



ISSN 2686-9993 (print)

ISSN 2686-7931 (online)

12+

НАУКИ О ЗЕМЛЕ И НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

Том
Vol. 44 № 2 2021

EARTH SCIENCES AND SUBSOIL USE

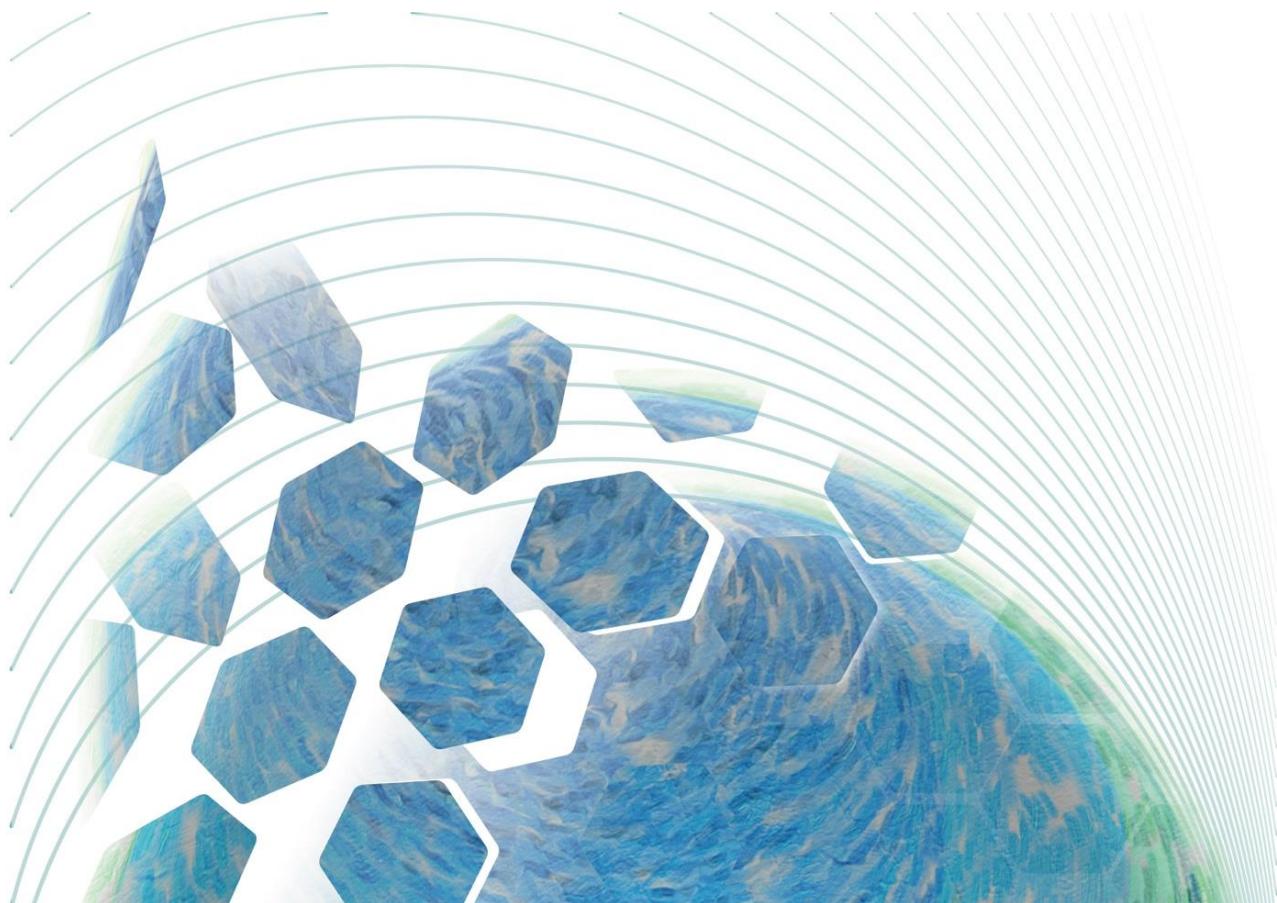
ISSN 2686-9993 (print)
ISSN 2686-7931 (online)

НАУКИ О ЗЕМЛЕ И НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

Том 44 № 2 2021
Vol. 44 № 2 2021

EARTH SCIENCES AND SUBSOIL USE

NAUKI O ZEMLE
I NEDROPOL'ZOVANIE



Редакционный совет

Кузьмин М.И., академик РАН, Институт геохимии СО РАН (г. Иркутск, Россия)
Гладкоуб Д.П., член-корр. РАН, Институт земной коры СО РАН (г. Иркутск, Россия)
Скляров Е.В., член-корр. РАН, Институт земной коры СО РАН (г. Иркутск, Россия)
Гордиенко И.В., член-корр. РАН, Геологический институт СО РАН (г. Улан-Удэ, Россия)
Корольков А.Т., д-р геол.-минерал. наук, проф., Иркутский государственный университет (г. Иркутск, Россия)
Макаров В.А., д-р геол.-минерал. наук, проф., Сибирский федеральный университет (г. Красноярск, Россия)
Очир Гэрэл, д-р геол.-минерал. наук, проф., Монгольский университет науки и технологии (г. Улан-Батор, Монголия)
Тальгамер Б.Л., д-р техн. наук, проф., Иркутский национальный исследовательский технический университет (г. Иркутск, Россия)
Ши Гуаньхай, проф., Геммологический институт Китайского геологического университета (г. Пекин, Китай)
Чжао Цзюньмэн, проф., Институт изучения Тибетского плато Китайской академии наук (г. Пекин, Китай)
Чжан Юнчжань, проф., Нанкинский университет (г. Нанкин, Китай)
Шигин А.О., д-р техн. наук, доцент, Сибирский федеральный университет (г. Красноярск, Россия)
Семинский К.Ж., д-р геол.-минерал. наук, Институт земной коры СО РАН (г. Иркутск, Россия)
Корняков М.В., д-р техн. наук, доцент, ректор, Иркутский национальный исследовательский технический университет (г. Иркутск, Россия)
Тимофеева С.С., д-р техн. наук, проф., Иркутский национальный исследовательский технический университет (г. Иркутск, Россия)
Зелинская Е.В., д-р техн. наук, проф., Иркутский национальный исследовательский технический университет (г. Иркутск, Россия)
Морин А.С., д-р техн. наук, проф., Сибирский федеральный университет (г. Красноярск, Россия)

Председатель редакционного совета:

Семинский Ж.В., д-р геол.-минерал. наук, проф., Иркутский национальный исследовательский технический университет (г. Иркутск, Россия)

Редакционная коллегия

Главный редактор:

Лобацкая Р.М., д-р геол.-минерал. наук, проф., зав. кафедрой ювелирного дизайна и технологий, Иркутский национальный исследовательский технический университет (г. Иркутск, Россия)

Заместители главного редактора:

Аузина Л.И., канд. геол.-минерал. наук, доцент, Иркутский национальный исследовательский технический университет (г. Иркутск, Россия)
Красноштанов С.Ю., канд. техн. наук, доцент, Иркутский национальный исследовательский технический университет (г. Иркутск, Россия)

Ответственный секретарь:

Храмовских В.А., канд. техн. наук, доцент, Иркутский национальный исследовательский технический университет (г. Иркутск, Россия)

Журнал «Науки о Земле и недропользование» **входит в действующий Перечень изданий ВАК для публикации основных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук**, включен в Научную электронную библиотеку (eLIBRARY.RU) для создания российского индекса научного цитирования, рассыпается в Российскую книжную палату, ВНИИТИ РАН. Журнал включен в научную электронную библиотеку CyberLeninka, в базы данных открытого доступа DOAJ, OAII, в международный каталог периодических изданий Ulrich's Periodicals Directory, в базу данных EBSCO. Журнал распространяется по подписке в каталоге агентства ЗАО ИД «Экономическая газета» «Объединенный каталог Прессы России. Газеты и журналы», подписной индекс – 41538 (ОК+ЭК) (адрес агентства ЗАО ИД «Экономическая газета»: 8 (499) 1520989; izdatcat@ideg.ru). Статьи, опубликованные в журнале, реферируются и рецензируются. В журнал принимаются статьи по научному направлению «Науки о Земле».

Журнал создан в 2004 г. на основе межвузовского сборника «Геология, поиски и разведка месторождений рудных полезных ископаемых», который издавался с 1973 г. В 2004–2017 гг. журнал выходил под названием «Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений», в 2017–2019 гг. – «Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка месторождений полезных ископаемых». В 2019 г. журнал переименован в «Науки о Земле и недропользование».

Периодичность выхода – 4 раза в год

Учредитель:
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет»

Журнал зарегистрирован
Федеральной службой по надзору в сфере
связи, информационных технологий
и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

Регистрационный номер:
ПИ № ФС77-76110 от 24.06.2019 г.

Адрес редакции, учредителя и издателя:
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный
исследовательский технический университет»,
664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

© ФГБОУ ВО «Иркутский национальный
исследовательский технический
университет», 2021

Editorial Council

Kuzmin M.I., Academician of the Russian Academy of Sciences, Institute of Geochemistry, SB RAS (Irkutsk, Russia)
Gladkochub D.P., Corresponding member of the Russian Academy of Sciences, Institute of the Earth's Crust, SB RAS (Irkutsk, Russia)
Sklyarov E.V., Corresponding member of the Russian Academy of Sciences, Institute of the Earth's Crust, SB RAS (Irkutsk, Russia)
Gordienko I.V., Corresponding member of the Russian Academy of Sciences, Geological Institute, SB RAS (Ulan-Ude, Russia)
Korolkov A.T., Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Professor, Irkutsk State University (Irkutsk, Russia)
Makarov V.A., Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Professor, Siberian Federal University (Krasnoyarsk, Russia)
Ochir Gerel, Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Professor, Mongolian University of Science and Technology (Ulan Bator, Mongolia)
Talgamer B.L., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)
Shi Guanghai, Professor, School of Gemmology, Institute of China University of Geosciences (Beijing, China)
Zhao Junmeng, Professor, Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences (Beijing, China)
Zhang Yongzhan, Professor, Nanjing University (Nanjing, China)
Shigin A.O., Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Siberian Federal University (Krasnoyarsk, Russia)
Seminsky K.Zh., Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Institute of the Earth's Crust, SB RAS (Irkutsk, Russia)
Konyakov M.V., Dr. Sci. (Eng.), Rector, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)
Timofeeva S.S., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)
Zelinskaya E.V., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)
Morin A.S., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Siberian Federal University (Krasnoyarsk, Russia)

Chairman of the Editorial Council

Seminsky Zh.V., Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Professor, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)

Editorial Board

Editor-in-Chief

Lobatskaya R.M., Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Professor, Head of the Jewelry Design & Technology Department, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)

Deputy Editors-in-Chief

Auzina L.I., Cand. Sci. (Geol. & Mineral.), Associate Professor, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)

Krasnoshtanov S.Yu., Cand. Sci. (Eng.), Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)

Executive secretary

Khramovskikh V.A., Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)

The journal "Earth sciences and subsoil use" is on the current List of publications on the main results of candidate's and doctoral theses, the State Commission for Academic Degrees and Titles of the Russian Federation. It is included in the Scientific Electronic Library (eLIBRARY.RU) in order to create the Russian Science Citation Index. It is circulated to the Russian Book Chamber and the All-Russian Institute for Scientific and Technical Information of the Russian Academy of Sciences. The journal is included in CyberLeninka (the scientific electronic library), DOAJ, OAII (open-access databases), Ulrich's Periodicals Directory, and EBSCO database. It is distributed through the catalog of JSC "Economic Newspaper" Publishing House "The united catalog. Russian press. Newspapers and journals", the subscription index 41538 (OK+EC) (address of JSC "Economic Newspaper" Publishing House: 8 (499) 1520989; izdatcat@ideg.ru). The articles published in the journal are abstracted and peer-reviewed. The journal accepts articles related to the "Earth sciences" direction.

The journal was founded in 2004 on the basis of the Interuniversity collected papers "Geology, prospecting and exploration of ore mineral deposits" that had been published since 1973. In 2004–2017, the journal was published under the title "Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Prospecting and Exploration of Ore Deposits", and in 2017–2019, "Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits". Since 2019, the title of the journal is "Earth sciences and subsoil use".

Periodicity: 4 times a year

Founder:
Federal State Budget Educational
Institution of Higher Education
'Irkutsk National Research Technical University'

The journal is registered
by the Federal Service for Supervision
of Communications, Information Technology,
and Mass Media (Roskomnadzor)

Registration No.:
PI no. FS77-76110 of June 24, 2019

Editorial Office Address: Federal State Budget
Educational Institution of Higher Education
"Irkutsk National Research Technical University",
83 Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia

© Federal State Budget Educational
Institution of Higher Education
"Irkutsk National Research
Technical University", 2021



СОДЕРЖАНИЕ

Содержание.....	94
Колонка главного редактора.....	96
Алексеева Л.П., Алексеев С.В. Стронций и изотопное отношение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ подземных рассолов северо-восточной части Ангаро-Ленского артезианского бассейна.....	98
Ангахаева Н.А., Плюснин А.М., Украинцев А.В., Чернявский М.К., Перязева Е.Г., Жамбалова Д.И. Гидрогеохимические особенности озера Котокель.....	106
Аузина Л.И., Ланкин Ю.К. Особенности проведения опытно-фильтрационных исследований в районах развития пластов с двойной пористостью.....	116
Вахромеев А.Г., Сверкунов С.А., Акчурин Р.Х., Иванишин В.М., Ружич В.В., Ташкевич И.В., Лисицын М.А. Инновационные решения в строительстве глубоких скважин на промышленные рассолы, нефть и газ в деформируемых трещинных коллекторах.....	125
Глотов В.Е. Гидрогеологические отличия геодинамически разных террейнов.....	134
Копылова Г.Н., Болдина С.В. Гидрогеологические предвестники землетрясений и вулканических активизаций по данным наблюдений в скважинах полуострова Камчатка.....	141
Кулаков В.В., Штенгелев Р.С., Матвеенко Д.В. Взаимодействие подземных и поверхностных вод в зоне Хабаровского водного узла.....	151
Павлов С.Х. Особенности строения и процессы формирования сложнопостроенного гидрогеохимического разреза в Байкальской рифтовой зоне.....	159
Хаустов А.П., Редина М.М. Идентификация природных и техногенных процессов в подземной гидросфере на основе анализа полиаренов.....	167
Хващевская А.А., Копылова Ю.Г., Новиков Д.А., Пыряев А.Н., Максимова А.А., Деркачев А.С., Редин А.А. Изотопно-гидрогеохимическая характеристика радионовых вод Белокурихинского месторождения.....	174
Шепелёв В.В. Анализ влияния криолитозоны на водообменные процессы.....	184
К сведению авторов.....	191



CONTENTS

Contents.....	95
Chief Editor's Column.....	97
Alekseeva L.P., Alekseev S.V. Strontium and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ isotopic ratio of ground brines in the northeastern Angara-Lena artesian basin.....	98
Angakhaeva N.A., Plyusnin A.M., Ukrantsev A.V., Chernyavskii M.K., Peryazeva E.G., Zhambalova D.I. Hydrogeochemical features of Lake Kotokel.....	106
Auzina L.I., Lankin Y.K. Features of ground inflow testing in the areas of double porosity aquifer development.....	116
Vakhromeev A.G., Sverkunov S.A., Akchurin R.Kh., Ivanishin V.M., Ruzhich V.V., Tashkevich I.D., Lisitsyn M.A. Innovative solutions in construction of deep industrial brine, oil and gas wells in deformable fractured reservoirs.....	125
Glotov V.E. Hydrogeological dissimilarity of geodynamically different terranes.....	134
Kopylova G.N., Boldina S.V. Hydrogeological precursors of earthquakes and volcanic activations according to observation data in Kamchatka Peninsula wells.....	141
Kulakov V.V., Shtengelov R.S., Matveenko D.V. Interaction of ground and surface water in Khabarovsk water node area.....	151
Pavlov S.Kh. Structural features and formation processes of a complex hydrogeochemical section in the Baikal rift zone	159
Khaustov A.P., Redina M.M. Polyarene analysis-based identification of natural and technogenic processes in underground hydrosphere.....	167
Khvashchevskaya A.A., Kopylova Y.G., Novikov D.A., Pyrayev A.N., Maksimova A.A., Derkachev A.S., Redin A.A. Isotope-hydrogeochemical features of the Belokurikha field radon waters.....	174
Shepelev V.V. Analysis of permafrost effect on water exchange processes.....	184
Information for the Authors.....	191



Дорогие коллеги, добрый день!



Очередной номер нашего журнала не совсем обычен. В нем не следует искать привычных рубрик – в этот раз мы отдали предпочтение только одной. С 21 по 26 июня в Иркутске пройдет крупный научный форум – XXIII Всероссийское совещание по подземным водам Сибири и Дальнего Востока, посвященное 95-летию со дня рождения выдающегося ученого-гидрогеолога, члена-корреспондента Российской академии наук, профессора Евгения Викторовича Пинеккера, а также светлой памяти организатора первых совещаний по подземным водам и инженерной геологии Восточной Сибири, доктора геолого-минералогических наук, профессора Валентины Георгиевны Ткачук. Организаторами совещания выступили Российский союз гидрогеологов, Международная ассоциация гидрогеологов, Институт земной коры Сибирского отделения Российской академии наук и Иркутский национальный исследовательский технический университет. Пользуясь таким значимым научным событием, редакционный совет журнала решил выпустить тематический номер по проблемам гидрогеологии. Ученые Сибири и Дальнего Востока в течение недели будут обсуждать широкий спектр вопросов: от гидрогеологических и гидрохимических особенностей подземных вод, складывающихся в различных геодинамических условиях, и влияния вулканических активизаций на формирование гидрогеологических предвестников землетрясений до решения практических, а нередко и инновационных задач, возникающих при эксплуатации крупных месторождений.

Журнал по определению не может заменить сборник докладов конференции, поэтому мы представляем Вам, дорогие наши читатели, только некоторые статьи, раскрывающие наиболее острые проблемы современных гидрогеологических исследований Сибирско-Дальневосточного региона. С программой конференции Вы без труда можете ознакомиться на сайте Института земной коры Сибирского отделения Российской академии наук gw2021baikal.ru.

А мы, в свою очередь, желаем участникам совещания плодотворной работы и бурных научных дебатов! *Per aspera ad astra!*

**Лобацкая Раиса Моисеевна,
главный редактор**



Dear colleagues,

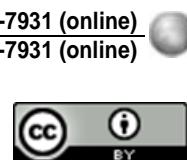
The current issue of our journal is not quite ordinary. You won't find usual sections here. This time we gave the pride of place to the only one. From June 21 to June 26 Irkutsk will host a major scientific forum – 23th All-Russian Meeting on Groundwater in Siberia and the Far East dedicated to the 95th birth anniversary of an outstanding hydrogeologist, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Professor Yevgeny Viktorovich Pinekker, as well as to the blessed memory of the organizer of the first meetings on Groundwater and Engineering Geology of Eastern Siberia, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor Valentina Georgievna Tkachuk.

The organizers of the meeting are the Russian Union of Hydrogeologists, the International Association of Hydrogeologists, the Institute of the Earth's Crust of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences and Irkutsk National Research Technical University. Taking advantage of the significant scientific event held in our city, the editorial board of the journal made a decision to publish a special issue on the problems of hydrogeology. A week the scientists from Siberia and the Far East will be discussing a wide range of problems from hydrogeological and hydrogeochemical features of groundwater caused by different geodynamic conditions and the influence of volcanic activations on the formation of hydrogeological earthquake precursors to the solution of practical and often innovative problems arising in the development of large deposits.

The journal, by definition, cannot replace the collection of conference reports, therefore, in this issue we introduce our readers to only some articles dealing with the most relevant problems of the modern hydrogeological research in the Siberian and Far Eastern region. Feel free to check for the conference program on the website of the Institute of the Earth's Crust of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences gw2021baikal.ru.

In our turn we wish the participants of the meeting fruitful work and heated scientific discussions!
Per aspera ad astra!

Raisa Lobatskaya,
The Editor-in-Chief



Оригинальная статья / Original article

УДК 556.114.6.027(571.1)

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-2-98-105>

Стронций и изотопное отношение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ подземных рассолов северо-восточной части Ангаро-Ленского артезианского бассейна

© Л.П. Алексеева^a, С.В. Алексеев^b^{a,b}Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия^aИркутский государственный университет, Иркутск, Россия

Резюме: Цель настоящего исследования заключалась в выявлении ведущих процессов формирования ионного и изотопного составов хлоридных рассолов в осадочных бассейнах Сибирской платформы. Объектом и предметом исследования стали глубокозалегающие крепкие, весьма крепкие и предельно насыщенные рассолы, содержание в них стронция и отношения его стабильных изотопов. Ионно-солевой состав подземных вод был определен традиционными методами (титриметрическим, весовым, пламенной фотометрии), изотопное отношение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ измерялось на масс-спектрометрах (г. Иркутск, Россия и Канада). Рассолы вскрыты на глубине 1500–3000 м и приурочены к соленосной и подсолевой гидрогеологическим формациям. Они характеризуются высокой минерализацией (385–530 г/дм³) и высоким содержанием стронция (2,3–7 г/дм³). Изотопное отношение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ составляет от 0,708 до 0,713062. Большинство проб рассолов по изотопному составу близко к водам венд-кембрийского палеоокеана, однако отдельные пробы рассолов из подсолевой части осадочного разреза бассейна значительно обогащены изотопом ^{87}Sr по сравнению с водами палеоокеана и другими пробами. Вероятно, это обусловлено существенным привносом ^{87}Sr в рассолы в ходе длительного взаимодействия подземных вод с вмещающими их нижнекембрийскими песчаниками.

Ключевые слова: подземные рассолы, содержание стронция, стронциевое изотопное отношение, Ангаро-Ленский артезианский бассейн

Благодарности: Авторы признательны доктору геолого-минералогических наук А.Г. Вахромееву и Е.О. Чертовских за предоставленные пробы рассолов.

Для цитирования: Алексеева Л.П., Алексеев С.В. Стронций и изотопное отношение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ подземных рассолов северо-восточной части Ангаро-Ленского артезианского бассейна. *Науки о Земле и недропользование*. 2021. Т. 44. № 2. С. 98–105. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-2-98-105>

Strontium and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ isotopic ratio of ground brines in the northeastern Angara-Lena artesian basin

© Lyudmila P. Alekseeva^a, Sergey V. Alekseev^b^{a,b}Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia^aIrkutsk State University, Irkutsk, Russia

Abstract: The purpose of this study is to identify the major formation processes of the ionic and isotopic composition of chloride brines in the sedimentary basins of the Siberian platform. The object and subject of research are deep-seated strong, very strong and extremely saturated brines as well as their strontium content and the ratio of Sr stable isotopes. The groundwater ionic-salt composition was determined by traditional methods (titrimetric, gravimetric, flame photometry), the $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ isotopic ratio was measured using mass-spectrometers (Irkutsk, Russia and Canada). The brines lying at the depth of 1500–3000 m were tapped and classified into saline and subsalt hydrogeological formations. Their feature is high salinity (385–530 g/L) and high content of strontium (2.3–7 g/L). The $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ isotopic ratio ranges from 0.708 to 0.713062. By isotopic composition most of the brine samples are close to the waters of the Vendian-Cambrian paleocean. However, some brine samples from the subsalt part of the sedimentary section of the basin are significantly enriched in the isotope ^{87}Sr compared to the paleocean waters and other samples. It could be due to the substantial input of ^{87}Sr into the brines during the long-term interaction of groundwater with the host Lower Cambrian sandstones.

