated electrotechnical complexes / V.Z. Kovalev, O.V. Arhipova, S.S. Esin, A.A. Tatevosyan, A.G. Scherbakov // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. URL: https://doi.org/10.1088/1742-6596/1260/5/052014 (дата обращения 15.01.2022).
- Определение параметров схемы замещения погружного электродвигателя на основании данных испытаний / С.С. Шубин, В.У. Ямалиев, А.С. Глазырин, Д.С. Буньков, С.Н. Кладиев, И.В. Раков, Е.В. Боловин, В.З. Ковалев, Р.Н. Хамитов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. - 2021. – Т. 332. – № 1. – С. 204–214.
- Сравнительный анализ целесообразности применения проводов с композитным сердечником и проводов традиционной конструкции / В.В. Смирнов, А.А. Лавренчук, Т.С. Максименко, М.А. Старченко, Е.Ю. Чернова // Энергетические установки и технологии. – 2018. – Т. 4. – № 4. – С. 96–102.
- Провода неизолированные для воздушных линий электропередачи. Технические условия: ГОСТ 839-2019. – М.: Изд-во Стандартинформ, 2019. – 39 с.
- Фаворский О.Н., Филиппов С.П., Полищук В.Л. Актуальные проблемы обеспечения энергетики страны конкурентным оборудованием // Вестник Российской Академии Наук. – 2017. – № 87 (8). – С. 679–688. DOI: 10.1134/S1019331617040086. URL: https://link.springer.com/article/10.1134/S1019331617040086 (дата обращения 15.01.2022).

пропускной способности линии электропередачи за счет применения энергоэффективной формы провода без изменения конструкции ВЛ-6 кВ, что приведет к снижению потерь электроэнергии в сети.

Предложенное техническое решение для рассматриваемой схемы электроснабжения по использованию участков ВЛ фидера № 1 существующей сети с применением энергоэффективного провода позволяет снизить капитальные затраты в два раза, операционные затраты на потери электроэнергии на «проблемных участках» ВЛ снижаются на 11,8 %. При этом пропускная способность реконструируемых участков линий электропередачи увеличена на 19,6 % без строительства дополнительных участков ВЛ-6 кВ.

Таким образом, применение энергоэффективного провода позволяет снизить потери электроэнергии. Пропускная способность линий электропередачи увеличивается.

- 11. Hota A.P., Mishra S. Loss allocation in distribution networks with distributed generators undergoing network reconfiguration // International Journal Electrical and Computer Engineering. 2020. № 10 (4). Р. 3375–3383. DOI: 10.11591/ijece.v10i4.pp3375-3383. URL: http://ijece.iaescore.com/index.php/IJECE/article/view/19214 (дата обращения 15.01.2022).
- Reactive power control in AC power systems: fundamentals and current issues / N.M. Tabatabaei, A.J. Aghbolaghi, N. Bizon, F. Blaabjerg. – Cham, Switzerland: Springer International Publ. AG, 2017. – 634 p. URL: https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-51118-4 (дата обращения 15.01.2022).
- Li H., Cui H., Li C. Distribution network power loss analysis considering uncertainties in distributed generations // Sustainability. – 2019. – № 11 (5). – Р. 1311. DOI: 10.3390/su11051311. URL: https://www.mdpi.com/2071-1050/11/5/1311 (дата обращения 15.01.2022).
- Probabilistic forecasting of sudden power supply interruptions of electromechanical and heat-power equipment of regionally isolated electrotechnical complex / V.Z. Kovalev, V.L. Vyazigin, O.V. Arhipova, S.S. Yesin // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. URL: https://doi.org/10.1088/1742-6596/1260/5/052015 (дата обращения 15.01.2022).
- Определение погонных электротехнических параметров нефтепогружного кабеля / А.С. Глазырин, С.В. Ланграф, Ю.Н. Исаев, А.А. Филипас, С.Н. Кладиев, В.А. Копырин, А.П. Леонов, Р.Н. Хамитов, И.В. Раков, В.З. Ковалев, С.В. Колесников, А.В. Лавринович // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 6. – С. 186–197.
- 16. Ma S., Chen B., Wang Z. Resilience enhancement strategy for distribution systems under extreme weather events // IEEE Transaction on Smart Grid. – 2018. – № 9 (2). – Р. 1442–1451. DOI: 10.1109/TSG.2016.2591885. URL: https://ieeexplore. ieee.org/document/7514755 (дата обращения 15.01.2022).
- Лопарев В.В., Образцов Ю.В. Об особенностях современных неизолированных проводов для воздушных линий электропередачи // Наука и техника. – 2014. – № 6 (349). – С. 9–15.
- Mishra S., Das D., Paul S. A comprehensive review on power distribution network reconfiguration // Energy Systems. – 2017. – № 8 (2). – Р. 227–284. DOI: 10.1007/s12667-016-0195-7. URL: https://link.springer.com/article/10.1007/s12667-016-0195-7 (дата обращения 15.01.2022).
- Marujo D., Zanatta G.L., Floréz H.A.R. Optimal management of electrical power systems for losses reduction in the presence of active distribution networks // Electrical Engineering – 2021. – № 103. – Р. 1725–1736. DOI: 10.1007/s00202-020-01182-5. URL: https://link.springer.com/article/10.1007/s00202-020-01182-5 (дата обращения 15.01.2022).
- 20. Acosta J.S., Tavares M.C. Methodology for optimizing the capacity and costs of overhead transmission lines by modifying their bundle geometry // Electric Power Systems Research –