Keywords: underground brines, strontium content, strontium isotopic ratio, Angara-Lena artesian basin

Acknowledgements: The authors acknowledge a gratitude to Dr. Sci. (Geol. & Mineral.) Andrey G. Vakhromeev and Evgeniy O. Chertovskikh for the provided samples of brines.

For citation: Alekseeva LP, Alekseev SV. Strontium and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ isotopic ratio of ground brines in the northeastern Angara-Lena artesian basin. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2021;44(2):98–105. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-2-98-105>



Введение

Ангаро-Ленский артезианский бассейн занимает южную часть Сибирской платформы. В его северо-восточной части открыт ряд крупных месторождений нефти и газа, продуктивные горизонты которых связаны с отложениями вендского и кембрийского возрастов. Изучение гидрогеологических условий месторождений, особенностей распространения, химического состава подземных вод является необходимым видом комплексных исследований для повышения эффективности добычи углеводородов. Несмотря на то что стронций – один из главных компонентов химического состава рассолов, сопутствующих нефтегазовым залежам, исследованию радиогенного изотопа ^{87}Sr во флюидах уделяется недостаточно внимания. Стронциевое отношение в подземных рассолах позволяет определить источник поступления стронция в раствор, а это в свою очередь дает информацию о происхождении и эволюции водоносных систем.

Материалы и методы исследования

В рамках представленного исследования химический ионно-солевой состав подземных вод был проанализирован традиционными методами в центре коллективного пользования «Геодинамика и геохронология» Института земной коры Сибирского отделения Российской академии наук (г. Иркутск). Изотопные отношения стронция в восемнадцати пробах рассолов и двух образцах песчаника измерялись на многоколлекторном масс-спектрометре МИ-1201АТ в двухленточном режиме (ленты Re-Re) на базе центра коллективного пользования «Многоэлементные и изотопные исследования» Сибирского отделения Российской академии наук (г. Новосибирск). Выделение рубидия и стронция выполнялось методом ионообменной хроматографии на кварцевых колонках [1], заполненных катионитом Dowex AG W50x8, элюентом служил 2N HCl. Правильность определения изотопных отношений стронция контролировалась параллельным измерением в каждой серии образцов изотопного стандарта Всероссийского научно-исследовательского института метрологии им. Д.И. Менделеева, отношение

$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в котором составляет $0,70800 \pm 7$ (2σ , $n = 6$), и стандартом SRM 987 (Strontium Carbonate Isotopic Standard) с отношением $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} 0,71026 \pm 6$ (2σ , $n = 6$). Кроме того, изотопный анализ стронция в восьми пробах рассолов выполнялся в компании Isotope Tracer Technologies Inc. (г. Ватерлоо, Канада) на масс-спектрометре термической ионизации Triton Thermo Scientific методом двойной дегазации рениевых нитей. Стандарты для контроля результатов были откалиброваны в соответствии со стандартом SRM 987 Национального института стандартов и технологий США (англ.: *National Institute of Standards and Technology, NIST*).

Геолого-гидрогеологические условия района

Кристаллический фундамент (AR-PR) в пределах Ангаро-Ленского артезианского бассейна вскрыт скважинами на глубине от 2000 до 4000 м и более [2–5].

Подсолевая (карбонатно-терригенная) гидрогеологическая формация (V- ϵ_1) залегает на фундаменте и сложена отложениями ушаковской и мотской свит нижнего кембра, а также рифея. Мощность формации изменяется от 500–1000 до 2000–2500 м. Водовмещающие породы представлены песчаниками, доломитами, доломито-ангидритами [6–10]. Состав рассолов в подсолевой гидрогеологической формации преимущественно хлоридный натриево-кальциевый, кальциево-натриевый, магниево-кальциевый и кальциево-магниевый. Минерализация подземных вод составляет 240–570 г/дм³.

Соленосная (галогенная) гидрогеологическая формация (ϵ_1) охватывает отложения усольской, бельской, булайской и ангарской свит раннего кембра. На долю пластов каменной соли приходится более половины их суммарной мощности. Глубина залегания соленосной формации составляет 600–2500 м. Водовмещающие отложения имеют значительную мощность (1500–2000 м). Они представлены трещиноватыми и кавернозными доломитами, известняками [3, 7, 8]. Рассолы вскрываются глубокими скважинами в стратиграфически выдержаных келорском, шелонинском, бильчирском, атовском, христофон-



ровском, балыхтинском и осинском горизонтах, а также в межсолевых карбонатных пластах-коллекторах. По химическому составу они относятся к хлоридным кальциево-магниевым, реже кальциевым. Минерализация рассолов в основном составляет 270–500, максимально – 631 г/дм³.

Результаты исследования и их обсуждение

Определение изотопного отношения стронция ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) Ангаро-Ленского артезианского бассейна выполнено в пробах рассолов из соленосной (булайская и усольская свиты) и подсолевой (непская, мотская и тетерская свиты) гидрогеологических формаций. По химическому составу рассолы хлоридные кальциевые, pH = 4–5,35, минерализация – 385–530 г/дм³, содержание стронция – 2353–7052 мг/дм³. Одна пробы хлоридного

натриевого рассола с минерализацией 95 г/дм³ была использована для сравнения (таблица).

На гистограмме (рис. 1) представлены значения отношения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, которые характерны для различных природных объектов. Кроме значений стронциевого отношения в крепких рассолах Ангаро-Ленского артезианского бассейна, насыщающих геологический разрез (V-Е₁) с мощными пластами каменной соли, здесь для сравнения также приведены значения отношения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в крепких рассолах, приуроченных к несоленосным карбонатам (Е₁-Е₂) и кимберлитам (D₃-C₁) Оленёкского артезианского бассейна [11].

Значения стронциевого отношения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в подземных водах изменяются в зависимости от содержания радиогенного стронция ^{87}Sr – продукта радиоактивного распада ^{87}Rb в первоначальных источниках – породах и водах палеоокеана. Кроме того, стронциевое

Содержание стронция и изотопное отношение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в рассолах

Ангаро-Ленского артезианского бассейна

Strontium content and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ isotopic ratio in the brines of the Angara-Lena artesian basin

Номер пробы, скважина	Место отбора пробы	Глубина отбора пробы, м	Минерализация воды, г/дм ³	Ca ²⁺ , мг/дм ³	Sr ²⁺ , мг/дм ³	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
1, скв. 3	Усольская свита, осинский горизонт	2926–3074	514,7	145	7052	0,70814
2, скв. 323		2992–3052	499,5	143,3	6706	0,70824
3, скв. 32		2599–2640	444,5	121,2	5174	0,70821
4, скв. 323		2992–3052	529,6	156,9	6795	0,708
13, скв. 1		2381	509,1	145	6514	0,708261
15, скв. 1		1559–1586	95,7	7,1	112	0,708451
14, скв. 72	Булайская свита, беркинский горизонт	1670	426,3	98,7	3452	0,708716
6, скв. 28	Мотская свита, парфеновский горизонт	2520–2530	504,6	140,5	3246	0,70846
7, скв. 28		2520–2538	497	133,5	4588	0,70835
5, скв. 97	Непская свита, ярактинский горизонт	2973–2986	384,9	92	3523	0,712521
8, скв. 175		3293–3590	390,6	94,1	3508	0,712642
9, скв. 157		3085–3094	394,5	98,7	3788	0,713062
10, скв. 247		3319–3360	389,9	94	3817	0,712532
11, скв. 1	Тетерская свита, нижнеустыкский горизонт	1956–1965	409,3	82,8	2565	0,708626
12, скв. 11	Катангская свита, преображенский горизонт	1754,5–1771	401,1	91,7	2353	0,708623
16, скв. 2231	Непская свита, верхнечонский горизонт	1650	398,3	104,9	2519	0,710123

Примечание. Курсивом приведены рассолы соленосной, прямым шрифтом – подсолевой гидрогеологической формации.

Note. Italic is used for the brines of saline hydrogeological formation; Roman face – for the brines of subsalt hydrogeological formation.

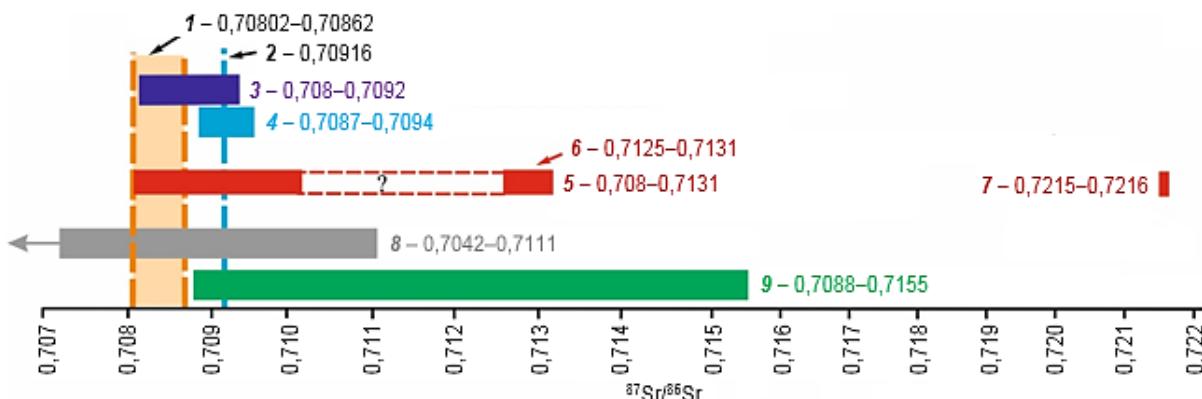


Рис. 1. Изотопное отношение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в различных природных объектах:

1 – вода палеоокеана (560–550 млн лет) [12, 13]; 2 – современная морская вода [14, 15]; 3 – рассолы несоленосных осадочных формаций (Оленекский артезианский бассейн, глубина – 115–1650 м); 4 – рассолы кимберлитов (Оленекский артезианский бассейн, глубина – 170–630 м); 5 – рассолы соленоносной и подсолевой гидрогеологических формаций (Ангаро-Ленский артезианский бассейн, глубина – 1500–3500 м; вопросительный знак – нет данных); 6 – рассолы ярактинского горизонта; 7 – песчаники ярактинского горизонта подсолевой формации (Ангаро-Ленский артезианский бассейн, глубина – 2900–3000 м); 8 – кимберлиты (глубина – 50–800 м)¹; 9 – осадочные породы (Оленекский артезианский бассейн, глубина – 265–1500 м)

Fig. 1. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ isotopic ratio in various natural objects:

1 – paleocean water (560–550 Ma) [12, 13]; 2 – modern seawater [14, 15]; 3 – brines of nonsaline sedimentary formations (the Olenek artesian basin, the depth of 115–1650 m); 4 – kimberlite brines (the Olenek artesian basin, the depth of 170–630 m); 5 – brines of saline and subsalt hydrogeological formations (the Angara-Lena artesian basin, the depth of 1500–3500 m; question mark – no data); 6 – the Yarakta horizon brines; 7 – the Yarakta horizon sandstones of the subsalt formation (the Angara-Lena Artesian basin, the depth of 2900–3000 m); 8 – kimberlites (the depth of 50–800 m)¹; 9 – sedimentary rocks (the Olenek artesian basin, the depth of 265–1500 m)

отношение зависит от литологических особенностей вмещающих пород: в терригенных – от происхождения и стадии формирования сланцев и песчаников, в карбонатных – от возраста и степени изменения морских карбонатов, эвапоритов и фосфоритов [9, 16, 17].

Крепкие хлоридные кальциевые рассолы соленоносной и подсолевой формаций Ангаро-Ленского артезианского бассейна находятся в гидродинамической зоне пассивного водообмена, то есть в обстановке высокой гидрогеологической закрытости. Формирование химического состава рассолов происходило в результате метаморфизации захороненной рапы солеродного бассейна на рубеже венда и кембрия в процессе последующего взаимодействия с терригенными и карбонатными породами. Первоначальные стронциевые отношения палеоокеана в венд-кембрийское время (575–550 млн лет) изменились в пределах 0,70802–0,70862 [12, 13]. Изотопное отношение стронция $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в рассолах соленоносной гидрогеологической формации изменяется

в узком интервале – 0,708–0,708716; в рассолах подсолевой формации этот диапазон гораздо шире – 0,70835–0,713062 (рис. 2).

Практически все значения стронциевого отношения, измеренные в пробах рассолов соленоносной и подсолевой гидрогеологических формаций, укладываются в диапазон между значениями в современной морской воде и воде палеоокеана. Исключение составляют рассолы ярактинского горизонта (подсолевая гидрогеологическая формация), которые формируют на графиках особую группу, отличающуюся наиболее высокими значениями стронциевого отношения (0,71252–0,71306) при содержании Sr^{2+} 3,5–3,8 г/дм³. Они намного превышают значения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в современной морской воде и в воде палеоокеана на рубеже венда и кембрия. Возникает вопрос: в чем причина высокого содержания радиогенного стронция в крепких рассолах и каков его источник. Очевидно, ответ кроется в истории накопления венд-кембрийской осадочной толщи Сибирской платформы.

¹ Масловская М.Н. Изотопный состав стронция в кимберлитах Якутии и проблема их генезиса: дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Иркутск, 1985. 195 с.

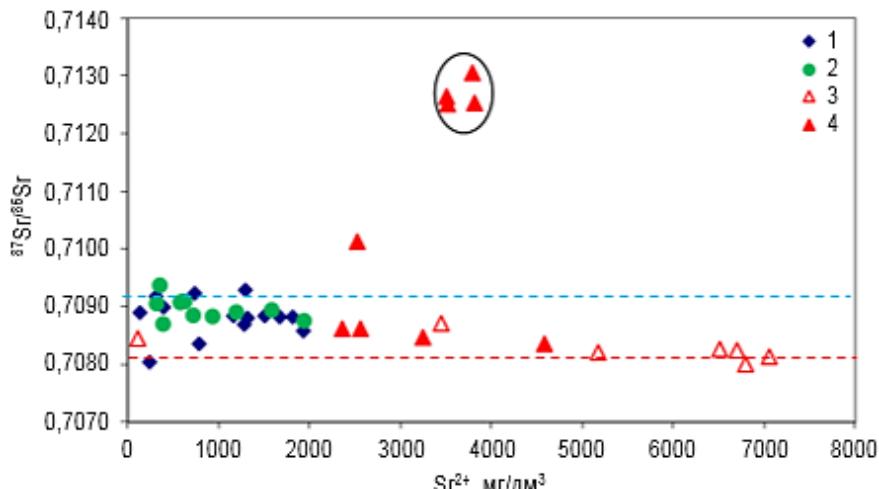


Рис. 2. Зависимость изотопного отношения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ от содержания стронция в рассолах:

1 – карбонатных пород Оленёкского артезианского бассейна; 2 – кимберлитов Оленёкского артезианского бассейна; 3 – соленосной гидрогеологической формации Ангаро-Ленского артезианского бассейна; 4 – подсолевой гидрогеологической формации Ангаро-Ленского артезианского бассейна
Линии голубого цвета – современная морская вода, красного цвета – вода палеоокеана,
в овале – рассолы ярактинского горизонта

Fig. 2. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ isotopic ratio vs strontium content in the brines of:

1 – carbonate rocks of the Olenek artesian basin; 2 – kimberlites of the Olenek artesian basin;
3 – saline hydrogeological formation of the Angara-Lena artesian basin; 4 – subsalt hydrogeological
formation of the Angara-Lena artesian basin
Blue lines – modern seawater, red lines – paleocean water, in an oval – Yarakta horizon brines

Ярактинский нефтегазоносный горизонт приурочен к непской свите в базальной части осадочного чехла, глубина его залегания составляет 2600–2700 м. Накопление существенно песчаных отложений ярактинского горизонта в непское время позднего венда (575–585 млн лет) происходило в условиях мелкого шельфа и прибрежной равнины, временами заливавшейся морем [9, 18, 19]. Основным источником сноса обломочного материала были внутренние районы Сибирской платформы, а также локальные выступы гетерогенного фундамента. Временные потоки переносили значительное количество продуктов разрушения горных пород, вероятно, обогащенных рубидием, которые в первую очередь заполняли песчано-алевролитистым материалом эрозионные формы рельефа и прилегающие территории [20]. Вследствие этого повышалось содержание радиогенного стронция и стронциевого отношения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в породах. При трансгрессии моря устанавливалась морская обстановка осадконакопления, в результате чего сформировался глинистый слой, представленный аргиллитами от зеленовато-серых до черных, слабослюдистых, пиритизированных, вероятно, с повышенным

стронциевым отношением. Последующие процессы преобразования песчаников, алевролитов и аргиллитов ярактинского горизонта и взаимодействие подземных вод с породами, обогащенными радиогенным стронцием, приводили к переходу ^{87}Sr в раствор. Измеренное отношение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в песчаниках ярактинского горизонта с глубины 3000 м составляет 0,721507–0,721603, что однозначно подтверждает источник повышенного изотопного отношения в рассолах подсолевой гидрогеологической формации.

Заключение

Значения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в хлоридных кальциевых рассолах соленосной и подсолевой гидрогеологических формаций Ангаро-Ленского артезианского бассейна в основном корреспондируют со стронциевым отношением в воде кембрийского палеоокеана. Исключение составляют рассолы ярактинского горизонта, значительно обогащенные радиогенным стронцием, вероятным источником которого в растворах являются терригенные отложения (песчаники) с высоким значением отношения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ благодаря процессам взаимодействия в системе «вода – порода».

**Список литературы**

1. Pin C., Briot D., Bassin C., Poitrasson F. Concomitant separation of strontium and samarium-neodymium for isotopic analysis in silicate samples, based on specific extraction chromatography // *Analytica Chimica Acta*. 1994. Vol. 298. P. 209–217.
2. Геология нефти и газа Сибирской платформы / ред. А.Э. Конторович, В.С. Сурков, А.А. Трофимук. М.: Недра, 1981. 552 с.
3. Жарков М.А. Палеозойские соленосные формации мира. М.: Недра, 1973. 392 с.
4. Вахромеев А.Г. Закономерности формирования и локализации месторождений промышленных рассолов в карбонатных каверново-трещинных резервуарах кембрия юга Сибирской платформы: монография. Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2015. 247 с.
5. Анциферов А.С., Букаты М.Б., Дзюба А.А., Пиннекер Е.В., Сурнин А.И., Шварцев С.Л. Геологические запасы промышленных рассолов основных нефтегазоносных регионов Лено-Тунгусской провинции // Геология и проблемы поисков новых крупных месторождений нефти и газа в Сибири: сб. стат. / гл. ред. А.Э. Конторович, В.С. Сурков. Ч. I. Новосибирск: Изд-во СНИИГ-ГиМС, 1996. С. 139–142.
6. Пиннекер Е.В. Проблемы региональной гидрогеологии: закономерности распространения и формирования подземных вод. М.: Наука, 1977. 196 с.
7. Пиннекер Е.В. Рассолы Ангаро-Ленского артезианского бассейна: закономерности размещения, состав, динамика, формирование и использование. М.: Наука, 1966. 332 с.
8. Стратиграфия нефтегазоносных бассейнов Сибири. Рифей и венд Сибирской платформы и ее складчатого обрамления / ред. Н.В. Мельников. Новосибирск: Гео, 2005. 428 с.
9. Мельников Н.В. Венд-кембрейский соленосный бассейн Сибирской платформы: стратиграфия, история развития. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. 146 с.
10. Шемин Г.Г. Геология и перспективы нефтегазоносности венда и нижнего кембрия центральных районов Сибирской платформы (Непско-Ботубинская, Байкитская антиклизы и Катангская седловина). Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. 467 с.
11. Алексеева Л.П., Алексеев С.В. Геохимия подземных льдов, соленых вод и рассолов криоартезианских бассейнов северо-востока Сибирской платформы // Геология и геофизика. 2018. Т. 59. № 2. С. 183–197. <https://doi.org/10.15372/GiG20180204>
12. McArthur J.M., Howarth R.J., Shields G.A. Strontium isotope stratigraphy // The geologic time scale / eds. F.M. Gredstein, J.G. Ogg, M.D. Schmitz, G.M. Ogg. Oxford: Elsevier, 2012. P. 127–144.
13. Вишневская И.А., Кочнев Б.Б., Летникова Е.Ф., Киселева В.Ю., Писарева Н.И. Sr-изотопные характеристики хорбусонской серии венда Оленекского поднятия (северо-восток Сибирской платформы) // Доклады Академии наук. 2013. Т. 449. № 3. С. 317–321. <https://doi.org/10.7868/S0869565213090247>
14. Banner J.L. Radiogenic isotopes: systematics and applications to earth surface processes and chemical stratigraphy // Earth-Science Reviews. 2004. Vol. 65. Iss. 3-4. P. 141–194. [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(03\)00086-2](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(03)00086-2)
15. Lackschewitz K.S., Devey W., Stoffers P., Botz R., Eisenhauer A., Kummetz M., et al. Mineralogical, geochemical and isotopic characteristics of hydrothermal alteration processes in the active, submarine, felsic-hosted PACMANUS field, Manus Basin, Papua New Guinea // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2004. Vol. 68. Iss. 21. P. 4405–4427. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2004.04.016>
16. Mazumdar A., Strauss H. Sulfur and strontium isotopic compositions of carbonate and evaporite rocks from the Late Neoproterozoic – Early Cambrian Bilara group (Nagaur-Ganganagar basin, India): constraints on intra-basinal correlation and global sulfur cycle // *Precambrian Research*. 2006. Vol. 149. Iss. 3-4. P. 217–230. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2006.06.008>
17. Melezlik V.A., Pokrovsky B.G., Fallick A.E., Kuznetsov A.B., Bujakaite M.I. Constraints on $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ of Late Ediacaran seawater: insight from Siberian high-Sr limestones // *Journal of the Geological Society*. 2009. Vol. 166. Iss. 1. P. 183–191. <https://doi.org/10.1144/0016-76492007-171>
18. Савинкин П.Т., Кузнецов В.Г., Илюхин Л.Н., Тихомирова Г.И. Фациально-палеогеоморфологическая обстановка формирования ярактинского горизонта юго-восточной части Непско-Ботубинской антиклизы // Геология нефти и газа. 1991. № 12. С. 8–11.
19. Александров В.М., Белкина В.А., Казанская Д.А. Концептуальная геологическая модель продуктивных отложений ярактинского горизонта // Территория «Нефтегаз». 2016. № 6. С. 30–39.
20. Коновалцева Е.С. Вторичные процессы в породах-коллекторах продуктивных отложений Ярактинского месторождения // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2010. Т. 5. № 1. [Электронный ресурс]. URL: http://www.ngtp.ru/rub/2/18_2010.pdf (18.02.2021).

References

1. Pin C., Briot D., Bassin C., Poitrasson F. Concomitant separation of strontium and samarium-neodymium for isotopic analysis in silicate samples, based on specific extraction chromatography. *Analytica Chimica Acta*. 1994;298:209–217.
2. Kontorovich AE, Surkov VS, Trofimuk AA. *Oil and gas geology of the Siberian platform*. Moscow: Nedra; 1981. 552 p. (In Russ.)
3. Zharkov MA. *Paleozoic saline formation*. Moscow: Nedra; 1973. 392 p. (In Russ.)



4. Vakhromeev AG. *Patterns of industrial brine deposits formation and localization in cambrian carbonated vuggy-fractured rocks reservoir of south Siberian plate*. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University; 2015. 247 p. (In Russ.)
5. Antsiferov AS, Bukaty MB, Dzyuba AA, Pinneker EV, Surnin AI, Shvartsev SL. Geological reserves of industrial brines in the main oil and gas regions of the Lena-Tunguska province. In: Kontorovich AE, Surkov VS (eds.). *Geologiya i problemy poiskov novykh krupnykh mestorozhdenii nefti i gaza v Sibiri = Geology and prospecting problems of new large oil and gas fields in Siberia*. Part I. Novosibirsk: Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources; 1996. p.139–142. (In Russ.)
6. Pinneker EV. *Problems of regional hydrogeology: patterns of groundwater distribution and formation*. Moscow: Nauka; 1977. 196 p. (In Russ.)
7. Pinneker EV. *Brines of the Angara-Lena artesian basin: distribution patterns, composition, dynamics, formation and use*. Moscow: Nauka; 1966. 332 p. (In Russ.)
8. Mel'nikov NV. *Stratigraphy of oil and gas basins of Siberia. Riphean and vendian of Siberian platform and plaited border*. Novosibirsk: Geo; 2005. 428 p. (In Russ.)
9. Mel'nikov NV. *Vendian-Cambrian saline basin of the Siberian platform: stratigraphy, evolution*. Novosibirsk: Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2009. 146 p. (In Russ.)
10. Shemin GG. *Geology and oil-and-gas potential of the Vendian and Lower Cambrian central regions of the Siberian Platform (Nepa-Botuoba, Baikit antecline and Katanga saddle)*. Novosibirsk: Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2007. 467 p. (In Russ.)
11. Alekseeva LP, Alekseev SV. Geochemistry of ground ice, saline groundwater, and brines in the cryoartesian basins of the northeastern Siberian Platform. *Geologiya i geofizika*. 2018;59(2):183–197. (In Russ.) <https://doi.org/10.15372/GiG20180204>
12. McArthur JM, Howarth RJ, Shields GA. Strontium isotope stratigraphy. In: Gredstein FM, Ogg JG, Schmitz MD, Ogg GM (eds.). *The geologic time scale*. Oxford: Elsevier; 2012. p.127–144.
13. Vishnevskaya IA, Kochnev BB, Letnikova EF, Kiseleva VYu, Pisareva NI. Sr-isotope characteristics of the Khorbusuon Group of the Vendian Olenek Uplift (northeast of the Siberian Platform). *Doklady Akademii nauk*. 2013;449(3):317–321. (In Russ.) <https://doi.org/10.7868/S0869565213090247>
14. Banner JL. Radiogenic isotopes: systematics and applications to earth surface processes and chemical stratigraphy. *Earth-Science Reviews*. 2004;65(3-4):141–194. [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(03\)00086-2](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(03)00086-2)
15. Lackschewitz KS, Devey W, Stoffers P, Botz R, Eisenhauer A, Kummetz M, et al. Mineralogical, geochemical and isotopic characteristics of hydrothermal alteration processes in the active, submarine, felsic-hosted PACMANUS field, Manus Basin, Papua New Guinea. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2004;68(21):4405–4427. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2004.04.016>
16. Mazumdar A, Strauss H. Sulfur and strontium isotopic compositions of carbonate and evaporite rocks from the Late Neoproterozoic – Early Cambrian Bilara group (Nagaur-Ganganagar basin, India): constraints on intrabasinal correlation and global sulfur cycle. *Precambrian Research*. 2006;149(3-4): 217–230. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2006.06.008>
17. Melezlik VA, Pokrovsky BG, Fallick AE, Kuznetsov AB, Bujakaite MI. Constraints on $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ of Late Ediacaran seawater: insight from Siberian high-Sr limestones. *Journal of the Geological Society*. 2009;166(1):183–191. <https://doi.org/10.1144/0016-76492007-171>
18. Savinkin PT, Kuznetsov VG, Ilyukhin LN, Tikhomirova GI. Facies-paleogeomorphologic environment of the formation of the Yaraktin horizon, southeastern Nepka-Botuoba antecline. *Geologiya nefti i gaza = Russian Oil and Gas Geology*. 1991;12:8–11. (In Russ.)
19. Alexandrov VM, Belkina VA, Kazanskaya DA. Conceptual geological model of Yarakta horizon production deposits. *Territoriya "Neftegaz" = Oil and Gas Territory*. 2016;6:30–39. (In Russ.)
20. Konovalceva ES. Secondary processes in reservoir rocks of productive sediments of Yaraktinski deposit. *Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika = Petroleum Geology – Theoretical and Applied Studies*. 2010;5(1). Available from: http://www.ngtp.ru/rub/2/18_2010.pdf [Accessed 18th February 2021]. (In Russ.)

Сведения об авторах / Information about the authors



Алексеева Людмила Павловна,
доктор геолого-минералогических наук,
ведущий научный сотрудник Лаборатории гидрогеологии,
Институт земной коры СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия,
✉ e-mail: lalex@crust.irk.ru

Lyudmila P. Alekseeva,
Dr. Sci. (Geol. & Mineral.),
Leading Researcher of the Laboratory of Hydrogeology,
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
128 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia,
✉ e-mail: lalex@crust.irk.ru



Алексеев Сергей Владимирович,
доктор геолого-минералогических наук,
заведующий Лабораторией гидрогеологии,
Институт земной коры СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия,
e-mail: salex@crust.irk.ru
Sergey V. Alekseev,
Dr. Sci. (Geol. & Mineral.),
Head of the Laboratory of Hydrogeology,
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
128 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia,
e-mail: salex@crust.irk.ru

Заявленный вклад авторов / Contribution of the authors

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов / Conflict of interests

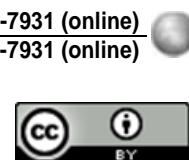
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.
The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 05.03.2021; одобрена после рецензирования 09.04.2021; принята к публикации 12.05.2021.

The article was submitted 05.03.2021; approved after reviewing 09.04.2021; accepted for publication 12.05.2021.



Оригинальная статья / Original article

УДК 556.332.62

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-2-106-115>

Гидрогеохимические особенности озера Котокель

© Н.А. Ангахаева^a, А.М. Плюснин^b, А.В. Украинцев^c,
М.К. Чернявский^d, Е.Г. Перязева^e, Д.И. Жамбалова^f

^{a-f}Геологический институт СО РАН, г. Улан-Удэ, Россия

Резюме: Цель данного исследования заключалась в определении основных гидрохимических параметров глубинных вод озера Котокель, выявлении роли питающих его подземных вод, а также установлении особенностей пространственного распределения макро- и микроэлементов по акватории озера. Полевые работы были проведены в ледовый и безледный сезоны года. Пробы воды отобраны у дна озера специальным пробоотборником. На месте отбора проб образцы воды были профильтрованы через фильтры с размером пор 0,45 мкм. Воду для анализа отбирали в пластиковые бутылки. Пробы воды на микроэлементы помещали в полипропиленовые контейнеры (15 мл), предварительно обработанные азотной кислотой 0,1N. Анализ макрокомпонентного состава воды был выполнен в сертифицированной Лаборатории гидрогеологии и геэкологии Геологического института Сибирского отделения Российской академии наук (г. Улан-Удэ) по стандартным методикам, предназначенным для пресных и соленых вод. Катионы (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+) определены методом атомной абсорбции, F^- , SiO_2 – колориметрическим, HCO_3^- , CO_3^{2-} и Cl^- – титриметрическим, SO_4^{2-} – турбидиметрическим методами. Анализ содержания микроэлементов проводился в Лаборатории водной микробиологии Лимнологического института Сибирского отделения Российской академии наук (г. Иркутск) методом индуктивно связанной плазмы на квадрупольном масс-спектрометре Agilent 7500ce. В результате проведенных исследований установлен неоднородный химический состав озерной воды, связанный с разгрузкой трещинно-жильных вод по разломам, ограничивающим впадину с юго-востока и северо-востока и пересекающим акваторию озера от острова к реке Исток. Наиболее высокое содержание растворенных веществ зафиксировано в проливе между островом Монастырский и западным берегом озера: здесь обнаружены максимальные значения гидрокарбонат-иона, общей минерализации. Максимальные содержания сульфат-иона обнаружены в южной и юго-восточной частях озера. Дисперсия в распределении микроэлементов достигает нескольких математических порядков. Наиболее изменчива концентрация железа, марганца, меди, цинка, свинца, фосфора, молибдена,вольфрама, стронция. Их высокие содержания обнаружены в озерной воде в пределах расположения разрывных нарушений северо-восточного простирания. Таким образом, химический состав воды озера Котокель в значительной степени формируется за счет трещинно-жильных вод. Разгрузка этих вод происходит по тектоническим нарушениям северо-восточного простирания. В ходе исследования было выделено два очага субаквальной разгрузки, которые характеризуются формированием в озерной воде двух разных ассоциаций микроэлементов. Состав микроэлементов в трещинно-жильных водах определяется разной степенью их взаимодействия с горными породами.

Ключевые слова: озеро, разломы, трещинно-жильные воды, микроэлементы, зональность химического состава воды

Благодарности: Исследование выполнено в рамках государственного бюджетного проекта AAAA-A21-121011890033-1, частично работы финансировались по гранту РФФИ № 18-45-030003.

Для цитирования: Ангахаева Н.А., Плюснин А.М., Украинцев А.В., Чернявский М.К., Перязева Е.Г., Жамбалова Д.И. Гидрогеохимические особенности озера Котокель. *Науки о Земле и недропользование*. 2021. Т. 44. № 2. С. 106–115. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-2-106-115>

Hydrogeochemical features of Lake Kotokel

© Nadezhda A. Angakhaeva^a, Alexey M. Plyusnin^b, Alexander V. Ukraintsev^c,
Mikhail K. Chernyavskii^d, Elena G. Peryazeva^e, Dashima I. Zhambalova^f

^{a-f}Geological Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude, Russia

Abstract: The purpose of this study is to determine the main hydrochemical parameters of Lake Kotokel deep waters, to identify the role of groundwater feeding it, as well as to establish the features of spatial distribution of macro- and micro-elements in the lake. Field work was carried out during the ice and ice-free seasons. A special sampler was used to take water samples from the bottom of the lake. Water samples were filtered through the filters with a pore size of 0.45 μm at the sampling site. Plastic bottles were used for the water samples for analysis. Polypropylene containers (15 ml) pretreated with 0.1 N nitric acid were used for the water samples for trace elements. The analysis of the macrocomponent composition of water was carried out in a certified Laboratory of Hydrogeology and Geoecology of the Geological Institute of the Siberian



Branch of the Russian Academy of Sciences (Ulan-Ude) according to the standard methods intended for fresh and saline waters. Cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+) were determined by atomic absorption, F^- , SiO_2 – by the colorimetric method, HCO_3^- , CO_3^{2-} and Cl^- – by the titrimetric method, SO_4^{2-} – by the turbidimetric method. The analysis of the trace element content was carried out in the Laboratory of Aquatic Microbiology at the Limnological Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Irkutsk) by the method of inductively coupled plasma on Agilent 7500ce quadrupole mass spectrometer. Conducted research made it possible to determine an inhomogeneous chemical composition of lake water associated with the discharge of fissure-vein waters along the faults that bound the depression from the southeast and northeast and intersect the lake water area from the island to the Istok river. The highest content of dissolved substances was recorded in the strait between Monastyrsky island and the western shore of the lake; the maximum values of hydrocarbonate ion and total mineralization were found here. The maximum content of sulfate ion was found in the southern and southeastern parts of the lake. The dispersion in microelement distribution reaches several mathematical orders. The most variable concentration is characteristic of iron, manganese, copper, zinc, lead, phosphorus, molybdenum, tungsten, strontium. Their high contents were found in the lake water within the location of faults of northeast strike. Therefore, the chemical composition of the water of Lake Kotokel is largely formed by fissure-vein waters. This water is discharged along the tectonic faults of the northeastern strike. The research revealed two centers of subaqueous discharge, which are characterized by the formation of two different associations of microelements in the lake water. The composition of microelements in fissure-vein waters is determined by their interaction degrees with rocks.

Keywords: lake, faults, fissure-vein waters, microelements, zoning of water chemical composition

Acknowledgements: The research was carried out within the framework of the state budget project AAAA-A21-121011890033-1, the work was partially funded by the Russian Foundation for Basic Research, grant no.18-45-030003.

For citation: Angakhaeva NA, Plyusnin AM, Ukrantsev AV, Chernyavskii MK, Peryazeva EG, Zhambalova DI. Hydrogeochemical features of Lake Kotokel. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2021;44(2):106–115. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-2-106-115>

Введение

Формирование ресурсов и химического состава воды озер часто связано с разгрузкой подземных вод [1–4]. Особенno это актуально для Байкальской рифтовой зоны, где широко распространены открытые разрывные нарушения [5, 6]. Здесь на формирование химического состава вод водоемов оказывает влияние разгрузка азотных термальных вод [7, 8]. Они привносят в водоемы биоактивные элементы, что благоприятно сказывается на развитии микроводорослей и водной растительности [9, 10].

Озеро Котокель расположено на восточном побережье среднего Байкала в 2 км от него, между устьями рек Турка и Кика. Длина озера достигает 15 км, ширина – около 5 км, площадь зеркала составляет 70 км², площадь водосбора – 183 км². Озеро относится к водоемам с очень малым удельным водосбором, показатель которого равен 2,6. Глубина его составляет 4–6 м, максимальная глубина – около 14 м. Из озера вытекает одна река – Исток, направление течения которой может меняться несколько раз за лето, что происходит из-за колебания уровня воды в озере [11]. Основной объем стока приходится на теплое время года. Небольшая глубина способствует тому, что вода в озере летом быстро прогре-

вается до температуры 24–25 °С. Проведенные ранее исследования показали, что котловина озера интенсивно разбита разрывными нарушениями [12], по которым в него разгружаются трещинно-жильные воды. Эти воды привносят в своем составе микроэлементы, высокие содержания которых характерны для термальных вод [13]. Насколько существен этот вклад в ресурсы и в какой мере данные микроэлементы оказывают влияние на гидрохимический режим озера, неизвестно. Этот пробел в исследовании озера мы попытались восполнить представленной публикацией.

Материалы и методы

исследования

Авторами данной статьи были проведены полевые исследования и лабораторные работы. Полевые исследования проводились в 2018–2020 гг. в ледовый и безледный сезоны года. Опробование воды происходило со льда или с лодки. Профили опробования воды задавались в местах предполагаемой разгрузки трещинно-жильных вод. На месте отбора проб воды с помощью GPS-навигатора определялись географические координаты. Температуру воды t и водородный показатель pH измеряли на глубине 1,5 м. Пробы воды отбирались у дна озера специальным пробо-



отборником. Воду для анализа макрокомпонентного состава помещали в пластиковые бутылки. Для определения микроэлементов водой заполняли полипропиленовые контейнеры (15 мл), предварительно обработанные в лаборатории азотной кислотой 0,1N. На месте отбора проб образцы воды для отделения взвешенных веществ были профильтрованы через фильтры с размером пор 0,45 мкм и подкислены дважды перегнанной азотной кислотой 0,1N до pH = 1–2. Анализ макрокомпонентного состава воды выполнен в сертифицированной Лаборатории гидрогеологии и геоэкологии Геологического института Сибирского отделения Российской академии наук (г. Улан-Удэ) по стандартным методикам для пресных и соленых вод. Катионы (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+) определяли методами атомной абсорбции, F^- , SiO_2 – колориметрическим, HCO_3^- , CO_3^{2-} и Cl^- – титриметрическим, SO_4^{2-} – турбидиметрическим методами. Анализ содержания микроэлементов проводился в Лаборатории водной микробиологии Лимнологического института Сибирского отделения Российской академии наук (г. Иркутск) методом индуктивно связанной плазмы на квадрупольном масс-спектрометре Agilent 7500ce.

Геолого-гидрогеологические условия района

По схеме тектонического районирования озеро Котокель находится в пределах Котокельской впадины. С юго-западной и западной стороны впадина сочленяется с Кикинской котловиной. С северо-запада и севера депрессия отделяется от Среднего Байкала Котокельской грядой, которая к северу продолжается низкой горной дугой хребта Черная Грива, а на юге смыкается с отрогом Морского хребта. Северо-восточный край котловины через долину реки Коточик соединяется с Нижнетуркинской впадиной. Со стороны южной суходольной части впадина отделена от Зезивандинского структурного понижения одноименным отрогом. В морфоструктурном отношении Котокельская депрессия представляет собой южный отрезок Кикинско-Котокельско-Коточик-Туркинской группы впадин в пределах переходной части рельефа от Байкальского рифта к передовой ступени хребта

Улан-Бургасы. В геологическом строении территории озера Котокель принимают участие стратифицированные осадочные породы кайнозоя, интрузивные образования разного возраста [14]. Озеро находится в пределах Байкальской гидрогеологической складчатой области в бассейне трещинных вод хребтов Хамар-Дабан, Морской и Улан-Бургасы. Водоносные горизонты трещинных вод разгружаются в озеро по разломам сбросового типа, которые широко развиты в районе исследования. Они образовались в результате общего вздыбления побережья Байкала в голоцене. В исторически сложившихся тектонических условиях они испытывают растяжение, по ним до сих пор в результате изостазии после таяния ледников происходят подвижки в вертикальном направлении [15]. Зияющие сбросы остаются открытыми для движения вод, на глубине они гидравлически связаны друг с другом. Общее направление движения этих вод – к северо-востоку, в сторону Байкала.

Результаты исследования

По нашим представлениям в районе Котокельской впадины некоторые блоки горных пород фундамента в результате тектонических движений по листрическим сбросам оказались более глубокоопущенными, из-за этого происходит перехват потока подземных вод, подъем их на поверхность и разгрузка в озеро. Наиболее активная разгрузка наблюдается по разломам, ограничивающим впадину с юго-востока и северо-востока. Наиболее глубоко проникающие в недра воды разгружаются в районе вытекания из озера реки Исток. Здесь ранее нами были выявлены повышенные содержания гелия в эманациях свободно выделяющегося газа из донных отложений [13].

Для перехвата трещинно-жильных вод пробы отбирались по линии, располагающейся вкрест простирация предполагаемых разломов (рис. 1). Предварительно в предполагаемом месте опробования проводилось измерение температуры воды.

Всего было отобрано 39 проб озерных вод. Были сформированы выборки по месту отбора, средние содержания представлены в таблице.

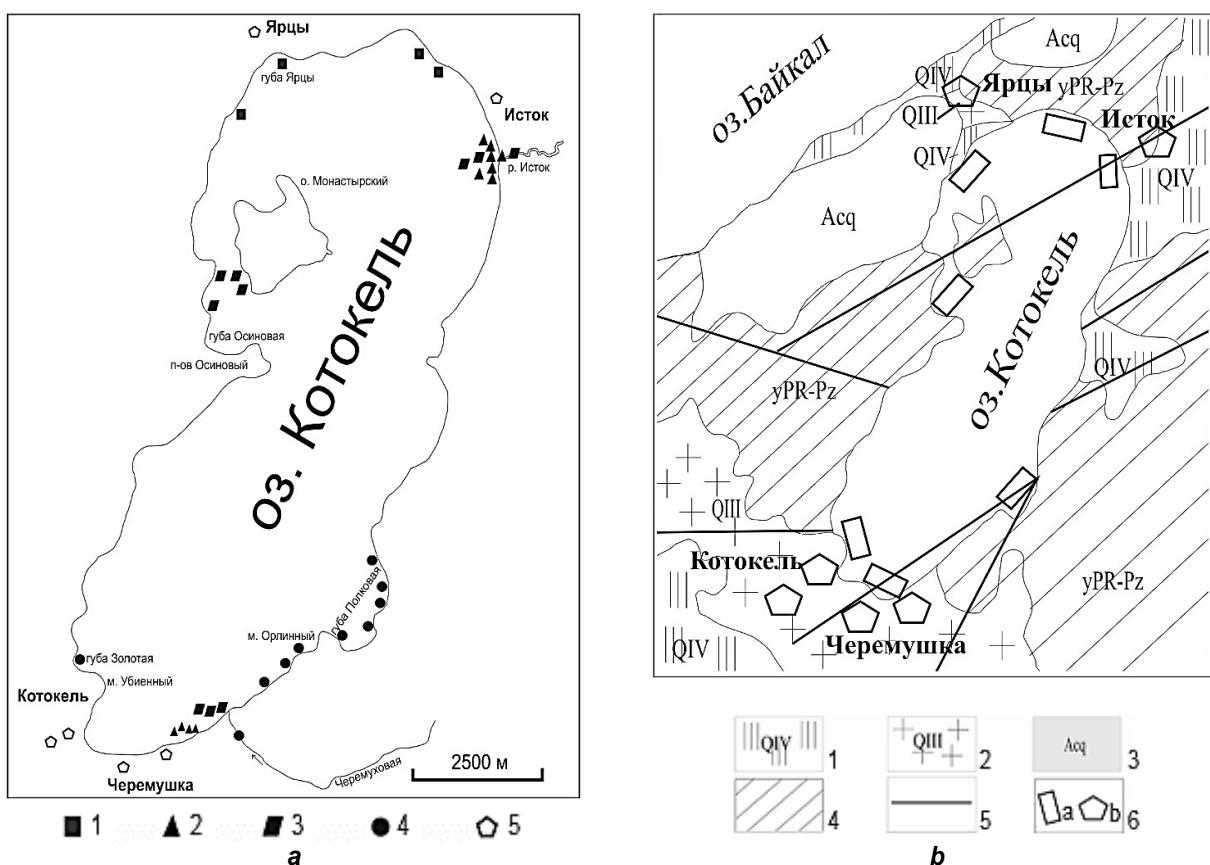


Рис. 1. Гидролого-гидрохимическая схема района исследования с местами опробования поверхностных и подземных вод в разные годы:

**a – карта-схема мест отбора гидрохимических проб на озера Котокель в 2018–2020 гг.:
1–4 – опробования поверхностных вод по датам: 1 – 22 июля 2018 г., 2 – 11 апреля 2019 г.,
3 – 12 июля 2019 г., 4 – 29 июля 2020 г.; 5 – опробования подземных вод;**

b – гидрохеологическая карта района расположения озера:

- 1 – водоносные горизонты современных четвертичных отложений (валуны, галечники, пески, суглиники),
- 2 – водоносный горизонт верхнечетвертичных отложений (пески, глины, супеси), 3 – подземные воды зоны экзогенной трещиноватости метаморфических пород Черногривенской свиты,
- 4 – воды зоны трещиноватости интрузивных пород разного возраста, 5 – разломы,
- 6 – районы исследования: а – поверхностных вод, б – подземных вод

Fig. 1. Hydrological and hydrogeological diagram of the study area with the sampling sites of surface and ground waters in different years:

a – schematic map of the hydrochemical sampling places on Lake Kotokel in 2018–2020:

- 1–4 – surface water sampling by dates: 1 – July 22, 2018, 2 – April 11, 2019,
3 – July 12, 2019, 4 – July 29, 2020; 5 – groundwater sampling;

b – hydrogeological map of the lake area:

- 1 – aquifers of modern Quaternary sediments (boulders, pebbles, sands, loams),
- 2 – an aquifer of Upper Quaternary sediments (sands, clays, sandy loams), 3 – groundwaters of the zone of exogenous fracturing of metamorphic rocks of the Chernogrivenkaya suite,
- 4 – waters of the fractured zone of intrusive rocks of different ages, 5 – faults,
- 6 – study areas of: a – surface waters, b – groundwater

Из представленных результатов видно, что содержание макрокомпонентов в разных частях озера существенно различается. Наиболее высокое содержание растворенных веществ зафиксировано в проливе между островом и западным берегом озера. В этих пробах обнаружены максимальные значения гидрокарбонат-иона. Максимальные содержания

сульфат-иона обнаружены в южной и юго-восточной частях озера. В ледовый период в районе реки Исток обнаружены относительно высокие концентрации нитрата и кремниевой кислоты, а у села Черемушки – максимальное содержание гидрокарбоната. Общая минерализация воды в этом районе возросла по сравнению с летним периодом в 1,3 раза.