2021. – № 163. – Р. 668–677. DOI: 10.1016/j.epsr.2017.10.005. URL: https://www.infona.pl/resource/bwmeta1.element.elsevierf2f237f9-89e0-3ab7-a310-1a668e8b2c3e (дата обращения 15.01.2022).

- Acosta J.S., Tavares M.C. Optimal selection and positioning of conductors in multi-circuit overhead transmission lines using evolutionary computing // Electric Power Systems Research – 2020. – № 180. – Р. 106174. DOI: 10.1016/j.epsr.2019.106174. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037877961930 4936 (дата обращения 15.01.2022).
- Латыпов И.С. Моделирование и исследование неизолированных проводов для электротехнических комплексов потребителей нефтегазовой отрасли в программной системе конечноэлементного анализа // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2019. – Т. 15. – № 3. – С. 25–30.
- 23. Calculation of the overhead transmission line conductor temperature in real operating conditions / L. Bena, V. Gall, M. Kanalik et al. // Electrical Engineering. 2021. № 103 (2). P. 769–780. DOI: 10.1007/s00202-020-01107-2. URL: https://www.researchgate.net/publication/345174729_Calculation_of_the_overhead_transmission_line_conductor_temperature_in_re al_operating_conditions (дата обращения 15.01.2022).
- Фурсанов М.И. Определение и анализ потерь электроэнергии в электрических сетях энергосистем. – Минск: УВИЦ при УП «Белэнергоснабжение», 2006. – 209 с.
- 25. Провод для воздушных линий электропередачи: пат. 2631421 Российская федерация, МПК (51) Н01В 5/10 (2006.01). № 2016114397; заявл. 13.04.2016; опубл. 22.09.2017. – Бюл. № 27.

Поступила 18.04.2022 г.

Информация об авторах

Латыпов И.С., главный специалист электротехнического отдела Управления по обустройству месторождений ООО «Тюменский нефтяной научный центр»; соискатель Тюменского индустриального университета.

Сушков В.В., доктор технических наук, профессор, профессор кафедры электроэнергетики Тюменского индустриального университета; профессор кафедры энергетики Нижневартовского государственного университета.

Хмара Г.А., кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электроэнергетики Тюменского индустриального университета.

Паршуков А.Н., кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электроэнергетики Тюменского индустриального университета.

Хамитов Р.Н., доктор технических наук, доцент, профессор кафедры электроэнергетики Тюменского индустриального университета; профессор кафедры электрической техники Омского государственного технический университет. UDC 621.315.145, 621.316.11

THE ELECTRIC GRID CAPACITY INCREASING AND THE ENERGY EFFICIENCY IMPROVING FOR THE EXISTING OIL AND GAS CONSUMERS' ELECTRIC POWER SYSTEM

Irek S. Latypov^{1,4},

Irek.tat.Latypov@gmail.com

Valery V. Sushkov^{1,2}, SushkovVV@gray-nv.ru

Guzel A. Khmara¹, hmaraga@tyuiu.ru

Andrey N. Parshukov¹, parshukovan@tyuiu.ru

Rustam N. Khamitov^{1,3},

apple_27@mail.ru

- Industrial University of Tyumen, 38, Volodarsky street, Tyumen, 625000, Russia.
- ² Nizhnevartovsk State University, 56, Lenin street, Nizhnevartovsk, 628605, Russia.
- ³ Omsk State Technical University, 11, Mira avenue, Omsk, 644050, Russia.
- ⁴ Tyumen Petroleum Research Center,
 42, Maksim Gorgy street, Tyumen, 625048, Russia.