Средний макрокомпонентный состав воды озера Котокель в местах опробования
Average macrocomponent composition of Lake Kotokel water in the sampling sites

Дата опробования	pH	t, °C	Na	Ca	Mg	Fe ⁺³	HCO ₃	NO ₃	SO ₄	Cl	F	H ₄ SiO ₄	Минерализация
Село Ярцы, мг/л													
24.06.2018	7,28	19,7	17,5	4	1,6	1,1	54,13	4,5	2,83	4,6	0,15	2,13	92
Река Исток													
12.07.2019	7,35	23,9	14,1	6,7	2,3	0,1	45,1	3	1,95	10,8	0,27	16,75	95
Село Черёмушки, мг/л													
12.07.2019	6,6	23,9	16	7,4	2,3	0,2	50,8	0,6	1,87	13,3	0,24	16	77,7
Юго-западная часть острова Монастырский, мг/л													
12.07.2019	7,35	23,1	20,6	6,7	2,7	0,1	53,35	1,9	3,3	16,8	0,25	13,8	114,7
Губа Осиновая, мг/л													
12.07.2019	6,95	23,5	14,85	6,8	1,9	0,4	47,25	1	2,1	10,9	0,35	11,65	93,3
Губа Полковая, мг/л													
28.07.2020	7,11	Н.о.	6,75	8,2	2,3	0,8	43,53	0,6	5,21	3,2	0,23	5,67	74,4
Село Черёмушки, мг/л													
30.07.2020	7,07	Н.о.	10,64	7	2,4	0,8	47,9	0,6	6,34	3,9	0,28	5,69	83,5
Губа Золотая, мг/дм ³													
30.07.2020	6,86	Н.о.	11,04	6	3,6	0,1	48,81	0,2	7,24	3,9	0,32	5,77	84,8
Река Исток, ледовый период, мг/л													
11.04.2019	7,39	1,3	13,6	6,2	2,2	0,04	44,24	3,7	3,51	5,7	0,15	20,73	94,1
Село Черёмушки, ледовый период, мг/л													
11.04.2019	6,53	1,2	13,1	8	3,3	0,1	55,65	2,7	5,63	5,9	0,1	19,08	106,7

Примечание. Н.о. – не определялось.

Note. N.o. – not measured.

Установлены некоторые закономерности в распределении микроэлементов в озерной воде. Дисперсия в распределении микроэлементов достигает нескольких математических порядков. Наиболее изменчивой оказалась концентрация железа, марганца, меди, цинка, свинца, фосфора, молибдена, вольфрама и стронция. Их наиболее высокие содержания были обнаружены в озерной воде в пределах расположения разрывных нарушений северо-восточного простирания. Разлом, пересекающий озеро от острова Монастырский до реки Исток, проявляется в проливе между западным берегом и островом аномальными содержаниями железа, цинка, меди, свинца, никеля и фосфора. Эти же элементы в относительно высоких концентрациях присутствуют в северо-восточной части озера в районе реки Исток. Другая ассоциация микроэлементов выделяется в пределах разрывного нарушения, протягивающегося через акваторию озера от села Черемушки до губы Полковая. Здесь в ассоциации элементов наиболее контрастны содержания вольфрама, в этом месте установлены также аномальные концентрации железа фосфора, хрома и стронция.

Нами исследованы концентрации лантаноидов в озерной воде в этих местах. В поведении редкоземельных элементов наблюдаются существенные различия. Максимальное суммарное содержание установлено в выборке проб, отобранных у острова Монастырский: здесь их концентрация достигает 0,842 мкг/дм³. В других местах содержание меньше, но в районах распространения разрывных нарушений возрастает. В районе губы Осиновая содержание редкоземельных элементов достигает 0,366 мкг/дм³, а в районе губы Полковая – 0,438 мкг/дм³.

На рис. 2 представлены спектры распределения лантаноидов, нормированные по составу североамериканского сланца. Из данного рисунка видно, что в районе острова Монастырский и губы Осиновая наблюдается общая закономерность уменьшения концентрации от легких редкоземельных элементов к тяжелым. В их спектре наблюдаются колебания, но общая тенденция сохраняется. Особенно ярко это прослеживается в пробах воды, отобранных в районе острова. В озерной воде в районе губы Полковая наблюдается обратная зависимость: концентрация

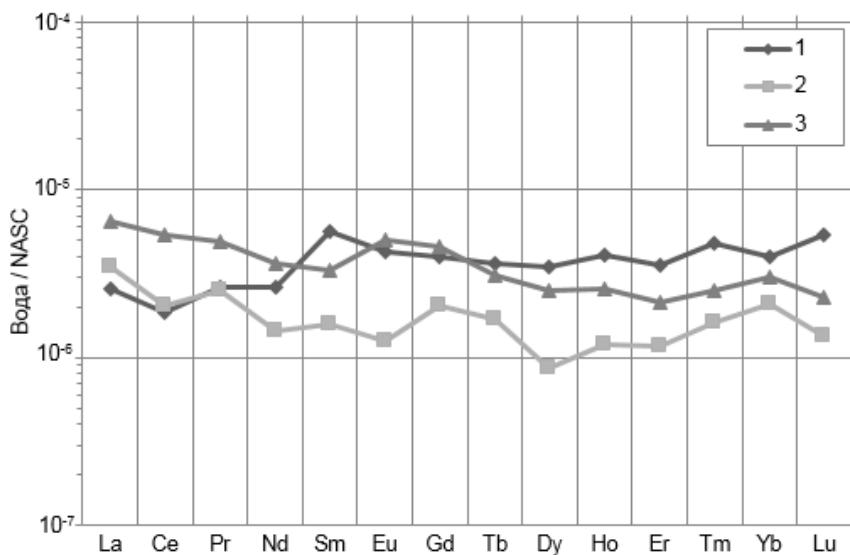


Рис. 2. Спектры распределения концентраций редкоземельных элементов, нормированные по содержанию в североамериканском сланце (NASC), в пробах озерной воды:
1 – губа Полковая (28 июля 2020 г.); 2 – губа Осиновая (12 июля 2019 г.);
3 – остров Монастырский (12 июля 2019 г.)

Fig. 2. Distribution spectra of rare earth element concentrations

normalized by the content in the North American shale (NASC) in the samples of lake water:
1 – Polkovaya Bay (July 28, 2020); 2 – Osinovaya Bay (July 12, 2019); 3 – Monastyrsky Island (July 12, 2019)

тяжелых редкоземельных элементов выше, чем легких.

Обсуждение полученных результатов

Проведенные гидрогеохимические исследования показали, что в современных условиях в озере Котокель заключены неодинаковые по химическому составу воды. В различных районах озера наблюдаются существенные отличия и в макро-, и в микрокомпонентном составе вод, что связано с неравномерно протекающими процессами метаморфизации. Некоторые компоненты химического состава вод, несомненно, связаны с жизнедеятельностью биоты, продукты разложения которой накопились в озере за длительное время [16, 17]. С биологическими процессами, вероятно, взаимосвязано поступление в озерную воду гидрокарбоната и нитрата. Эти компоненты имеют максимальные значения в местах отложения залежей сапропеля. В этой части озера происходит образование аутигенных карбонатных минералов [18]. Другая часть связана с антропогенной нагрузкой на озеро: так, сульфат и хлорид поступают в озеро с коммунально-бытовыми стоками от населенных пунктов и домов отдыха [19]. Третья часть

соотносится с воздействием субаквальной разгрузки трещинно-жильных вод. Разгружающиеся трещинно-жильные воды содержат в своем составе биологически активные элементы, которые благоприятствуют развитию водной растительности. Установленные аномальные содержания микроэлементов в придонной воде озера группируются в ассоциации, характерные для трещинно-жильных вод, в том числе и для термальных. Дисперсия в содержании редкоземельных элементов в значительной степени связана с субаквальной разгрузкой именно трещинно-жильных вод, которые привносят продукты разрушения горных пород, накапливающихся в растворе при длительной фильтрации их от мест питания до озера. Установленные закономерности в распределение редкоземельных элементов показывают, что разгружающиеся в озере трещинно-жильные воды имеют разную степень взаимодействия с породами. Они связаны с разломами разной пространственной ориентации [20]. Ресурсы трещинно-жильных вод, разгружающихся в юго-восточной части озера, формируются под воздействием наиболее метаморфизованных трещинно-жильных вод: здесь накапливаются тяжелые редкоземельные элементы, в значительных количествах



обнаруживается вольфрам и фосфор, которые характерны для термальных вод Байкальского региона.

Заключение

Химический состав воды озера Котокель в значительной степени формируется за счет трещинно-жильных вод. Разгрузка этих вод происходит по тектоническим нарушениям северо-восточного и северо-северо-восточного

простирации, которые секут акваторию озера в двух местах. По этим разрывным нарушениям поступают воды, обогащенные рядом микроэлементов, включая термофильные и биофильные. Воздействие разгрузки трещинно-жильных вод благоприятствует развитию в озере Котокель биоты, в результате разложения органических остатков образована залежь сапропеля.

Список литературы

1. Baker L.A., Herlihy A.T., Kaufmann P.R., Eilers J.M. Acidic lakes and streams in United States: the role of acidic deposition // Science. 1991. Vol. 252. Iss. 5009. P. 1151–1154.
2. Last W.M., Fawn M.G. Saline systems of the Great Plains of Western Canada: an overview of the limnology and paleolimnology // Aquatic Biosystems. 2005. Vol. 1. Iss. 10. P. 1–10. <https://doi.org/10.1186/1746-1448-1-10>
3. Parkhurst D.L., Christenson S.C., Breit G.N. Ground-water-quality assessment of the Central Oklahoma Aquifer, Oklahoma: geochemical and geohydrologic investigation. Oklahoma: U.S. Geological Survey, 1996. 110 p.
4. Stojanovic A., Kogelnig D., Mitteregger B., Mader D., Jirsa F., Krachler R., et al. Major and trace element geochemistry of superficial sediments and suspended particulate matter of shallow saline lakes in Eastern Austria // Geochemistry. 2009. Vol. 69. Iss. 3. P. 223–234. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2009.03.001>
5. Плюснин А.М., Перязева Е.Г., Чернявский М.К., Жамбалова Д.И., Будаев Р.Ц., Ангахаева Н.А. Генезис воды и растворенных веществ содовых озер Нижнего Куйтуна Баргузинской впадины // География и природные ресурсы. 2020. № 3. С. 89–97. [https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2020-3\(89-97\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2020-3(89-97))
6. Plyusnin A.M., Khazheeva Z.I., Sanzhanova S.S., Peryazeva E.G., Angakhaeva N.A. Sulfate mineral lakes of Western Transbaikalia: formation conditions and chemical composition of waters and bottom sediments // Russian Geology and Geophysics. 2020. Vol. 61. Iss. 8. P. 858–873. <https://doi.org/10.15372/RGG2019154>
7. Плюснин А. М., Украинцев А.В., Чернявский М.К., Перязева Е.Г., Ангахаева Н.А. Факторы и процессы образования соленого озера на берегу Байкала // Водные ресурсы. 2021. Т. 48. № 2. С. 194–206. <https://doi.org/10.31857/S0321059621020097>
8. Плюснин А.М., Чернявский М.К., Посохов В.Ф. Условия формирования гидротерм Баргузинского Прибайкалья по данным микроэлементного и изотопного состава // Геохимия. 2008. № 10. С.1063–1072.
9. Кузьмич В.Н. Эколого-продукционная характеристика озер Ирканы и Котокель // Биопродуктивность евтрофных озер Ирканы и Котокель бассейна озера Байкал: сб. науч. тр. Л.: Изд-во НПО «Промрыбвод», 1989. С. 131–146.
10. Кострова С.С., Майер Х., Чаплыгин Б., Безрукова Е.В. Изотопные исследования озера Котокель // Современные проблемы геохимии: материалы Всерос. совещ. Т. 1. Иркутск, 2012. С. 159–162.
11. Убугунов Л.Л., Пронин Н.М., Меркушева М.Г., Базова Н.В., Аненхонов О.А., Афанасьев Л.В. [и др.]. Озеро Котокельское: природные условия, биота, экология / отв. ред. Н.М. Пронин, Л.Л. Убугунов. Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2013. 320 с.
12. Лунина О.В. Разломы и сейсмически индуцированные геологические процессы на юге Восточной Сибири и сопредельных территориях. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2016. 225 с.
13. Перязева Е.Г., Плюснин А.М., Гармаева С.З., Будаев Р.Ц., Жамбалова Д.И. Особенности формирования химического состава вод озер восточного побережья Байкала // География и природные ресурсы. 2016. № 5. С. 49–59. [https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-5\(49-59\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-5(49-59))
14. Иметхенов А.Б. Позднекайнозойские отложения побережья озера Байкал. Новосибирск: Наука, 1987. 148 с.
15. Хаптанов В.Б., Башкуев Ю.Б., Дембелов М.Г. Структура водной толщи и донных отложений озера Котокель по данным георадарного зондирования // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета. 2013. № 5. С. 143–146.
16. Кострова С.С., Майер Х., Тарасов П.Е., Безрукова Е.В., Чаплыгин Б., Косслер А. [и др.]. Изотопный состав кислорода створок диатомовых водорослей из донных отложений озера Котокель (Бурятия) // Геология и геофизика. 2016. Т. 57. № 8. С. 1571–1580. <https://doi.org/10.15372/GiG20160809>
17. Крайнов М.А., Безрукова Е.В., Кербер Е.В., Левина О.В., Иванов Е.В., Щетников А.А. [и др.]. Первые результаты исследования донных отложений оз. Баунт (северное Забайкалье) // Геология и геофизика. 2017. Т. 58. № 11. С. 1764–1776. <https://doi.org/10.15372/GiG20171110>
18. Солотчина Э.П., Безрукова Е.В., Солотчин П.А., Шток О., Жданова А.Н. Отложения позднего плейстоцена-голоцен в озерах центрального Забайкалья: последствия для изменения климата и окружающей среды // Геология и геофизика. 2018. Т. 59. № 11. С. 1777–1794. <https://doi.org/10.15372/GiG20181103>



19. Цыренова Д.Д., Гаранкина В.П., Дагурова О.П., Дамбаев В.Б. Условия развития цианобактерий в озерах прибрежной полосы озера Байкал // Вестник Бурятского государственного университета. Химия. Физика. 2016. № 4. С. 11–16. <https://doi.org/10.18101/2306-2363-2016-4-11-16>

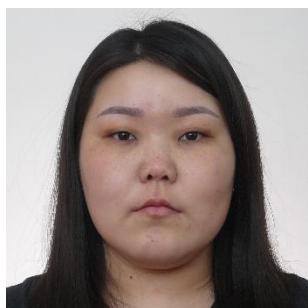
20. Плюснин А.М., Гунин В.И. Природные гидрохимические системы, формирование химического состава и реакция на техногенное воздействие (на примере Забайкалья). Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2001. 137 с.

References

1. Baker LA, Herlihy AT, Kaufmann PR, Eilers JM. Acidic lakes and streams in United States: the role of acidic deposition. *Science*. 1991;252(5009):1151–1154.
2. Last WM, Fawn MG. Saline systems of the Great Plains of Western Canada: an overview of the limnology and paleolimnology. *Aquatic Biosystems*. 2005;1(10):1–10. <https://doi.org/10.1186/1746-1448-1-10>
3. Parkhurst DL, Christenson SC, Breit GN. *Groundwater-quality assessment of the Central Oklahoma Aquifer, Oklahoma: geochemical and geohydrologic investigation*. Oklahoma: U.S. Geological Survey; 1996. 110 p.
4. Stojanovic A, Kogelnig D, Mitteregger B, Mader D, Jirsa F, Krachler R, et al. Major and trace element geochemistry of superficial sediments and suspended particulate matter of shallow saline lakes in Eastern Austria. *Geochimica*. 2009;69(3):223–234. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2009.03.001>
5. Plyusnin AM, Peryazeva EG, Chernyavskii MK, Zhambalova DI, Budaev RTs, Angakhaeva NA. Genesis of water and dissolved matter in soda lakes of Nizhnii kuitun of the Barguzin depression. *Geografiya i prirodnye resursy = Geography and Natural Resources*. 2020;3:89–97. (In Russ.) [https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2020-3\(89-97\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2020-3(89-97))
6. Plyusnin AM, Khazheeva ZI, Sanzhanova SS, Peryazeva EG, Angakhaeva NA. Sulfate mineral lakes of Western Transbaikalia: formation conditions and chemical composition of waters and bottom sediments. *Russian Geology and Geophysics*. 2020;61(8):858–873. <https://doi.org/10.15372/RGG2019154>
7. Plyusnin AM, Ukrantsev AV, Chernyavskii MK, Peryazeva EG, Angakhaeva NA. Factors and formation processes of a saline lake on the shore of Lake Baikal. *Vodnye resursy*. 2021;48(2):194–206. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0321059621020097>
8. Plyusnin AM, Chernyavskii MK, Posokhov VF. Formation conditions of hydrothermal waters in the Barguzin Cisbaikalia according to trace element and isotopic composition data. *Geokhimiya*. 2008;10:1063–1072. (In Russ.)
9. Kuz'mich VN. Ecological and production characteristics of lakes Irkana and Kotokel. In: *Biopro-ductivnost' eutrofnykh ozer Irkana i Kotokel' basseina ozera Baikal = Bioproduction of eutrophic lakes Irkana and Kotokel in the basin of Lake Baikal*. Leningrad: Research and production association "Promrybvod"; 1989. p.131–146. (In Russ.)
10. Kostrova SS, Maier Kh, Chaplygin B, Bezrukova EV. Isotopic studies of Lake Kotokel. In: *Sovremennye problemy geokhimii: materialy Vserossiiskogo soveshchaniya = Modern problems of geochemistry: materials of All-Russian meeting*. Vol. 1. Irkutsk; 2012. p.159–162. (In Russ.)
11. Ubugunov LL, Pronin NM, Merkusheva MG, Bazaeva NV, Anenkhonov OA, Afanasyeva LV, et al. *Lake Kotokel'skoe: natural conditions, biota, ecology*. Ulan-Ude: Buryat Scientific Center, Siberian Branch of Russian Academy of Science; 2013. 320 p. (In Russ.)
12. Lunina OV. *Faults and seismically induced geological hazards in southern East Siberia and adjacent areas*. Novosibirsk: Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2016. 225 p. (In Russ.)
13. Peryazeva EG, Plyusnin AM, Garmaeva SZ, Budaev RTs, Zhambalova DI. Features of the formation of chemical composition of lake waters along the eastern shores of Baikal. *Geografiya i prirodnye resursy = Geography and Natural Resources*. 2016;5:49–59. (In Russ.) [https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-5\(49-59\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-5(49-59))
14. Imetkhenov AB. *Late Cenozoic deposits of the coast of Lake Baikal*. Novosibirsk: Nauka; 1987. 148 p. (In Russ.)
15. Khaftanov VB, Bashkuev YuB, Dembelov MG. Structure of the Kotokel lake water and bottom sediments according to GPR sounding. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta*. 2013;5:143–146. (In Russ.)
16. Kostrova SS, Meyer H, Tarasov PE, Bezrukova EV, Chapligin B, Kossler A, et al. Oxygen isotope composition of valves of diatomic algae from Lake Kotokel bottom sediments (Buryatia). *Geologiya i geofizika*. 2016;57(8):1571–1580. (In Russ.) <https://doi.org/10.15372/GiG20160809>
17. Krainov MA, Bezrukova EV, Kerber EV, Levina OV, Ivanov EV, Shchetnikov AA, et al. The first study results of bottom sediments of Lake Bount (northern Transbaikalia). *Geologiya i geofizika*. 2017;58(11):1764–1776. (In Russ.) <https://doi.org/10.15372/GiG20171110>
18. Solotchina EP, Bezrukova EV, Solotchin PA, Shtok O, Zhdanova AN. Deposits of the Late Pleistocene-Holocene in the lakes of central Transbaikalia: implications for climate and environmental changes. *Geologiya i geofizika*. 2018;59(11):1777–1794. (In Russ.) <https://doi.org/10.15372/GiG20181103>
19. Tsyrenova DD, Garankina VP, Dagurova OP, Dambaev VB. Conditions for the cyanobacteria development in the lakes of Lake Baikal coastal zone. *Vestnik Buryatskogo gosudarstvennogo universiteta. Khimiya. Fizika*. 2016;4:11–16. (In Russ.) <https://doi.org/10.18101/2306-2363-2016-4-11-16>
20. Plyusnin AM, Gunin VI. *Natural hydrogeological systems, formation of chemical composition and technogenic impact response (on example of Transbaikalia)*. Ulan-Ude: Buryat Scientific Center, Siberian Branch of Russian Academy of Science; 2001. 137 p. (In Russ.)



Сведения об авторах / Information about the authors



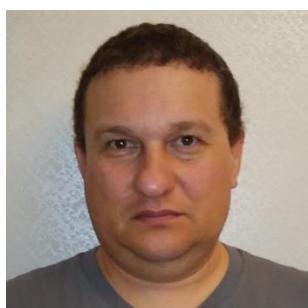
Ангахаева Надежда Александровна,
младший научный сотрудник Лаборатории гидрогеологии и геоэкологии,
Геологический институт СО РАН,
670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а, Россия,
✉ e-mail: ms.angakhaeva@mail.ru
Nadezhda A. Angakhaeva,
Junior Researcher of the Laboratory of Hydrogeology and Geoecology,
Geological Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
6a Sakhyanova St., Ulan-Ude 670047, Russia,
✉ e-mail: ms.angakhaeva@mail.ru



Плюснин Алексей Максимович,
доктор геолого-минералогических наук,
заместитель директора по научной работе,
Геологический институт СО РАН,
670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а, Россия,
e-mail: plyusnin@ginst.ru
Alexey M. Plyusnin,
Dr. Sci. (Geol. & Mineral.),
Deputy Director for Research,
Geological Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
6a Sakhyanova St., Ulan-Ude 670047, Russia,
e-mail: plyusnin@ginst.ru



Украинцев Александр Викторович,
кандидат геолого-минералогических наук,
научный сотрудник Лаборатории гидрогеологии и геоэкологии,
Геологический институт СО РАН,
670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а, Россия,
e-mail: ukraintsev@ginst.ru
Alexander V. Ukraintsev,
Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Scientific Researcher of the Laboratory of Hydrogeology and Geoecology,
Geological Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
6a Sakhyanova St., Ulan-Ude 670047, Russia,
e-mail: ukraintsev@ginst.ru



Чернявский Михаил Константинович,
кандидат географических наук,
научный сотрудник Лаборатории гидрогеологии и геоэкологии,
Геологический институт СО РАН,
670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а, Россия,
e-mail: mitchel@ginst.ru
Mikhail K. Chernyavskii,
Cand. Sci. (Geogr.),
Scientific Researcher of the Laboratory of Hydrogeology and Geoecology,
Geological Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
6a Sakhyanova St., Ulan-Ude 670047, Russia,
e-mail: mitchel@ginst.ru



Перязева Елена Георгиевна,
кандидат географических наук,
научный сотрудник Лаборатории гидрогеологии и геэкологии,
Геологический институт СО РАН,
670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а, Россия,
e-mail: peryazeva@ginst.ru

Elena G. Peryazeva,
Cand. Sci. (Geogr.),
Scientific Researcher of the Laboratory of Hydrogeology and Geoecology,
Geological Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
6a Sakhyanova St., Ulan-Ude 670047, Russia,
e-mail: peryazeva@ginst.ru



Жамбалова Дашима Ивановна,
кандидат геолого-минералогических наук,
научный сотрудник Лаборатории гидрогеологии и геэкологии,
Геологический институт СО РАН,
670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а, Россия,
e-mail: dachima@geo.stbur.ru

Dashima I. Zhambalova,
Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Scientific Researcher of the Laboratory of Hydrogeology and Geoecology,
Geological Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
6a Sakhyanova St., Ulan-Ude 670047, Russia,
e-mail: dachima@geo.stbur.ru

Заявленный вклад авторов / Contribution of the authors

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов / Conflict of interests

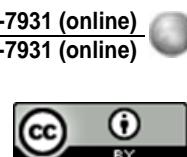
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.
The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 10.03.2021; одобрена после рецензирования 12.04.2021; принята к публикации 14.05.2021.

The article was submitted 10.03.2021; approved after reviewing 12.04.2021; accepted for publication 14.05.2021.



Оригинальная статья / Original article

УДК 556.3.02:551.243

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-2-116-124>

Особенности проведения опытно-фильтрационных исследований в районах развития пластов с двойной пористостью

© Л.И. Аузина^a, Ю.К. Ланкин^b^aИркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия^bИркутский территориальный центр государственного мониторинга геологической среды АО «Иркутскгеофизика», г. Иркутск, Россия

Резюме: Цель исследования заключалась в оптимизации геолого-разведочных работ на месторождениях подземных вод, сформировавшихся в условиях разломно-блокового строения верхней гидродинамической зоны на территории Восточной Сибири. Авторами проанализированы структурно-тектонические особенности изучаемых участков, результаты площадной геофизики, разведочного бурения, опытно-фильтрационных работ с использованием авторской методики. Объекты исследования – это месторождения подземных вод, расположенные в различных тектонических структурах Восточной Сибири. В итоге на основе анализа результатов полевых исследований, проведенных на месторождениях подземных вод, расположенных в различных тектонических структурах Восточной Сибири, обосновано наличие двойной пористости в водовмещающих отложениях зоны свободного водообмена региона, что обусловлено напряжениями, возникающими при формировании внутриконтинентального Байкальского рифта. На основании особенностей структурно-тектонических и гидрогеологических условий предложена оптимизация геолого-разведочных работ, методики проведения и обработки опытно-фильтрационных исследований на территориях развития разломно-блочных структур.

Ключевые слова: подземные воды, Восточная Сибирь, опытно-фильтрационные исследования, двойная пористость, разломно-блочная структура

Для цитирования: Аузина Л.И., Ланкин Ю.К. Особенности проведения опытно-фильтрационных исследований в районах развития пластов с двойной пористостью. *Науки о Земле и недропользование*. 2021. Т. 44. № 2. С. 116–124. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-2-116-124>

Features of ground inflow testing in the areas of double porosity aquifer development

© Larisa I. Auzina^a, Yuri K. Lankin^b^aIrkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia^bIrkutsk Territorial Center of State Monitoring of Geological Environment, Irkutskgeofizika JSC, Irkutsk, Russia

Abstract: The purpose of the study is optimization of geological exploration at the groundwater deposits of the upper hydrodynamic zone formed in the fault-block structure conditions in Eastern Siberia. The authors analyze the structural and tectonic features of the areas under investigation, the results of areal geophysics studies, exploration drilling and the use of the author's methodology in carrying out of the ground inflow testing. The objects of research are groundwater deposits located in various tectonic structures of Eastern Siberia. The analysis of field study results involving researches of groundwater deposits located in various tectonic structures of Eastern Siberia made it possible to identify the double porosity in the aquifers of free water exchange in the region, which is due to the stresses arising during the inland Baikal rift system formation. As a result, the optimization of geological exploration work, methodology and processing methods of ground inflow testing in the areas of fault-block structures development were introduced on the basis of the features of structural-tectonic and hydrogeological conditions.

Keywords: ground water, Eastern Siberia, ground inflow testing, double porosity, fault-block structure

For citation: Auzina LI, Lankin YK. Features of ground inflow testing in the areas of double porosity aquifer development. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2021;44(2):116–124. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-2-116-124>

Введение

Цель данного исследования заключалась в оптимизации геолого-разведочных работ на

месторождениях подземных вод, сформировавшихся в условиях разломно-блочного строения верхней гидродинамической зоны



на территории Восточной Сибири. Объектами исследования послужили месторождения подземных вод (МПВ), расположенные в различных тектонических структурах Восточной Сибири. В качестве примеров авторами были выбраны и рассмотрены Зазинское, Тымпучиканское, Тамаракское МПВ. Основные структуры, к которым приурочены месторождения, и связанные с ними особенности формирования коллекторов подземных вод (ПВ) объединены едиными напряжениями, возникающими при формировании внутриконтинентального Байкальского рифта и сочетающими региональные растяжения северо-западного и юго-восточного направлений по усредненному азимуту 310–330° с субширотной левосдвиговой компонентой [1–7]. Значительная неоднородность тектонического строения земной коры региона обусловлена наличием в ней разнообразных структур в виде продуктов магматической деятельности в совокупности с разломными и складчатыми дислокациями преимущественно северо-западного, субмеридионального и северо-восточного простираций [8–11]. Возрастной спектр заложения этих структурных и магматических комплексов весьма широк – от раннего протерозоя до кайнозоя, при этом последний включает в себя период рифтогенной тектономагматической активизации [12]. Разнообразие и масштабное развитие разломной тектоники создало предпосылки для формирования двух типов коллекторов: межблоковых (тектоническая трещиноватость) и внутриблочных (тип коллектора зависит от исходной геологической структуры).

Материалы и методы исследования

Зазинское МПВ находится в Зазинской межгорной впадине Байкало-Витимской складчатой области [4], представляющей собой глубокий грабен в кристаллическом фундаменте и сложенной верхнемезозойскими терригенно-осадочными отложениями. Впадина сформировалась в несколько этапов, включающих образование Зазинского прогиба в результате внутриконтинентального процесса рифтообразования и дальнейшего ее заполнения осадочно-вулканогенными по-

родами с последующим формированием основных структурно-тектонических особенностей района в ходе тектонических подвижек с сопутствующим осадконакоплением в раннемеловое время. Морфологически впадина представляет собой линейно вытянутую депрессию, обрамленную невысокими горными хребтами Зусы и Витимского плоскогорья (рис. 1). Выделение разломно-блоковой структуры на участке базировалось на результатах интерпретации площадных геофизических исследований: аэромагниторазведки, давшей возможность выявить основные разломы северо-восточного и северо-западного простираций, а также импульсной электроразведки (электромагнитного зондирования и вызванной поляризации), позволившей выделить более мелкие дизъюнктивные структуры второго и третьего порядков (см. рис. 1).

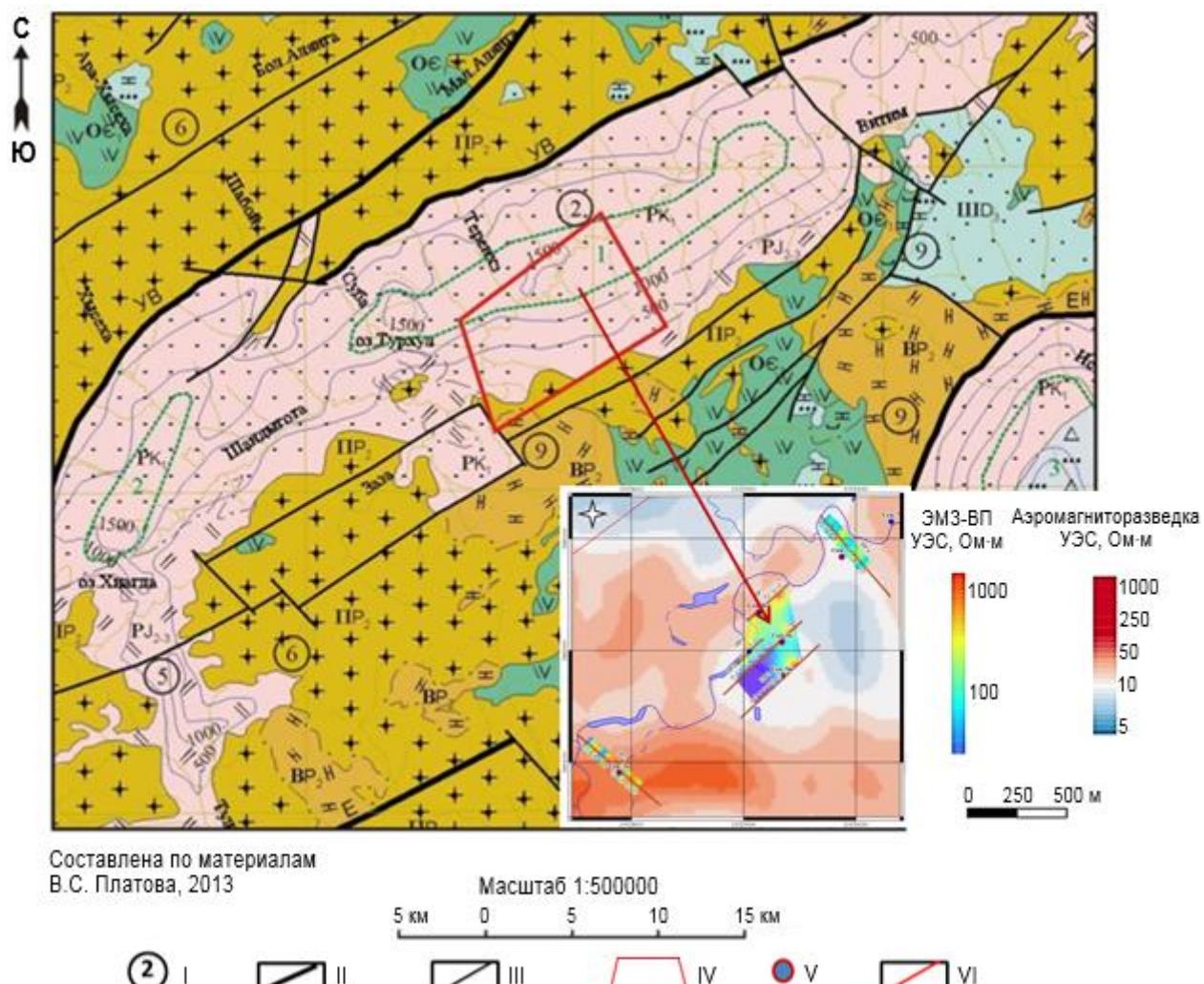
Зоны тектонической трещиноватости подтверждены результатами бурения поисковых скважин в 1982 и в 2020 гг. Повышенная водообильность отложений нижнего мела соответствует зонам тектонических разрывов.

Тымпучиканское МПВ (Западная Якутия) приурочено к зоне развития двух крупных разновозрастных платформенных структур первого порядка [13]: Тунгусской синеклизы и Ангаро-Вилуйского юрского наложенного прогиба. Структура района состоит из сложнодислоцированного метаморфизованного дорифейского фундамента, слагающего цоколь платформы, и в различной степени дислоцированного осадочного чехла. Участок находится в пределах Непского свода, представляющего собой сложно построенную положительную структуру общего северо-восточного простирания. Более детальное структурно-тектоническое строение верхней гидродинамической зоны района Тымпучиканского МПВ выполнено по результатам электроразведочных работ. На территории преобладают разрывные нарушения северо-западного, северо-восточного и субмеридионального направлений (рис. 2), в результате развития которых четко просматривается разломно-блоковая структура площади исследований, что подтверждается и результатами проведенных опытно-фильтрационных



исследований [14–17]. Все разломы имеют крутопадающий, практически вертикальный характер. Отличительной чертой северо-восточного дизьюнктива является его прямолинейность и выдержанность по простира-

нию. Результаты неотектонических движений подчеркиваются особенностями современного рельефа, представляющего собой сочетание денудационных возвышеностей и аккумулятивных низменностей.



Составлена по материалам
В.С. Платова, 2013

Масштаб 1:500000
5 км 0 5 10 15 км

(2) I II III IV V VI

Рис. 1. Структурно-тектоническая карта (Л.И. Аузина, 2020) с результатами интерпретации аэромагниторазведки и электромагнитного зондирования на территории Зазинского участка (Ю.А. Давыденко, 2020), отражающими разломно-блоковую структуру исследуемого района:

I – мезозойские рифтогенные впадины, выполненные осадочными образованиями (2 – Зазинская, 5 – Индола-Тулдунский прогиб, 6 – Ангаро-Витимский батолит, 9 – Еравнинский провес кровли батолита);

II–III – разрывные нарушения: II – главные разломы (УВ – Удино-Витимский, Е – Еравнинский), III – прочие разломы неустановленной кинематики; IV – участок Зазинского месторождения подземных вод; V – разведочные скважины; VI – линии геофизических профилей

ЭМЗ-ВП – метод электромагнитного зондирования и вызванной поляризации,
УЭС – удельное электрическое сопротивление

Fig. 1. Structural-tectonic map (L.I. Auzina, 2020) with the interpretation results of aeromagnetic survey and electromagnetic sounding (Yu.A. Davydenko, 2020) reflecting the block-fault structure of the Zazinsky site:

I – Mesozoic riftogenic depressions composed of sedimentary formations: (2 – Zazinskaya, 5 – Indola-Tuldunsky depression; 6 – Angara-Vitim batholith, 9 – Eravninsky pendant of the batholith roof);

II–III – faulting: II – main faults (УВ – Udino-Vitimsky, Е – Eravninsky), III – other faults of unspecified kinematics;

IV – Zazinsky groundwater deposit site; V – exploration wells; VI – lines of geophysical profiles

ЭМЗ-ВП – method of electromagnetic sounding and induced polarization,
УЭС – electrical resistivity

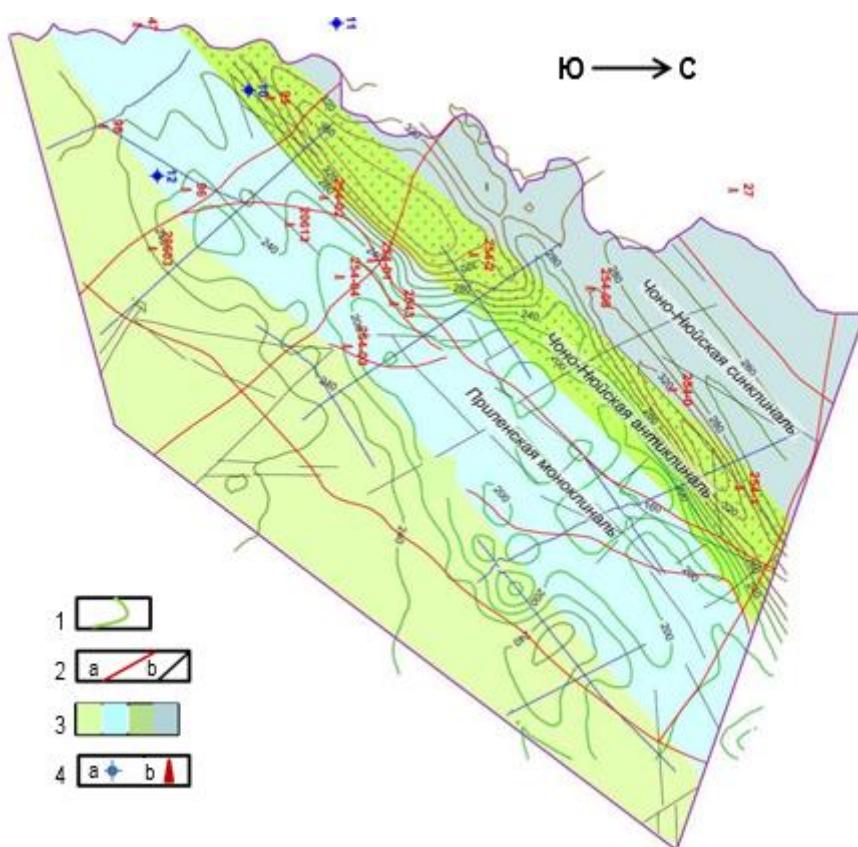


Рис. 2. Схема структурно-тектонического районирования Тымпучиканского участка на основе данных зондирования становлением поля в ближней зоне (Ю.А. Агафонов, 2013):
1 – изолинии глубины залегания кровли проводящего горизонта в верхоленской свите;
2 – разломы, выделенные по данным: а – сейсморазведки, б – геологическим;
3 – структурно-тектонические зоны; 4 – скважины: а – гидрогеологические, б – глубокого бурения

Fig. 2. Diagram of the structural and tectonic zoning of the Tympuchikan site based on the near-field transient electromagnetic sounding data (Yu.A. Agafonov, 2013):

- 1 – isolines of the occurrence depth of the conducting horizon top in Verkholenskaya series;
- 2 – faults identified according to: a – seismic data, b – geological data;
- 3 – structural tectonic zones;
- 4 – wells: a – hydrogeological wells, b – deep-hole wells

Еще одним примером пласта с двойной пористостью является комплекс протерозойских пород, в пределах которых проводились поисковые работы для питьевого и хозяйствственно-бытового водоснабжения населения г. Бодайбо. Тамаракское МПВ расположено в Байкало-Патомском эпиплатформенном раннепалеозойском поднятии [13], сложенном рифейскими перикратонными комплексами. В плиоцене на фоне общего сводового воздымания господствующее значение приобрели вертикальные дифференцированные перемещения блоков по разломам. В позднеоплейстоценовое – голоценовое время продолжилось общее поднятие и дифференциация ранее созданных структур, активизация

разломов северо-западного простирания, что привело к формированию сложной блоково-мозаичной структуры¹, подчеркивающейся рисунком гидросети региона. Здесь на одном из поисковых участков вблизи р. Витим наземными геофизическими исследованиями была установлена система зон дробления разломов, сформированных вдоль и вкrest простирания долины реки, что обусловило блоковое строение территории.

Результаты исследования и их анализ

Описанные объекты объединены наличием разломно-блоковой структуры, связанной с тектоническим развитием территории, что

¹ Окороков В.Г., Четвертаков И.В., Филиппов А.Г., Булдыгеров В.В., Коробейников Н.К. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200000. Муйская серия. Лист О-50-XXXII. Объяснительная записка. М.: Изд-во МФ ВСЕГЕИ, 2013. 201 с.



предопределяет особенности формирования структуры фильтрационного потока. При этом в зависимости от кинематики разломы могут являться путями вертикальной фильтрации или же представлять собой слабо-проницаемые экраны при горизонтальном движении потоков ПВ [18–20]. Для оценки гидродинамической роли разломов и получения более адекватной информации о фильтрационных параметрах водовмещающих пород на исследуемых объектах при проведении опытно-фильтрационных исследований была применена нестандартная методика. В гидрогеологических скважинах проводилась серия экспресс-откачек для расколбоматации зон тектонической трещиноватости, то есть «раскачки» водоносного подразделения и привлечения дополнительного питания из зон разломов. Опыты осуществлялись при максимальной мощности водоподъемного оборудования длительностью от 0,5 до 5 ч с последующим восстановлением уровня ПВ. Некоторые результаты экспресс-опытов приведены в таблице.

Из представленной таблицы видно, что скважины 9ю и 9а пробурены в межблоковых зонах (зонах разломов), поскольку с каждой прокачкой удельный дебит возрастал, а скважина 7 находится во внутриблочном пространстве: удельный дебит, несмотря на проведенные экспресс-опыты, остался на прежнем уровне.

Вследствие незначительной ширины оперирующих разломов второго и третьего таксономических уровней на первых этапах проведения опытно-фильтрационных исследований происходит существенное понижение уровня ПВ, при этом квазистационарный режим не устанавливается или формируется в течение длительного времени (более 3–5 суток), что предопределяет предпочтительное использование результатов восстановления уровня ПВ для оценки фильтрационных параметров (рис. 3), поскольку графики восстановления наглядно отражают наличие двойной пористости в водовмещающих отложениях и позволяют оценить водопроводимость как разломных зон, так и пород, слагающих

Результаты опытно-фильтрационных работ в поисково-разведочных скважинах

(Зазинское месторождение подземных вод)

Results of ground inflow testing in prospecting wells (Zazinskoye groundwater deposit)

Номер скважины	Номер прокачки	Продолжительность, мин.	Дебит Q, л/с	Понижение S, м	Удельный дебит $q = Q / S$, л/с·м
9а	1	100	1	30	0,03
	2	100	1,5	62	0,024
	3	100	2	11,6	0,17
	4	300	2	11,6	0,17
	5	180	2,2	9,45	0,23
	6	10	3	13	0,23
	7	10	3	13	0,23
	8	10	7	13	0,54
9с1	1	30	9,4	24,09	0,39
	2	30	9,76	23,41	0,41
	3	30	10,1	23,16	0,43
	4	30	10,25	22,87	0,45
9ю	1	100	10,96	19,6	0,1
	2	100	11,3	21,4	0,13
	3	100	10,67	19,32	0,55
	4	150	10,18	19,21	0,53
7а	1	30	2,67	25,25	0,11
	2	30	3,5	30,86	0,11
	3	30	3,6	32,34	0,11
3а	1	30	2,72	26,43	0,10
	2	30	2,72	26,02	0,10
	3	30	2,71	25,99	0,10
	4	180	2,73	26,26	0,10

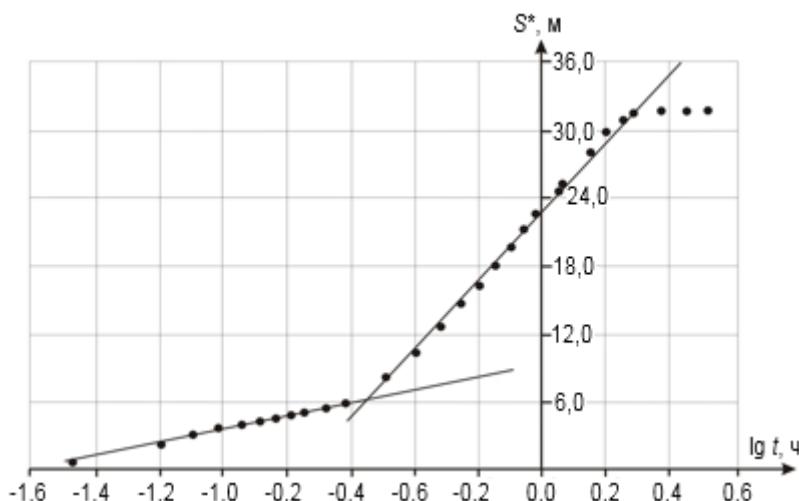


Рис. 3. График восстановления уровня воды в гидрогеологической скважине Тамаракского месторождения подземных вод

Fig. 3. Graph of water level recovery in the Tamarakskoye groundwater deposit hydrogeological well

внутриблочные структуры. Один из графиков представлен на рис. 3. По нему можно сделать вывод, что откачка выполнялась в условиях пласта с двойной пористостью. Пологая часть графика характеризует фильтрационные показатели зоны дробления, а крутая – окружающих, менее водообильных пород внутриблочного пространства. Аналогичная закономерность проявлялась практически по всем поисковым скважинам.