The relevance of the research is caused by the fact that electrical systems of oil and gas consumers are represented mainly by overhead power line made with uninsulated stranded wires type A, AC. At the same time, it is about 55 % of the entire length of the lines of 6–35 kV voltage class that has been in operation for more than 35 years. This means the need of its modernization in the near future. These wires are inferior to other types in terms of reliability and mechanical strength under wind load, but have lower cost and higher heat dissipation. In electrical system oil and gas consumers use self-supporting covered wire (type SCW) less, which have less heat dissipation then type A and AC. In order to increase the mechanical strength, wires of the type ACC, AAAC, ACSR, Aero-Z etc., which have the worst heat dissipation then type A and AC, are used.

Thus, a searching for new technical solutions and justification of the choice of conductors' types in terms of the energy efficiency of electrical energy transmission, taking into account the influence of mechanical loads, is an urgent scientific and technical task.

The main aim of the work is to increase transmission lines' capacity and improve energy efficiency of the existing electrical systems of oil and gas consumers.

Objects: electric power system of oil and gas consumers represented by a distribution electrical network made by overhead lines. Subject of the study is a dependence of the throughput and energy efficiency of the power line transmission of electrical energy on the construction of the overhead line wire.

Methods: mathematical analysis, provisions of the theoretical foundations of electrical engineering, mathematical modeling in the software package RastrWin3.

Results. Applying mathematical modeling, it was established that the use of the energy-efficient wire construction proposed by the authors can reduce operating costs for power losses on troubled lines by 11,8 %. At the same time, the capacity of the reconstructed sections will increase by 19,6 % without the construction of additional OL 6 kV.

Key words:

Electrical system, oil and gas consumer, overhead power line, energy efficiency, power line capacity.

REFERENCES

- Menshov B.G., Ershov M.S., Yarizov A.D. Elektrotekhnicheskie ustanovki i kompleksy v neftegazovoy promyshlennosti [Electrical installations and complexes in the oil and gas industry]. Moscow, Nedra Publ., 2000. 487 p.
- Makarov A.A. Achievements and problems of strategic planning for the development of the energy sector in Russia. *Energy policy*, 2018, no. 3, pp. 2–9. In Rus.
- 3. Latypov I.S., Khmara G.A., Sushkov V.V. An approach to substantiating the choice of an energy-efficient form of twisted non-insulated

wire of an overhead power transmission line with a voltage class of 6–35 kV. *Industrial energy*, 2017, no. 4, pp. 8–12. In Rus.

- Arkhipova O.V. Principles of system analysis for sustainable electric power supply to agro-industrial complexes operating in energy isolated territories. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 723, 2021. 052032. Available at: https://doi.org/ 10.1088/1755-1315/723/5/052032 (accessed 15 January 2022).
- Godovnikov E.A., Andreeva E.G., Kovalev V.Z., Usmanov R.T. Identification of parameters of power circuits pulse energy conversion systems of electromechanical equipment. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019. Available at: https://doi.org/ 10.1088/1742-6596/1260/5/052007 (accessed 15 January 2022).

- Kovalev V.Z., Arhipova O.V., Esin S.S., Tatevosyan A.A., Scherbakov A.G. Identification of mathematical models parameters of electromechanical consumers of regionally isolated electrotechnical complexes. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019. Available at: https://doi.org/10.1088/1742-6596/1260/5/052014 (accessed 15 January 2022).
- Shubin S.S., Yamaliev V.U., Glazyrin A.S., Bunkov D.S., Kladiev S.N., Rakov I.V., Bolovin E.V., Kovalev V.Z., Khamitov R.N. Estimation of submersible induction motor equivalent circuit parameters based on test data. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 1, pp. 204–214. Available at: https://doi.org/10.18799/24131830/ 2021/1/3013 (accessed 15 January 2022).
- Smirnov V.V., Lavrenchuk T.S., Maksimenko T.S., Starchenko M.A., Chernova E.Y. Comparative analysis of the feasibility of using wires with a composite core and wires of traditional design. *Power plants and technologies*, 2018, vol. 4, no. 4, pp. 96–102. In Rus.
- Provoda neizolirovannye dlya vozdushnykh liniy elektroperedachi [Bare wires for overhead power lines. Specifications: State Standard 839-2019]. Moscow, Standardinform Publ., 2020. 39 p.
- Favorskiy O.N., Filippov S.P., Polischukh V.L. Actual problems of providing the country's energy sector with competitive equipment. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences*, 2017, vol. 87, no. 8, pp. 679–688. In Rus.
- Hota A.P., Mishra S. Loss allocation in distribution networks with distributed generators undergoing network reconfiguration. *International Journal Electrical and Computer Engineering*, 2020, vol. 10, no. 4, pp. 3375–3383.
- Tabatabaei N.M., Aghbolaghi A.J., Bizon N., Blaabjerg. F. Reactive power control in AC power systems: fundamentals and current issues. Cham, Switzerland, Springer International Publ. AG, 2017. 634 p.
- Li H., Cui H., Li C. Distribution network power loss analysis considering uncertainties in distributed generations. *Sustainability*, 2019, vol. 11, no. 5, p. 1311.
- Kovalev V.Z., Vyazigin V.L., Arhipova O.V., Yesin S.S. Probabilistic forecasting of sudden power supply interruptions of electromechanical and heat-power equipment of regionally isolated electrotechnical complex. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019. Available at: https://doi.org/10.1088/1742-6596/1260/5/052015 (accessed 15 January 2022).
- Glazyrin A.S., Langraf S.V., Isaev Y.N., Filipas A.A., Kladiev S.N., Kopyrin V.A., Leonov A.P., Khamitov R.N., Rakov I.V.,