Заключение

Полученные результаты позволяют оптимизировать геолого-разведочные работы, а также методику проведения и обработки опытно-фильтрационных исследований на территориях развития разломно-блочных структур и формирования пластов с двойной

пористостью, приведя их к следующему алгоритму:

1. Проведение площадной геофизики для выделения зон дробления (хорошие результаты получены при использовании метода зондирования становлением поля в ближней зоне и метода электромагнитного зондирования).

2. Бурение гидрогеологических скважин в пределах выделенных зон и проведение в них серии кратковременных экспресс-опытов с максимальной производительностью водоподъемного оборудования с целью расколбоматации зон трещиноватости.

3. Проведение опытных откачек с последующей их обработкой по восстановлению уровня ПВ или методом Хорнера с использованием сложного времени.

Список литературы

- Гончаров М.А., Фролова Н.С. Конвективная эволюция перехода от пассивного рифтогенеза к активному // Континентальный рифтогенез, сопутствующие процессы: материалы II Всерос. симпозиума с междунар. уч. и молодежн. науч. шк., посвящ. памяти акад. Н.А. Логачева и Е.Е. Милановского. Т. 1. Иркутск: Изд-во ИЗК СО РАН, 2013. С. 86–89.
- Лобацкая Р.М., Кофф Г.Л. Разломы литосферы и чрезвычайные ситуации. М.: Рос. экол. федер. информ. агентство, 1997. 196 с.
- Лобацкая Р.М. Разломно-блочная структура Байкало-Енисейского разлома в районе эксплуатации объектов ядерной энергетики // Геодинамика и тектонофизика. 2014. Т. 5. № 2. С. 547–562. <https://doi.org/10.5800/GT-2014-5-2-0140>
- Логачев Н.А. История и геодинамика Байкальского рифта // Геология и геофизика. 2003. Т. 44. № 5. С. 391–406.
- Саньков В.А., Лухнев А.В., Мирошниченко А.И., Леви К.Г., Ашурков С.В., Башкуев Ю.Б. [и др.]. Современные движения земной коры Монголо-Сибирского региона по данным GPS-геодезии // Доклады Академии наук. 2003. Т. 392. № 8. С. 792–795.
- Litasov K.D., Taniguchi H. Mantle evolution beneath Baikal rift. Vol. 5. Sendai: Center for Northeast Asian Studies, Tohoku University, 2002. 221 p.
- Zorin Yu.A., Turutanov E.Kh., Mordvinova V.V., Kozhevnikov V.M., Yanovskaya T.B., Treusov A.V. The Baikal rift zone: the effect of mantle plumes on older structure // Tectonophysics. 2003. Vol. 371. Iss. 1–4. P. 153–173. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(03\)00214-2](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(03)00214-2)

8. Гилева Н.А., Мельникова В.И. Особенности развития крупных сейсмических активизаций в Северном Прибайкалье в 1997–2012 годах // Континентальный рифтогенез, сопутствующие процессы: материалы II Всерос. симпозиума с междунар. уч. и молодежн. науч. шк., посвящ. памяти акад. Н.А. Логачева и Е.Е. Милановского. Т. 1. Иркутск: Изд-во ИЗК СО РАН, 2013. С. 74–79.
9. Шерман С.И., Борняков С.А., Буддо В.Ю. Области динамического влияния разломов: результаты моделирования. Новосибирск: Наука, 1983. 112 с.
10. Anderson E.M. The dynamics of faulting. London: Oliver and Boyd, 1951. 206 p.
11. Стоянов С.С. Механизм формирования разрывных зон. М.: Недра, 1977. 144 с.
12. Замараев С.М., Васильев Е.П., Мазукабзов А.М., Ружич В.В., Рязанов Г.В. Соотношение древней и кайнозойской структур в Байкальской рифтовой зоне. Новосибирск: Наука, 1979. 125 с.
13. Малич Н.С., Масайтис В.Л., Сурков В.С. Геологическое строение СССР и закономерности размещения полезных ископаемых. Т. 4. Сибирская платформа. Л.: Наука, 1987. 448 с.
14. Auzina L.I., Parshin A.V. System-integrated GIS-based approach to estimating hydrogeological conditions of oil-and-gas fields in Eastern Siberia // IOP Conference. Series: Earth and Environmental Science. 2016. Vol. 33. Iss. 1. P. 12060–12065. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/33/1/012060>
15. Аузина Л.И., Паршин А.В., Шульга В.В. Методика оптимизации геологоразведочных исследований для целей водоснабжения объектов НГК на месторождениях Чонской группы, Восточная Сибирь // Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами: материалы II Всерос. конф. с междунар. уч. Владивосток: Дальнаука, 2015. С. 444–448.
16. Аузина Л.И. Один из подходов к оптимизации поисково-оценочных работ на воду на месторождениях нефтегазового комплекса Восточной Сибири // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2014. № 6. С. 82–88.
17. Parshin A.V., Auzina L.I. Geoinformation technology for prospecting of groundwater for water supply of oil and gas facilities in Eastern Siberia // 7th EAGE Saint Petersburg International Conference and Exhibition. 2016. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201600273>
18. Крапивнер Р.Б., Плугина Т.А., Язвин А.Л. Роль разломов в формировании фильтрационных неоднородностей верхнего гидрогеологического этажа // Разведка и охрана недр. 2003. № 10. С. 34–38.
19. Всеволожский В.А., Дюнин В.И. Анализ закономерностей гидродинамики глубоких пластовых систем // Вестник Московского государственного университета. Геология. 1996. № 3. С. 61–72.
20. Фиалко А.И. Прогноз влияния глубины залегания на фильтрационные свойства горных пород литосферы // Подземные воды и эволюция литосферы: материалы Всесоюз. конф. Т. 2. М.: Наука, 1985. С. 58–60.

References

1. Goncharov MA, Frolova NS. Convective evolution of passive rifting transition to active rifting. In: *Kontinental'nyi riftogenet, soputstvuyushchie protsessy: materialy II Vserossiiskogo simpoziuma s mezdunarodnym uchastiem i molodezhnoi nauchnoi shkoly, posvyashchennykh pamyati akademikov N.A. Logacheva i E.E. Milanovskogo = Continental rifting, accompanying processes: materials of 2nd All-Russian symposium with international participation and youth scientific school dedicated to the memory of the academician N.A. Logachev and E.E. Milanovsky*. Vol. 1. Irkutsk: Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2013. p.86–89. (In Russ.) according to GPS-geodesy data. *Doklady Akademii nauk*. 2003;392(8):792–795. (In Russ.)
2. Lobatskaya RM, Koff GL. *Lithosphere faults and emergencies*. Moscow: Russian Ecological Federal Information Agency; 1997. 196 p. (In Russ.)
3. Lobatskaya RM. The fault-block structure of the Baikal-Yenisei fault in the region of operating nuclear energy facilities. *Geodinamika i tektonofizika = Geodynamics & Tectonophysics*. 2014;5(2):547–562. (In Russ.) <https://doi.org/10.5800/GT-2014-5-2-0140>
4. Logachev NA. History and geodynamics of the Baikal rift. *Geologiya i geofizika*. 2003;44(5):391–406. (In Russ.)
5. San'kov VA, Lukhnev AV, Miroshnichenko AI, Levi KG, Ashurkov SV, Bashkuev YuB, et al. Modern movements of the Earth's crust in the Mongol-Siberian region
6. Litasov KD, Taniguchi H. *Mantle evolution beneath Baikal rift*. Vol. 5. Sendai: Center for Northeast Asian Studies, Tohoku University; 2002. 221 p.
7. Zorin YuA, Turutanov EKh, Mordvinova VV, Kozevnikov VM, Yanovskaya TB, Treusov AV. The Baikal rift zone: the effect of mantle plumes on older structure. *Tectonophysics*. 2003;371(1–4):153–173. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(03\)00214-2](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(03)00214-2)
8. Gileva NA, Mel'nikova VI. Development features of large seismic activations in the Northern Baikal region in 1997–2012. In: *Kontinental'nyi riftogenet, soputstvuyushchie protsessy: materialy II Vserossiiskogo simpoziuma s mezdunarodnym uchastiem i molodezhnoi nauchnoi shkoly, posvyashchennykh pamyati akademikov N.A. Logacheva i E.E. Milanovskogo = Continental rifting, accompanying processes: materials of 2nd All-Russian symposium with international participation and youth scientific school dedicated to the memory of the academician N.A. Logachev and E.E. Milanovsky*. Vol. 1. Irkutsk: Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2013. p.74–79. (In Russ.)
9. Sherman SI, Bornyakov SA, Buddo VYu. *Areas of fault dynamic influence: modeling results*. Novosibirsk: Nauka; 1983. 112 p. (In Russ.)



10. Anderson EM. *The dynamics of faulting*. London: Oliver and Boyd; 1951. 206 p.
11. Stoyanov SS. *Formation mechanism of discontinuous zones*. Moscow: Nedra; 1977. 144 p. (In Russ.)
12. Zamaraev SM, Vasil'ev EP, Mazukabzov AM, Ruzhich VV, Ryazanov GV. *Correlation of ancient and Cenozoic structures in the Baikal rift zone*. Novosibirsk: Nauka; 1979. 125 p. (In Russ.)
13. Malich NS, Masaitis VL, Surkov VS. *Geological structure of the USSR and distribution patterns of minerals*. Vol. 4. *Siberian platform*. Leningrad: Nauka; 1987. 448 p. (In Russ.)
14. Auzina LI, Parshin AV. System-integrated GIS-based approach to estimating hydrogeological conditions of oil-and-gas fields in Eastern Siberia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2016;33(1): 12060–12065. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/33/1/012060>
15. Auzina LI, Parshin AV, Shulga VV. Optimization methodology of geological exploration studies for the purpose of the Chonskaya group oil and gas deposits water supply, Eastern Siberia. In: *Geologicheskaya evolyutsiya vzaimodeistviya vody s gornymi porodami: materialy II Vserossiiskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem = Geological evolution of water and rocks interaction: Proceedings of 2nd All-Russian conference with international participation*. Vladivostok: Dal'nauka; 2015. p.444–448. (In Russ.)
16. Auzina LI. An approach to groundwater exploration optimization at oil and gas fields of Eastern Siberia. *Izvestiya Sibirskego otdeleniya Sektsii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, poiski i razvedka rudnykh mestorozhdenii = Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Prospecting and Exploration of Ore Deposits*. 2014;6:82–88. (In Russ.)
17. Parshin AV, Auzina LI. Geoinformation technology for prospecting of groundwater for water supply of oil and gas facilities in Eastern Siberia. *7th EAGE Saint Petersburg International Conference and Exhibition*. 2016. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201600273>
18. Krapivner RB, Plugina TA, Yazvin AL. The role of faults in filtration inhomogeneity formation in the upper hydrogeological stage. *Razvedka i okhrana nedr = Prospect and Protection of Mineral Resources*. 2003;10:34–38. (In Russ.)
19. Vsevolozhskiy VA, Dyunin VI. Analysis of laws of deep reservoir system hydrodynamics. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta. Geologiya*. 1996;3:61–72. (In Russ.)
20. Fialko AI. Forecast of the influence of lithosphere rocks depth on their filtration properties. In: *Podzemnye vody i evolyutsiya litosfery: materialy Vsesoyuznoi konferentsii = Ground water and lithosphere evolution: materials of the All-Russian conference*. Vol. 2. Moscow: Nauka; 1985. p.58–60. (In Russ.)

Сведения об авторах / Information about the authors



Аузина Лариса Ивановна,

кандидат геолого-минералогических наук, доцент,
доцент кафедры прикладной геологии,
геофизики и геоинформационных систем,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
✉ e-mail: auzina@ex.istu.edu

Larisa I. Auzina,

Cand. Sci. (Geol. & Mineral.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Applied Geology,
Geophysics, and Geoinformation Systems,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
✉ e-mail: auzina@ex.istu.edu



Ланкин Юрий Константинович,

руководитель,
Иркутский территориальный центр государственного мониторинга
геологической среды АО «Иркутскгеофизика»,
664039, г. Иркутск, ул. Клары Цеткин, 9а,
e-mail: yur-lankin@yandex.ru

Yuri K. Lankin,

Head of Irkutsk Territorial Center of State Monitoring
of Geological Environment, Irkutskgeofizika JSC,
9a Klary Tsetkin St., Irkutsk 664039, Russia,
e-mail: yur-lankin@yandex.ru

**Заявленный вклад авторов / Contribution of the authors**

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.
The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 03.03.2021; одобрена после рецензирования 06.04.2021; принятa к публикации 11.05.2021.

The article was submitted 03.03.2021; approved after reviewing 06.04.2021; accepted for publication 11.05.2021.



Оригинальная статья / Original article

УДК 622.245

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-2-125-133>

Инновационные решения в строительстве глубоких скважин на промышленные рассолы, нефть и газ в деформируемых трещинных коллекторах

© А.Г. Вахромеев^a, С.А. Сверкунов^b, Р.Х. Акчурин^c,
В.М. Иванишин^d, В.В. Ружич^e, И.В. Ташкевич^f, М.А. Лисицын^g

^{a,b,e,f}Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия

^{a-d,f}Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

^{c,d}Иркутский филиал ООО «РН-Бурение», г. Иркутск, Россия

^gООО «Таас-Юрях Нефтегазодобыча», г. Ленск, Россия

Резюме: В работе обсуждаются методические особенности бурения и заканчивания скважин в трещинных природных резервуарах, вмещающих залежи с разным пластовым давлением флюидонапорных систем – от аномально низкого до аномально высокого. Исследования флюидонапорных систем промышленных бромо-литиеносных рассолов, месторождений и залежей нефти и газа выполнены авторами на юге Сибирской платформы в период с 1983 по 2019 гг. В статье обобщены главные результаты, в том числе новые технические решения, которые защищены патентами Российской Федерации. Авторы предложили и запатентовали серию новых технических решений для закрепления естественных проницаемых трещин сразу, в процессе первичного вскрытия пласта-коллектора бурением применительно к трещинному резервуару. Главная задача исследования – сохранить проницаемость трещинной системы в области призабойной зоны пласта при воздействии сжимающих напряжений (массива горных пород), возрастающих с формированием воронки депрессии, в первую очередь в призабойной зоне пласта при росте депрессии ΔP выше критических значений. Такой областью является призабойная зона пласта в радиусе первых метров вокруг скважины, вскрывшей трещинный пласт-коллектор. Практика показала, что с применением инновационных решений через опережающее закрепление проницаемых трещин в призабойной зоне пласта (флюидопроявляющего нефтегазоносного, рапоносного) в открытом (исходном природном) состоянии обеспечивается сохранение естественной проницаемости природных фильтрующих трещин пласта-коллектора с пластовым давлением флюидной системы от аномально низкого до аномально высокого. Это обеспечивает постоянство проницаемости трещинной фильтрационной системы на протяжении циклов очистки пород призабойной зоны пласта от бурового раствора, получение истинных расчетных гидродинамических параметров по результатам испытания скважины на режимах «методом установившихся отборов» и стабилизацию дебита (продуктивности) при дальнейшей эксплуатации скважины.

Ключевые слова: промышленные воды, трещинные природные резервуары, бурение и заканчивание скважин

Для цитирования: Вахромеев А.Г., Сверкунов С.А., Акчурин Р.Х., Иванишин В.М., Ружич В.В., Ташкевич И.В. [и др.]. Инновационные решения в строительстве глубоких скважин на промышленные рассолы, нефть и газ в деформируемых трещинных коллекторах. *Науки о Земле и недропользование*. 2021. Т. 44. № 2. С. 125–133. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-2-125-133>

Innovative solutions in construction of deep industrial brine, oil and gas wells in deformable fractured reservoirs

Andrey G. Vakhromeev^a, Sergey A. Sverkunov^b, Renat Kh. Akchurin^c,
Vladimir M. Ivanishin^d, Valery V. Ruzhiche^e, Ivan D. Tashkevich^f, Maksim A. Lisitsyn^g

^{a,b,e,f}Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

^{a-d,f}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

^{c,d}LLC “RN-Drilling”, Irkutsk Branch, Irkutsk, Russia

^gTaas-Yuryakh Neftegazodobycha LLC, Lensk, Russia

Abstract: The paper deals with the methodological features of drilling and completion of wells in the fractured natural reservoirs containing oil and gas accumulations with different reservoir pressures of fluid-pressure systems from abnormally high to abnormally low. The authors had studied the fluid-pressure systems of industrial lithium-bromine brines, oil and gas fields and accumulations in the south of the Siberian platform for the period from 1983 to 2019. The article summarizes the main results, including new technical solutions protected by the Russian Federation patents. The authors



proposed and patented a series of new technical solutions for the immediate consolidation of natural permeable fractures during the primary opening of the reservoir by drilling, as applied to a fractured reservoir. The main task of the study is to preserve the permeability of the fractured system in the bottomhole formation zone under the action of compressive stresses (rock mass) that increase with the formation of a drawdown cone, primarily in the bottomhole formation zone with the increase in the drawdown (ΔP) above critical values. Such an area is the bottomhole formation zone within a radius of the first meters around the well that penetrated the fractured reservoir. Practice has proved that the use of innovative solutions through the advanced consolidation of permeable fractures in the bottomhole formation zone (of fluid-producing oil- and gas-bearing, water-bearing reservoir) in the open (initial natural) state ensures the preservation of natural permeability of natural filtering fractures of the reservoir with the fluid system reservoir pressure from anomalously low to abnormally high. The solution ensures constant permeability of the fractured filtration system throughout the cleaning cycles of the bottomhole formation zone rocks from drilling mud, obtaining of the true calculated hydrodynamic parameters based on the results of well testing in the modes of the “steady-state production method” and well flow rate (productivity) stabilization under further well operation.

Keywords: commercial waters, fractured natural reservoirs, well drilling and completion

For citation: Vakhromeev AG, Sverkunov SA, Akchurin RKh, Ivanishin VM, Ruzhich VV, Tashkevich ID, et al. Innovative solutions in construction of deep industrial brine, oil and gas wells in deformable fractured reservoirs. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2021;44(2):125–133. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-2-125-133>

Введение

Геологический разрез осадочного чехла Сибирской платформы, по которому бурится глубокая скважина, априори находится в напряженном состоянии. Исследования закономерностей развития обратимых и необратимых изменений, деформаций горных пород в призабойной зоне пласта (ПЗП) скважин и в продуктивном пласте с углеводородным или гидроминеральным насыщением крайне важны для решения вопросов корректной оценки гидродинамических параметров продуктивного пласта-коллектора (проницаемости, водопроводности, продуктивности по промышленному рассолу, нефти, газоконденсатной смеси, а также извлекаемых запасов гидроминеральной или углеводородной системы; обоснования допустимого диапазона депрессии на систему «пласт – залежь» (флюидодинамическую систему); проектирования гидроразрыва пласта во всех его модификациях.

Материалы и методы исследования

Важно учесть горно-геологические условия конкретного природного резервуара, свойства пластовых гидроминеральных или углеводородных систем. Это позволит обосновать технологические подходы к бурению,

испытанию на продуктивность (гидродинамическим исследованиям) и освоению залежей нефти, газа и металлоносных рассолов в деформируемых коллекторах^{1,2} [1–16].

Залежи промышленных рассолов и углеводородов в терригенных природных резервуарах венда и трещинных массивных резервуарах рифея Сибирской платформы характеризуются аномально низким пластовым давлением флюидов с градиентом около 0,7–0,8 от гидростатического. Высоконапорные залежи в межсолевых карбонатных трещинных пластах (зонах) мегарезервуаров венда-кембрия содержат предельно насыщенные промышленные рассолы – рапу с концентрацией солей более 600 г/л и плотностью до 1,48 г/см³, нередко с газом, что существенно осложняет процесс их вскрытия бурением. Задокументированы дебиты нефти до 1 тыс. м³/сут., газа – до 1 млн м³/сут., слабых рассолов – до 30 тыс. м³/сут., концентрированных рассолов (рапы) – до 7,5 тыс. м³/сут., которые связаны с трещинно-жильным типом коллектора. Значения коэффициента аномальности K_{an} флюидной системы карбонатов кембрия – более 2,35.

Ранее показано, что для первичного вскрытия трещинных коллекторов диапазон текущих забойных давлений в ПЗП не ограничивается областью депрессии, а имеет волновой характер и находится в диапазоне от состояния

¹ Сверкунов С.А., Вахромеев А.Г. Бурение горизонтальных стволов скважин в сложных карбонатных коллекторах с низкими градиентами пластового давления углеводородных систем: учеб. пособие. М. – Вологда: Инфра-Инженерия, 2020. 240 с.

² Усачев П.М. Гидравлический разрыв пласта: учеб. пособие. М.: Недра, 1986. 165 с.



репрессии до депрессии относительно пластовых давлений флюидной системы. По сути, такой коллектор характеризуется равновесными условиями пластового давления флюида и горизонтальной составляющей горного давления на стенки фильтрующих трещин ПЗП, фильтрующих как буровой раствор в первичном вскрытии в условиях $P_{тек} > P_{пл}$, так и флюид из пласта (нефть, газ, промышленные рассолы) в условиях $P_{тек} < P_{пл}$ (здесь $P_{тек}$ – текущее давление; $P_{пл}$ – пластовое давление).

Согласно Б.В. Боревскому, «наиболее очевидной реакцией коллекторов на воздействие приложения внешних сил является их деформация; обнаружение явления деформации коллекторов и заключенных в них жидкостей и газов послужило толчком к созданию теории упругого режима фильтрации, на которой базируются современные методы оценки эксплуатационных запасов флюидов в напорных пластах» [2]. К сходным выводам приходят исследователи в работах [1, 3, 5, 6]. Так, лабораторными экспериментами на керне из продуктивного трещинного коллектора рифея Юрубчено-Тохомского нефтегазоконденсатного месторождения установлено [5], что процесс деформации коллектора необратим. На основе данных по керну описывается, что

коллектор очень неоднороден. Это крайне осложняет эксплуатацию месторождения. При пористости всего до 1,2 % проницаемость микро- и макротрещин колеблется в пределах от 0,00001 до 3,6534 мкм². Такая неоднородность по проницаемости приводит к большим ограничениям и очень узкому диапазону возможных депрессий в цикле добычи флюида – рассолов, нефти. Дело в том, что трещинные системы при определенных депрессиях смыкаются. Скелет коллектора испытывает напряжения, приводящие к «схлопыванию» фильтрующих пустотных пространств, а именно трещин. При восстановлении первичных условий (пластовых давлений) проницаемость трещин заметно снижается, в отдельных случаях до 90 %. Таким образом, скелет горной породы релаксирует и уже не может принять прежний исходный вид (рис. 1). Базовый вывод исследователей заключается в том, что при эксплуатации скважин на нефть и газ в условиях деформируемого карбонатного каверново-трещинного коллектора должны быть обозначены нижние предельные значения депрессии. При падении ниже нижнего уровня будет происходить безвозвратная потеря фильтрационных характеристик коллектора (рис. 2, а). Ограничение депрессии по величине неэффективно (рис. 2, б).



Рис. 1. Изменение зависимости дебита от депрессии по материалам М.Д. Белонина, 2005

Fig. 1. Variation of well flow rate dependence on differential pressure drawdown
based on M.D. Belonin's materials, 2005

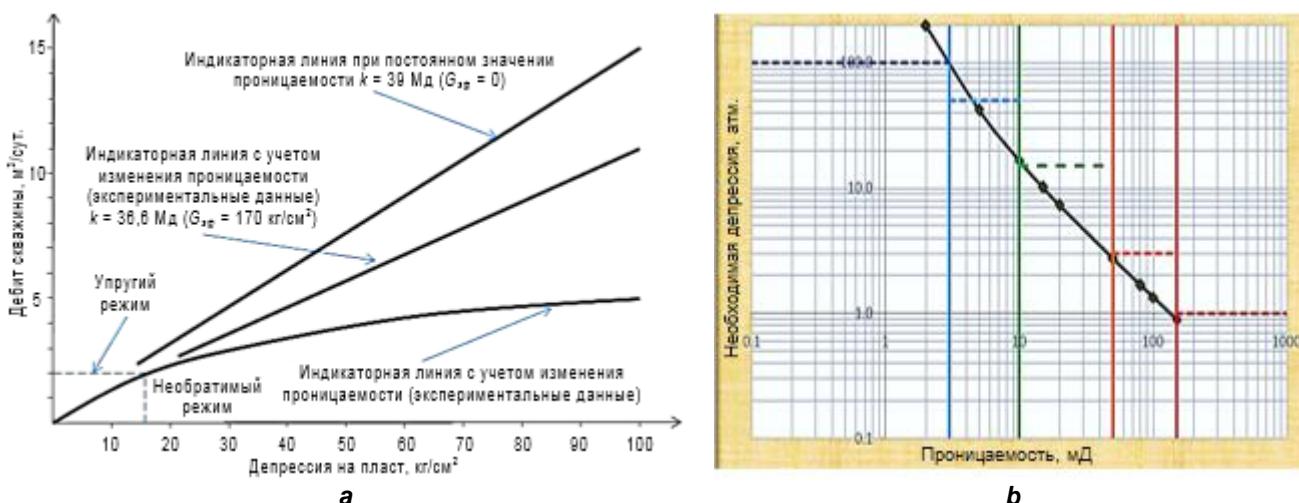


Рис. 2. Сопоставление параметров зависимости дебита от депрессии:

а – по материалам М.Д. Белонина, 2005;

б – по материалам А.Э. Конторовича, 2011

Fig. 2. Parameter comparison of well flow rate vs differential pressure drawdown:

a – based on M.D. Belonin's materials, 2005;

b – based on A.E. Kontorovich's materials, 2011

Геопромысловыми исследованиями доказано: процесс неупругих деформаций трещинной системы в ПЗП может иметь место в определенном диапазоне депрессии (см. рис. 1) либо наблюдается уже непосредственно в рабочих циклах бурения и испытания / освоения скважины – при изменении гидравлической программы бурения. Причем при минимальных колебаниях текущего забойного давления³ и более широком диапазоне динамических давлений на забое – от репрессии до депрессии. Тогда процесс бурения скважин по деформируемому коллектору в условиях минимальных градиентов динамического давления (относительно градиента пластового давления флюида на этой глубине) требует новых проектных и практических решений. Для цикла первичного вскрытия бурением нефтяного пласта сложно подобрать гидравлические условия «щадящего» вскрытия, когда перепад давления на пласт минимален или отсутствует. Если давление в залежи будет уменьшаться интенсивнее, чем это заложено в расчетной модели, то накопленная добыча нефти снижается на 20–28 % добычи, рассчитанной без учета деформаций. На основе данных бурения авторы пришли к выводу (сопоставимому с изложенными в работе [5] полу-

жениями), который подтверждает явление деформации трещинного коллектора, наблюдаемое как в области депрессии, так и в области репрессии, в процессе бурения [3, 4].

Таким образом, подчеркнем, что экспериментального развития требует именно область исследований деформируемых неустойчивых коллекторов. К неустойчивым следует отнести флюидонасыщенные трещинные коллектора в равновесном природном состоянии механической (коллектор, стеки фильтрующих трещин) и гидравлической (флюид) систем. Бурением это хрупкое равновесие нарушается, ПЗП меняет проницаемость под воздействием импульсных гидравлических колебаний потока промывочной жидкости.

В то же время область перепада давления, где в ПЗП (и в воронке депрессии / репрессии) трещинный коллектор деформируется – «узкое» место / область (см. рис. 2, а) на стыке геологии, гидрогеологии, бурения и разработки месторождения флюидов (промышленные воды, углеводороды). Это переходная область от нерентабельной скважины к рентабельной. Находя приемлемый технический подход и алгоритмы его реализации в практике бурового цикла по деформируемым

³ Сверкунов С.А., Вахромеев А.Г. Бурение горизонтальных стволов скважин в сложных карбонатных коллекторах с низкими градиентами пластового давления углеводородных систем: учеб. пособие. М. – Вологда: Инфра-Инженерия, 2020. 240 с.



пластам-коллекторам на этапе геологоразведочных работ, мы решаем проблему сохранения естественной (улучшенной) проницаемости ПЗП в области перепада давлений, приводящих к деформации. Так, в зону рентабельности возвращаются значительные запасы нефти и газа [5], а область некачественной (искаженной) кривой продуктивности переходит в область качественных результатов [1, 3, 4].

Одно из практических решений [1, 5] сегодня – бурение газонагнетательных скважин для поддержания пластового давления. Теоретически доказано, что нижний предел (оптимальная депрессия для добывающих скважин), после которого необходимо вводить систему поддержания пластового давления, составляет 0,3–0,5 МПа [5]. Другое известное решение – воздействие гидроразрыва пласта, когда решается комплекс задач кратного увеличения дебита пласта / скважины по нефти (флюиду), растет рентабельность разработки месторождения. Однако гидроразрыв пласта – это отдельный, самостоятельный цикл работ на нефтегазовой скважине с привлечением специальных подрядных организаций, техники, специалистов. Цикл его весьма затратный, алгоритмы и технологические решения в нем наработаны и постоянно модифицируются.

Результаты исследования и их обсуждение

Авторы предложили и запатентовали серию новых технических решений для закрепления естественных проницаемых трещин сразу, в процессе первичного вскрытия пласта-коллектора бурением применительно к трещинному резервуару. Главная задача запатентованных решений состоит в сохранении проницаемости трещинной системы в области ПЗП при воздействии сжимающих напряжений (массива горных пород), возрастающих с формированием воронки депрессии, в первую очередь в ПЗП при росте

депрессии ΔP выше критических значений. Такой областью является ПЗП в радиусе первых метров вокруг скважины, вскрывшей трещинный пласт-коллектор⁴.

Все решения опираются на опережающее (до создания депрессии на пласт) закрепление естественных фильтрующих трещин в проницаемой части пласта-коллектора природных резервуаров в ПЗП и «работают» для систем как с аномально низким, так и с аномально высоким пластовым давлением. Закрепления периодически выполняют проппантом по аналогии с технологией гидроразрыва пласта⁵ до очистки ПЗП от фильтрата бурового раствора. Это позволяет исключить в дальнейшем необратимое смыкание фильтрующих трещин на этапах очистки пласта и испытания (разведочная скважина) или очистки и освоения (эксплуатационная скважина), то есть скважинной добычи жидкого или газообразного полезного ископаемого при создании первой и последующих депрессий на флюидную систему и продуктивный пласт-коллектор.

Заключение

Практика показала, что посредством инновационных решений⁶ [17–19, 20] через опережающее закрепление проницаемых трещин в ПЗП (флюидопроявляющего нефтегазоносного, рапоносного) в открытом (исходном природном) состоянии обеспечивается сохранение естественной проницаемости природных фильтрующих трещин пласта-коллектора с пластовым давлением флюидной системы от аномально низкого до аномально высокого. Это обеспечивает постоянство проницаемости трещинной фильтрационной системы на протяжении циклов очистки ПЗП от бурового раствора, получение истинных расчетных гидродинамических параметров по результатам испытания скважины на режимах «методом установившихся отборов» и стабилизацию дебита (продуктивности) при дальнейшей эксплуатации скважины.

⁴Мальцев Н.В. Разработка физико-математической модели процесса освоения скважин с помощью УЭЦН: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. М., 2013. 21 с.

⁵Усачев П.М. Гидравлический разрыв пласта: учеб. пособие. М.: Недра, 1986. 165 с.

⁶Мальцев Н.В. Разработка физико-математической модели процесса освоения скважин с помощью УЭЦН: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. М.: ИПНГ РАН, 2013. 21 с.

**Список литературы**

1. Белонин М.Д., Славин В.И., Чилингар Д.В. Аномально высокие пластовые давления. Происхождение, прогноз, проблемы освоения залежей углеводородов. СПб.: Недра, 2005. 324 с.
2. Боревский Л.В. Анализ влияния физических деформаций коллекторов на оценку эксплуатационных запасов подземных вод в глубоких водоносных горизонтах // Методы изучения и оценка ресурсов глубоких подземных вод / ред. С.С. Бондаренко, Г.С. Вартанян. М.: Недра, 1986. С. 374–395.
3. Вахромеев А.Г., Иванишин В.М., Сверкунов С.А., Поляков В.Н., Разяпов Р.К. Глубокая скважина как стенд гидравлических «on-line» исследований напряженного состояния горного массива флюидонасыщенных трещинных коллекторов // Геодинамика и тектонофизика. 2019. Т. 10. № 3. С. 761–778. <https://doi.org/10.5800/GT-2019-10-3-0440>
4. Вахромеев А.Г., Сверкунов С.А., Иванишин В.М., Ильин А.И. Бурение скважин на нефть и газ в сложных горно-геологических условиях: трещинные природные резервуары, АНПД и АВПД пластовых флюидных систем: монография. Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2019. 420 с.
5. Кашников Ю.А., Гладышев С.В., Разяпов Р.К., Конторович А.А., Красильникова Н.Б. Гидродинамическое моделирование первоочередного участка разработки Юрубчено-Тохомского месторождения с учетом гидродинамического эффекта смыкания трещин // Нефтяное хозяйство. 2011. № 4. С. 104–107.
6. Фукс Б.А., Ващенко В.А., Москальц А.Г. Промысловая характеристика продуктивных пластов юга Сибирской платформы. М.: Недра, 1982. 184 с.
7. Aurton S. High fluid pressure, isothermal surfaces and initiation nappe movement // Geology. 1980. Vol. 8. Iss. 4. P. 172–174. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1980\)8<172:HFPISA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1980)8<172:HFPISA>2.0.CO;2)
8. Barton N.R., Bandis S., Bakhtar K. Strength, deformation and conductivity coupling of rock joints // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. 1985. Vol. 22. Iss. 3. P. 121–140. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(85\)93227-9](https://doi.org/10.1016/0148-9062(85)93227-9)
9. Blanton T.L. Propagation of hydraulically and dynamically induced fractures in naturally fractured reservoirs // SPE 15261, Presented at the SPE/DOE Unconventional Gas Technology Symposium. Louisville, 1986.
10. Butts Ch. Fensters in the Cumberland overthrust block in Southwestern Virginia // Virginia Geological Survey Bulletin. 1927. Vol. 28. P. 1–12.
11. Chilingar G.V., Serebryakov V.A., Robertson Jr. J.O. Origin and prediction of abnormal formation pressures.
- Oxford: Elsevier: 2002. 391 p.
12. De Paor D.G. Balanced section in thrust belts. Part 1: Construction // The American Association of Petroleum Geologists Bulletin. 1988. Vol. 72. Iss. 1. P. 73–90. <https://doi.org/10.1306/703C81CD-1707-11D7-8645000102C1865D>
13. Fertl W.H., Chapman R.E., Hotz R.F. Studies in abnormal pressures // Developments in Petroleum Science. Vol. 38. Oxford: Elsevier, 1994. 454 p.
14. Hoek E., Carranza-Torres C., Corkum B. Hoek-Brown failure criterion // Proceedings of the 5th North American Rock Mechanics Symposium. Toronto, 2002. P. 267–273.
15. Hubbert M.K., Rubey W.W. Role of fluid pressure in mechanics of overthrust faulting: I. Mechanics of fluid-filled porous solids and its application to overthrust faulting // Geological Society of America Bulletin. 1959. Vol. 70. Iss. 2. P. 115–166. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1959\)70\[115:ROFPIM\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1959)70[115:ROFPIM]2.0.CO;2)
16. Jennings Jr. A.R. Hydraulic fracturing applications. PE Enhanced Well Stimulation, Inc., 2003. 168 p.
17. Пат. № 2602437, Российская Федерация, RU 2 602 437 С1. Способ первичного вскрытия бурением горизонтального ствола в трещинном типе нефтегазонасыщенного карбонатного коллектора в условиях аномально низких пластовых давлений / А.Г. Вахромеев, С.А. Сверкунов, В.М. Иванишин, Р.У. Сираев, Р.К. Разяпов, А.К. Сотников [и др.]. Заявл.: 11.09.2015; опубл. 20.11.2016. Бюл. № 32.
18. Пат. № 2657052, Российская Федерация, RU 2 657 052 С1. Способ испытания и освоения флюидонасыщенного пласта-коллектора трещинного типа (варианты) / В.М. Иванишин, А.Г. Вахромеев, С.А. Сверкунов, Сираев Р.У., Горлов И.В., Ланкин Ю.К. Заявл. 21.04.2017; опубл. 08.06.2018. Бюл. № 16.
19. Пат. № 2740630, Российская Федерация, RU 2 740 630 С1. Способ снижения избыточной упругой энергии в глубинных сейсмоопасных сегментах разломов / В.В. Ружич, А.Г. Вахромеев, С.А. Сверкунов, Шилько Е.В., Иванишин В.М., Акчурин Р.Х. Заявл. 02.06.2020; опубл. 18.01.2021. Бюл. № 2.
20. Акчурин Р.Х., Бурмистров И.А., Вахромеев А.Г., Данилова Е.М., Иванишин В.М., Лебедев Л.С. [и др.]. Технология и геологопромысловое сопровождение кустового горизонтального бурения нефтедобывающих скважин в сложных карбонатных коллекторах рифея Юрубчено-Тохомского нефтегазоконденсатного месторождения: монография. Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2016. 224 с.

References

1. Belonin MD, Slavin VI, Chilingar DV. *Abnormally high reservoir pressures. Origin, forecast, development problems of hydrocarbon deposits*. Saint Petersburg: Nedra; 2005. 324 p. (In Russ.)
2. Borevskii LV. Analysis of the effect of reservoir physical deformations on the assessment of operational groundwater reserves in deep aquifers. In: Bondarenko SS, Vartanyan GS (eds.). *Metody izucheniya i otsenka resursov glubokikh podzemnykh vod = Research methods and assessment of deep groundwater resources*. Moscow: Nedra; 1986. p.374–395. (In Russ.)
3. Vakhromeev AG, Ivanishin VM, Sverkunov SA, Pol'yakov VN, Razayev RK. Deep well as a facility for on-line hydraulic studies of the stress state of the rock mass in fluid-saturated fractured reservoirs. *Geodinamika i tektonofizika = Geodynamics & Tectonophysics*. 2019;10(3):761–



778. (In Russ.) <https://doi.org/10.5800/GT-2019-10-3-0440>

4. Vakhromeev AG, Sverkunov SA, Ivanishin VM, Il'in AI. *Drilling of oil and gas wells in complex mining and geological conditions: fractured natural reservoirs, abnormally low and abnormally high pressure of reservoir fluid systems*. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University; 2019. 420 p. (In Russ.)

5. Kashnikov YuA, Gladyshev SV, Ryazapov RK, Kon-torovich AA, Krasilnikova NB. Hydrodynamical modeling of first-priority area in development of Yurubcheno-Tokhomskoye oilfield, with a glance of geomechanical effect of closing the fracture. *Neftyanoe khozyaistvo*. 2011;4:104–107. (In Russ.)

6. Fuks BA, Vashchenko VA, Moskal'ts AG. *Production characteristics of productive reservoirs in the south of the Siberian platform*. Moscow: Nedra; 1982. 184 p. (In Russ.)

7. Aurton S. High fluid pressure, isothermal surfaces and initiation nappe movement. *Geology*. 1980;8(4):172–174. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1980\)8<172:HFPISA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1980)8<172:HFPISA>2.0.CO;2)

8. Barton NR, Bandis S, Bakhtar K. Strength, deformation and conductivity coupling of rock joints. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. 1985;22(3):121–140. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(85\)93227-9](https://doi.org/10.1016/0148-9062(85)93227-9)

9. Blanton TL. Propagation of hydraulically and dynamically induced fractures in naturally fractured reservoirs. *SPE 15261, Presented at the SPE/DOE Unconventional Gas Technology Symposium*. Louisville; 1986.

10. Butts Ch. Fensters in the Cumberland overthrust block in Southwestern Virginia. *Virginia Geological Survey Bulletin*. 1927;28:1–12.

11. Chilingar GV, Serebryakov VA, Robertson JO. *Origin and prediction of abnormal formation pressures*. Oxford: Elsevier; 2002. 391 p.

12. De Paor DG. Balanced section in thrust belts. Part 1: Construction. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*. 1988;72(1):73–90. <https://doi.org/>

10.1306/703C81CD-1707-11D7-8645000102C1865D

13. Fertl WH, Chapman RE, Hotz RF. Studies in abnormal pressures. In: *Developments in Petroleum Science*. Vol. 38. Oxford: Elsevier; 1994. 452 p.

14. Hoek E, Carranza-Torres C, Corkum B. Hoek-Brown failure criterion. In: *Proceedings of the 5th North American Rock Mechanics Symposium*. Toronto; 2002. p.267–273.

15. Hubbert MK, Rubey WW. Role of fluid pressure in mechanics of overthrust faulting: I. Mechanics of fluid-filled porous solids and its application to overthrust faulting. *Geological Society of America Bulletin*. 1959;70(2):115–166. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1959\)70\[115:ROFPI\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1959)70[115:ROFPI]2.0.CO;2)

16. Jennings AR. *Hydraulic fracturing applications*. PE Enhanced Well Stimulation, Inc.; 2003. 168 p.

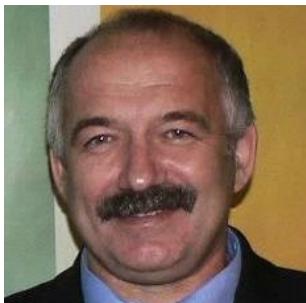
17. Vakhromeev AG, Sverkunov SA, Ivanishin VM, Siraev RU, Razjapov RK, Sotnikov AK, et al. *Method for primary opening by drilling of horizontal shaft in fracture type of oil and gas saturated carbonate reservoir under conditions of abnormally low formation pressures*. Patent RF, no. 2602437; 2016. (In Russ.)

18. Ivanishin VM, Vakhromeev AG, Sverkunov SA, Siraev RU, Gorlov IV, Lankin YK. *Method of testing and conversion of fluid-saturated fracture reservoir bed (variants)*. Patent RF, no. 2657052; 2018. (In Russ.)

19. Ruzhich VV, Vakhromeev AG, Sverkunov SA, Shilko EV, Ivanishin VM, Akchurin RKh. *Method for reduction of excessive elastic energy in deep seismic dangerous segments of fractures*. Patent RF, no. 2740630; 2021. (In Russ.)

20. Akchurin RKh, Burmistrov IA, Vakhromeev AG, Danilova EM, Ivanishin VM, Lebedev LS, et al. *Technology and geological commercial support of horizontal cluster drilling of oil producing wells in the complex carbonate reservoirs of the Riphean Yurubcheno-Tokhomskoye oil and gas condensate field*. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University; 2016. 224 p. (In Russ.)

Сведения об авторах / Information about the authors



Вахромеев Андрей Гелиевич,

доктор геолого-минералогических наук,

заведующий Лабораторией геологии нефти и газа,

Институт земной коры СО РАН,

664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия,

профессор кафедры нефтегазового дела,

Институт недропользования,

Иркутский национальный исследовательский технический университет,

664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,

✉ e-mail: andrey_igp@mail.ru

Andrey G. Vakhromeev,

Dr. Sci. (Geol. & Mineral.),

Head of the Laboratory of Oil and Gas Geology,

Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,

128 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia,

Professor of the Department of Oil and Gas Production,

Institute of Subsoil Use,

Irkutsk National Research Technical University,

83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,

✉ e-mail: andrey_igp@mail.ru



Сверкунов Сергей Александрович,
кандидат технических наук,
научный сотрудник Лаборатории геологии нефти и газа,
Институт земной коры СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия,
доцент кафедры нефтегазового дела,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
Sergey A. Sverkunov,
Cand. Sci. (Eng.),
Researcher of the Laboratory of Oil and Gas Geology,
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
128 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia,
Associate Professor of the Department of Oil and Gas Production,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
e-mail: dobro_75@mail.ru



Акчурин Ренат Хасанович,
аспирант,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
первый заместитель директора (технический директор),
Иркутский филиал ООО «РН-Бурение»,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 257, Россия,
e-mail: AkchurinRH@ifrnb.ru
Renat Kh. Akchurin,
Postgraduate Student,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
First Deputy Director (Technical Manager),
LLC "RN-Drilling", Irkutsk Branch,
257 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia,
e-mail: AkchurinRH@ifrnb.ru



Иваншин Владимир Мирославович,
аспирант,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
директор,
Иркутский филиал ООО «РН-Бурение»,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 257, Россия,
e-mail: IvanishinVM@ifrnb.ru
Vladimir M. Ivanishin,
Postgraduate Student,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
Director,
LLC "RN-Drilling", Irkutsk Branch,
257 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia,
e-mail: IvanishinVM@ifrnb.ru

**Ружич Валерий Васильевич,**доктор геолого-минералогических наук,
главный научный сотрудник Лаборатории тектонофизики,
Институт земной коры СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия,
e-mail: ruzhich@crust.irk.ru**Valery V. Ruzhich,**Dr. Sci. (Geol. & Mineral.),
Chief Researcher of the Laboratory of Tectonophysics,
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
128 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia,
e-mail: ruzhich@crust.irk.ru**Ташкевич Иван Дмитриевич,**ведущий инженер Лаборатории геологии нефти и газа,
Институт земной коры СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия,
аспирант,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: Vantash@mail.ru**Ivan D. Tashkevich,**Leading Engineer of the Oil and Gas Laboratory,
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
128 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia,
Postgraduate Student,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
e-mail: Vantash@mail.ru**Лисицин Максим Алексеевич,**главный специалист отдела технологий,
ООО «Таас-Юрях Нефтегазодобыча»,
678144, г. Ленск, ул. Первомайская, 32, Россия,
e-mail: maksiimkaboxx@mail.ru**Maksim A. Lisitsyn,**Chief Specialist of the Technology Department,
Taas-Yuryakh Neftegazodobycha LLC,
32 Pervomaiskaya St., Lensk 678144, Russia,
e-mail: maksiimkaboxx@mail.ru

Заявленный вклад авторов / Contribution of the authors

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

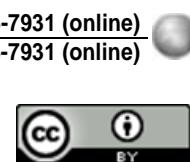
Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 10.03.2021; одобрена после рецензирования 11.04.2021; принята к публикации 13.05.2021.