Kovalev V.Z., Kolesnikov S.V., Lavrinovich A.V. Determination of running electrical characteristics of oil submersible cable. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 6, pp. 186–197. Available at: https://doi.org/ 10.18799/24131830/2021/06/3249 (accessed 15 January 2022).

- Ma S., Chen B., Wang Z. Resilience enhancement strategy for distribution systems under extreme weather events. *IEEE Transaction* on Smart Grid, 2018, vol. 9, no. 2, pp. 1442–1451.
- Loparev V.V., Obraztsov Y.V. On the features of modern bare wires for overhead power lines. *Science and technology*, 2014, vol. 349, no. 6, pp. 9–15. In Rus.
- Mishra S., Das D., Paul S. A comprehensive review on power distribution network reconfiguration. *Energy Systems*, 2017, vol. 8, no. 2, pp. 227–284.
- Marujo D., Zanatta G.L., Floréz H.A.R. Optimal management of electrical power systems for losses reduction in the presence of active distribution networks. *Electrical Engineering*, 2021, no. 103, pp. 1725–1736.
- Acosta J.S., Tavares M.C. Methodology for optimizing the capacity and costs of overhead transmission lines by modifying their bundle geometry. *Electric Power Systems Research*, 2021, no. 163, pp. 668–677.
- Acosta J.S., Tavares M.C. Optimal selection and positioning of conductors in multi-circuit overhead transmission lines using evolutionary computing. *Electric Power Systems Research*, 2020, no. 180, pp. 106174.
- 22. Latypov I.S. Modeling and research of bare wires for electrical complexes of consumers in the oil and gas industry in the software system of finite element analysis. *Electrical and information complexes and systems*, 2019, vol. 15, no. 3, pp. 25–30. In Rus.
- Bena L., Gall V., Kanalik M. Calculation of the overhead transmission line conductor temperature in real operating conditions. *Electrical Engineering*, 2021, vol. 103, no. 2, pp. 769–780.
- Fursanov M.I. Opredelenie i analiz poter elektroenergii v elektricheskikh setyakh energosistem [Determination and analysis of electricity losses in electrical networks of power systems]. Minsk, Belenergosnabzhenie Publ., 2006. 209 p.
- Latypov I.S., Bogachkov I.M. Provod dlya vozdushnykh liniy elektroperedachi [Wire for overhead power lines]. Patent RF, no. 2631421, 2017.

Received: 18 April 2022.

Information about the authors

Irek S. Latypov, postgraduate, Industrial University of Tyumen; engineer, Tumen Petroleum Center.

Valery V. Sushkov, Dr. Sc., professor, Industrial University of Tyumen; professor, Nizhnevartovsk State University. *Guzel A. Khmara*, Cand. Sc., associate professor, Industrial University of Tyumen.

Andrey N. Pashukov, Cand. Sc., associate professor, Industrial University of Tyumen.

Rustam N. Khamitov, Dr. Sc., professor, Industrial University of Tyumen; professor, Omsk State Technical University.

Компьютерная верстка О.Ю. Аршинова Корректура и перевод на английский язык С.В. Жаркова Дизайн обложки Т.В. Буланова

Фотографии на обложке взяты из личного архива Валерия Касаткина

Руководство для авторов и образец оформления статьи: izvestiya.tpu.ru

Подписано к печати 30.04.2022. Формат 60х84/8. Бумага «Снегурочка». Печать XEROX. Усл. печ. л. 28,96. Уч.-изд. л. 26,19. Заказ 91-22. Тираж 500 экз.