The article was submitted 10.03.2021; approved after reviewing 11.04.2021; accepted for publication 13.05.2021.



Оригинальная статья / Original article

УДК 556.16(282.256.86)

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-2-134-140>© В.Е. Глотов^a^aСеверо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт
им. Н.А. Шило ДВО РАН, г. Магадан, Россия

Резюме: В статье представлены и проанализированы данные о подземных водах зон активного (надмерзлотные) и затрудненного (подмерзлотные) водообмена геодинамически разных террейнов с целью доказать гидрогеологическую значимость их историко-тектонических характеристик. На примере Заполярной Чукотки показано, что в надмерзлотных условиях повсеместно распространенные элювиально-делювиальные покровы наиболее водобильны на террейне – фрагменте пассивной континентальной окраины, наименее – на террейнах активной окраины. В подмерзлотной обстановке гидрогеологическая ситуация изменяется: более водопроницаемые и водоемкие породы слагают террейны активной окраины. Эти отличия связаны с уровнем тектонического разуплотнения пород и, соответственно, с различной интенсивностью процессов выветривания пород террейнов разной геодинамической природы в надмерзлотных и подмерзлотных условиях. В зоне гипергенеза на террейнах пассивной континентальной окраины продукты выветривания пород, накопившиеся в относительно спокойных геологических обстановках, крупнообломочные, заполнитель – песчаный. На террейнах активной окраины, претерпевших длительные субвертикальные и субгоризонтальные перемещения, продукты выветривания более мелкообломочны, в составе заполнителя – супеси и суглинки. Так как толща многолетнемерзлых пород на Заполярной Чукотке, как и в Восточной Сибири, больше глубины гипергенных преобразований, в подмерзлотных условиях большей водообильностью отличаются террейны активной континентальной окраины, породы которых испытывали воздействие процессов тектонического разуплотнения, в основном сдвигового и надвигового характера.

Ключевые слова: Заполярная Чукотка, тектоническое разрыхление, гипергенез, террейны, криолитозона, зоны свободного и затрудненного водообмена

Благодарности: Автор благодарен Л.П. Глотовой за помощь в сборе фактического материала и оформлении результатов данного исследования. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-05-60036.

Для цитирования: Глотов В.Е. Гидрогеологические отличия геодинамически разных террейнов. *Науки о Земле и недропользование*. 2021. Т. 44. № 2. С. 134–140. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-2-134-140>

Hydrogeological dissimilarity of geodynamically different terranes

© Vladimir E. Glotov^a^aNorth-East Interdisciplinary Scientific Research Institute named after M.A. Shilo,
Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Magadan, Russia

Abstract: The article presents and analyzes the data on ground waters of active (suprapermafrost) and hindered (subpermafrost) water exchange of geodynamically different terrains in order to prove the hydrogeological importance of their historical and tectonic characteristics. On the example of Trans-Polar Chukotka it is shown that, under suprapermafrost conditions, the ubiquitous eluvial-deluvial nappes are the most water-abundant on the terrane – a fragment of the passive continental margin, whereas they are the least water-abundant on the terrains of the active margin. Hydrogeological situation changes under subpermafrost conditions: more permeable and water-retaining rocks compose the terranes of the active margin. These differences are associated with the level of rock tectonic decompaction and, accordingly, with different intensity of weathering processes in the terrane rocks of different geodynamic origin in suprapermafrost and subpermafrost conditions. The hypergenesis zone on the terranes of the passive continental margin features coarse-grained rock weathering products accumulated in relatively calm geological and historical environments, the aggregate is sandy. The terranes of the active margin, which underwent long-term subvertical and subhorizontal displacements contain more fine-grained weathering products; the aggregate includes sandy loam and clay sand. Since the permafrost strata in both Trans-Polar Chukotka and Eastern Siberia is greater than the depth of hypergene transformations, the terranes of the active continental margin, the rocks of which were impacted by tectonic decompaction processes, mainly of a strike-slip and thrust nature, feature greater water abundance in subpermafrost conditions.

Keywords: Trans-Polar Chukotka, tectonic loosening, hypergenesis, terranes, permafrost zone, zones of free and hindered water exchange

Acknowledgements: The author is grateful to Lyudmila P. Glotova for her help in fact-finding and formalization of the research results. The research was funded by the Russian Foundation for Basic Research within the framework of the scientific project no. 18-05-60036.



For citation: Glotov VE. Hydrogeological dissimilarity of geodynamically different terranes. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use.* 2021;44(2):134–140. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-2-134-140>

Введение

В предыдущих работах, опубликованных с 2012 года до настоящего времени, нами было показано, что роль зоны свободного (активного, интенсивного) водообмена в формировании общего водного стока в горных районах криолитозоны в определенной степени связана с геодинамической природой террейнов [1, 2]. Напомним, что террейн – это ограниченное разломами геологическое тело (блок) регионального масштаба, характеризующееся составом пород, структурными особенностями, тектонической историей, отличающей его от соседних блоков [3–5]. По своей геодинамической природе террейны могут быть фрагментами древних платформ (кратонами), пассивных континентальных окраин и образующихся в зонах погружения океанической коры под континентальную (зоны субдукции) активных континентальных окраин: террейны островных дуг, аккреционные, задуговые и т. д. [6]. Автором данной работы выявлены гидрологические и гидрогоеологические признаки влияния террейнов на формирование практически всех составляющих водного режима рек, в том числе ледового и половодий [7, 8]. В представляющих данные аспекты работах подчеркнуто, что эти заключения относятся к зоне свободного водообмена. Активность геохимических процессов гипергенного преобразования пород в данной зоне определяется не только их составом, но и степенью тектонической дезинтеграции или тектонического разрыхления [9, 10]. Наиболее дезинтегрированы породы, слагающие террейны активных континентальных окраин, испытавших длительные во времени и в пространстве перемещения. На площадях этих террейнов, прежде всего на выпложенных водоразделах и на склонах речных долин, продукты выветривания более насыщены тонкими и глинистыми частицами, чем продукты выветривания на площадях террейнов пассивных континентальных окраин или кратонов. По этой причине современные водообменные процессы в горных долинах на террейнах активной окраины замедлены по сравнению с про-

цессами на террейнах пассивных окраин. Вместе с тем, действие фактора выветривания затруднено или не происходит в подмерзлотных горизонтах при мощности криолотозоны более 100–120 м, то есть глубже проникновения гипергенных трещин [11].

Материалы и методы исследования

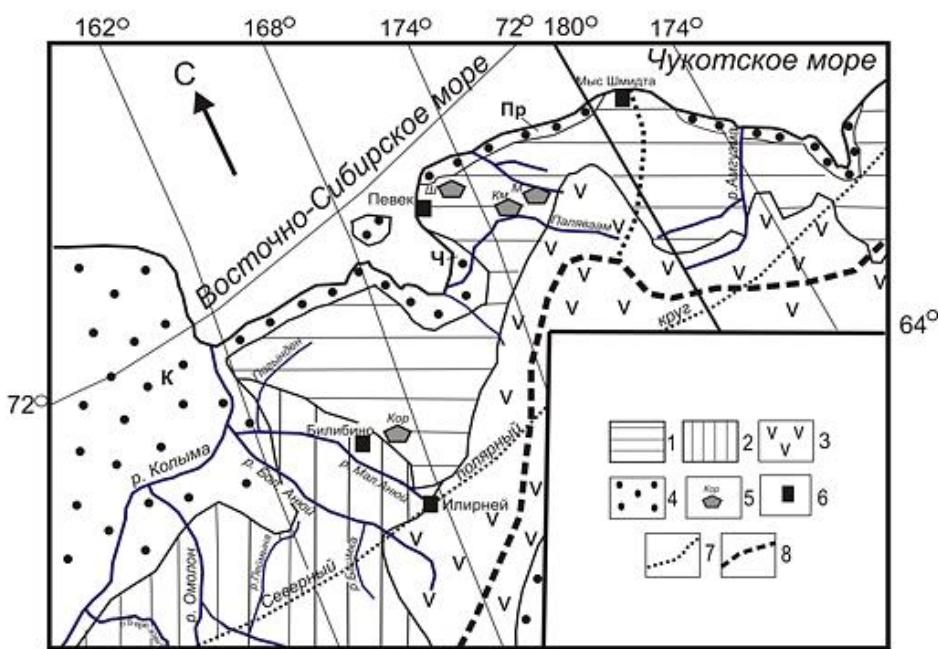
Целью представленного исследования являлось выявление гидрогоеологических особенностей в террейнах разной геодинамической природы не только в зоне свободного водообмена, но и в подмерзлотных условиях. Предметом исследования были подмерзлотные воды, очень слабо изученные в данном регионе. Основными методами исследования послужили анализ и обобщение фактического материала как опубликованных, так и рукописных отчетов.

Геолого-гидрогоеологические условия района

Изучаемая территория (рисунок) омывается Восточно-Сибирским и Чукотским морями, с юга она ограничена Полярным кругом ($66^{\circ}33'44''$ с. ш.), с запада – долиной р. Колымы, с востока – меридианом 180° С, за которым начинается западное полушарие Земли. Преобладающий рельеф здесь – преимущественно слаженные низкие горы Чукотского нагорья. На участках интрузивных и вулканогенных массивов развиты среднегорные хребты с отметками до 1800 м.

Реки – горные, водосборные площади их – не больше 57 тыс. km^2 (р. Большой Ануй). Речные долины несут следы ледникового воздействия, в верховьях рек и их боковых притоках имеются места развития ледниковых цирков [12].

В геологическом отношении Заполярная Чукотка относится к Олойско-Чукотскому орогенному поясу, в строении которого принимает участие Чукотский террейн – фрагмент пассивной континентальной окраины, а также Олойско-Ануйская система террейнов активной окраины [13, 14]. Последние сложились



Географо-геологическая схема Заполярной Чукотки:

1–3 – горные территории на тектонической основе: 1 – Чукотского террейна пассивной континентальной окраины, 2 – Аньюско-Олойской системы террейнов активной окраины, 3 – эфузивных покровов мелового возраста; 4 – низменности: К – Колымская, Ч – Чаунская, Пр – Приморская; 5 – участки многолетних геолого-разведочных работ на площадях месторождений: Ш – Штокверковое, М – Майское, Км – Комсомольское, Кор – Коральвеемское; 6 – постоянные населенные пункты; 7 – Северный полярный круг; 8 – Главный водораздел Земли

Geographic and geological diagram of Trans-Polar Chukotka:

1–3 – mountainous territories on a tectonic basis of: 1 – Chukotka terrane of the passive continental margin, 2 – Anyui-Oloy terrane system of the active margin, 3 – effusive nappes of the Cretaceous age;
4 – lowlands: К – Kolymskaya, Ч – Chaunskaya, Пр – Primorskaya; 5 – sites of long-term geological exploration works on the deposits: Ш – Shtokverkovoye, М – Mayskoye, Км – Komsomolskoye, Кор – Koralveemskoye; 6 – permanent settlements;
7 – Arctic Circle; 8 – the main Earth Divide

на территории бывшего океанического про- лива, разделяющего Североазиатскую и Се- вероамериканскую литосферные плиты. За- крытие океана в начале позднего мела сопро- вождалось сближением указанных плит, фрагменты островных дуг были надвинуты на их окраины. Эти события, завершившиеся около 120 млн лет назад, находят отражение в современных особенностях формирования и распространения подземных вод.

Геокриологическая обстановка определяется повсеместным распространением много- летнемерзлых пород [15, 16].

Результаты исследования и их обсуждение

Наиболее заметны гидрогеологические от- личия при изучении минимального расхода в теплый период года – в августе-сентябре в условиях меженного стока. В это время

в питании рек участвуют преимущественно воды сезонно-талого слоя и надмерзлотных таликов (табл. 1). С потеплением климата увеличивается роль таяния гидрокриогенного ресурса [17–20]. Современная значимость этого ресурса в питании заполярных рек отражена в публикации [21].

Подмерзлотные воды не имеют четко вы-раженных выходов на дневную поверхность. Они изучались с помощью скважин глубиной 200–300, реже – до 500 м при разведке руд-ных месторождений (Ю.А. Маркин, А.М. Ру-давский, Т.Ю. Щитникова и др.), для изучения условий водоснабжения арктических посел-ков и в редких случаях при выполнении гидро-геологической съемки масштаба 1:200000 (Д.В. Ефимова, Л.Н. Санникова). Обобщенные результаты многолетних работ приведены в табл. 2.



Таблица 1. Показатели стока вод сезонно-талого слоя в реки Заполярной Чукотки [21]
Table 1. Indicators of seasonally thawed layer water runoff in the rivers of Trans-Polar Chukotka [21]

Река, пункт; площадь водосбора, км ²	Дренируемый террейн	Период наблюдений, годы	Минимальный сток за 30 сут. в летний период, межень	
			Мм	Л/с·км ²
Палываам, 0,8 км ниже устья р. Кооквын; 6810	Чаунский субтеррейн Чукотского террейна пассивной окраины	1971–1980	23	0,73
		1981–1996	28	0,84
Погынден, устье р. Инкулинвеем; 12000	Зона взаимодействия Олойско-Анюйской системы террейнов активной окраины с Чукотским террейном	1960–1980	8	0,25
		1981–1996	11	0,35
Инкулинвеем, устье; 242	Нутесынский террейн – фрагмент островной вулканической дуги Олойско-Анюйской системы террейнов активной окраины	1960–1980	1	0,03
		1981–2010	2	0,06
Пеймына, 1,5 км выше устья; 1480	Олойский террейн – фрагмент островной дуги Олойско-Анюйской системы террейнов активной окраины	1968–1980	6	0,19
		1981–1994	8	0,25
Баймка, пос. Баймка; 480	Олойский и Яракваамский террейны – фрагменты островных дуг Олойско-Анюйской системы террейнов активной окраины	1963–1980	12	0,38
		1981–2000	12	0,38

Таблица 2. Геокриологические и гидрогеологические условия террейнов Центрального Заполярья*
Table 2. Geocryological and hydrogeological conditions of Central Arctic terranes*

Вскрытая мощность многолетнемерзлых пород, м: от минимума до максимума; средняя	Статистическая отметка уровня подмерзлотных вод, м: от минимума до максимума; аномальные значения	Сведения об удельных дебитах скважин, л/с·м: от минимума до максимума; аномальные значения
Чукотский террейн – фрагмент пассивной континентальной окраины (63 скважины)		
Складчато-надвиговые блоки (54 скважины)		
От 161 до 245; средняя – 185	От 209 до 267; аномальные – 235	От 0,0002 до 0,07; аномальные: 0,115 – в долине р. Пыркакайваам; 0,11–0,25 – в долине руч. Олений; 0,16 – на водоразделе руч. Олений и Рогатый
Поле развития пород триасового возраста вне осложняющих структур (9 скважин)		
От 100 до 213; средняя – 145. Наибольшая – на горных склонах, наименьшая – в речных долинах	От 160 до 530; аномальные – 175. Максимальная – в долинах верховий рек при наличии озер ледникового происхождения	От 0,000003 до 0,001; аномальные: до 1,5 – в зонах сквозных таликов
Олойско-Анюйская система террейнов – фрагментов активной окраины (7 скважин)		
От 120 до 263; средняя – 165	До 560 м – сквозной талик в долине р. Коральвеем; аномальные: со статическими отметками в единицы и первые десятка метров – в замкнутых подмерзлотных линзах	От 0,01 (месторождение Встречное) до 45 (сквозной талик в долине р. Коральвеем) ¹

*Примечание. * По материалам полевых работ Д.В. Ефимовой, О.И. Макартцева, В.П. Матвеева, Ю.А. Маркина,
Г.Ю. Фейгина и др. Мерзлотно-гидрогеологические показатели по скважинам в прибрежно-морской зоне в таблицу
не включены.*

*Note. * Based on the field work materials of Dina V. Efimova, Oleg I. Makartsev, Viktor P. Matveev, Yuri A. Markin, Georgy
Yu. Feigin et al. Cryogenic and hydrogeological indicators by the wells in the coastal-marine zone are not included
in the table.*

¹ Шумихина М.К. Гидрогеология // Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-б 1:1000000
(новая серия). Лист R-58 (60) – Билибино. Объяснительная записка. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 1999. С. 68–76.



Представленные в табл. 2 данные позволяют рассматривать площадь Чукотского террейна как сложную гидрогеологическую структуру, подмерзлотные воды которой находятся в условиях затрудненного и весьма затрудненного водообмена. На этом фоне выделяются ограниченные разломами тектонически напряженные складчато-надвиговые или складчато-чешуйчатые участки (своды, блоки) с подмерзлотными водами, распространеными в зонах брекчирования и горизонтальных надвигах, водопроводимость которых, судя по удельным дебитам, в десятки и сотни раз превышает этот показатель в окружающих массивах горных пород, но остается крайне низкой. По этой причине подмерзлотный обмен в таких сводах затруднен даже под руслами дренирующих их водотоков.

В системе террейнов – фрагментов активной окраины показатели водоносности триасовых и нижнеюрских пород в подмерзлотных условиях явно выше, чем на площади Чукотского террейна.

Заключение

Таким образом, есть основания считать, что зона свободного водообмена на площадях террейнов – фрагментов пассивных континентальных окраин более водообильна, чем на террейнах – фрагментах активных окраин. В подмерзлотной зоне затрудненного водообмена, не затронутой процессами гипергенного преобразования, выше водообильность пород, слагающих террейны – фрагменты активных окраин.

Список литературы

- Глотов В.Е. Влияние геодинамической природы террейнов на ресурсы пресных подземных вод (на примере Северо-Востока России) // Подземная гидросфера: материалы Всерос. совещ. по подземным водам Востока России. Иркутск, 2012. С. 310–314.
- Глотов В.Е. Террейны – новые объекты гидрогеологических исследований // Подземные воды России: материалы Всерос. совещ. по подземным водам Востока России. Новосибирск – Иркутск, 2018. С. 156–160.
- Казанцева Т.Т. Фундаментальные теории эволюции земной коры // Вестник Академии наук Республики Башкортостан. 2015. Т. 20. № 3. С. 14–27.
- Имаева Л.П., Имаев В.С., Мельникова В.И., Козьмин Б.М. Новейшие структуры и тектонические режимы напряженно-деформированного состояния земной коры северо-восточного сектора Российской Арктики // Геотектоника. 2016. № 6. С. 3–22. <https://doi.org/10.7868/S0016853X16060035>
- Toro J., Miller E.L., Prokopiev A.V., Zhang X., Veselovskiy R. Mesozoic orogens of the Arctic from Novaia Zemlya to Alaska // Journal of the Geological Society. 2016. Vol. 173. Iss. 6. P. 989–1006. <https://doi.org/10.1144/jgs2016-083>
- Гатинский Ю.Г., Рундквист Д.В., Владова Г.Л., Мирлин Е.Г., Миронов Ю.В., Рожкова В.В. [и др.]. Зоны субдукции: действующие силы, геодинамические типы, сейсмичность и металлогения // Вестник Отделения геологии, геофизики, геохимии и горных наук Российской академии наук. 2020. Т. 1. № 2. С. 1–11.
- Глотов В.Е., Глотова Л.П., Ушаков М.В. Тектонический контроль ледового режима водотоков Верхней Колымы // Геоэкология. Инженерная геология. Гидро-геология. Геокриология. 2017. № 3. С. 31–40.
- Глотов В.Е., Глотова Л.П., Ушаков М.В. Роль геологической истории водосборных площадей в формировании половодий в горах Сибири // Устойчивое развитие горных территорий. 2020. Т. 12. № 1. С. 26–38.
- Леонов М.Г., Кочарян Г.Г., Ревуженко А.Ф., Лавриков С.В. Тектоника разрыхления: геологические данные и физика процесса // Геодинамика и тектонофизика. 2020. Т. 11. № 3. С. 491–521. <https://doi.org/10.5800/GT-2020-11-3-0488>
- Киссин И.Г. Флюидная система и геофизические неоднородности консолидированной земной коры континентов // Вестник Отделения геологии, геофизики, геохимии и горных наук Российской академии наук. 2001. № 2. С. 1–22.
- Пиннекер Е.В., Писарский Б.И. Особенности взаимодействия подземных вод и многолетнемерзлых пород // Региональная гидрогеология и инженерная геология Восточной Сибири: сб. стат. Новосибирск: Наука, 1978. С. 21–27.
- Беликович А.В., Галанин А.А., Галанин А.В., Галанин Д.А., Галанина Л.М., Головин О.С. [и др.]. Природа и ресурсы Чукотки / ред. А.В. Галанин. Магадан: Изд-во СВКНИИ ДВО РАН, 1997. 236 с.
- Бялобжеский С.Г., Горячев Н.А., Шпикерман В.М. Кратоны и орогенные пояса Востока России // Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России / ред. А.И. Ханчук. Кн. 1. Владивосток: Дальнаука, 2006. С. 144–152.
- Тибилов И.В. Особенности геологического развития Севера Чукотки с позиций термодинамической парадигмы эндогенных процессов. Магадан: Изд-во СВКНИИ ДВО РАН, 2005. 302 с.
- Афанасенко В.Е., Замолотчикова С.А., Тишин М.И., Зуев И.А. Северо-Чукотский регион // Геокриология СССР / ред. Э.Д. Ершов. М.: Недра, 1989. С. 280–293.
- Фотиев С.М. Подземные воды криогенной области России (классификация) // Криосфера Земли. 2013. Т. 17. № 2. С. 41–59.
- Алексеев В.Р. Талая вода – криогенный ресурс планеты // География и природные ресурсы. 2012. № 1. С. 24–31.



18. Алексеев В.Р., Бояринцев Е.Л., Гопченко Е.Д., Сербов Н.Г., Завалий Н.В. Механизмы криогенного регулирования стока в формировании водного баланса малых горных рек зоны многолетнемерзлых пород // Украинский гидрометеорологический журнал. 2011. № 8. С. 182–194.

19. Алексеев В.Р., Горин В.В., Котов С.В. Наледи-тaryны Северной Чукотки // Лед и снег. 2011. № 4. С. 85–93.

20. Толстыхин О.Н. Наледи и подземные воды Северо-Востока СССР / отв. ред. С.М. Фотиев. Новосибирск: Наука, 1974. 164 с.

21. Глотов В.Е., Ушаков М.В. Климатически обусловленные изменения стока заполярных рек Западной Чукотки // Криосфера Земли. 2020. Т. 24. № 6. С. 33–44. [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2020-6\(33-44\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2020-6(33-44))

References

1. Glotov VE. Influence of terrane geodynamic nature on fresh groundwater resources (on example of the North-East of Russia). In: *Podzemnaya gidrosfera: materialy Vserossiiskogo soveshchaniya po podzemnym vodam Vostoka Rossii = Underground hydrosphere: Proceedings of the All-Russian meeting on groundwater in the East of Russia*. Irkutsk; 2012. p.310–314. (In Russ.)
2. Glotov VE. Terranes – new objects of hydrogeological research. In: *Podzemnye vody Rossii: materialy Vserossiiskogo soveshchaniya po podzemnym vodam Vostoka Rossii = Underground waters of Russia: Proceedings of the All-Russian meeting on groundwater in the East of Russia*. Novosibirsk – Irkutsk; 2018. p.156–160. (In Russ.)
3. Kazantseva TT. Basic theories on the evolution of the Earth's crust. *Vestnik Akademii nauk Respubliki Bashkortostan = The Herald of the Academy of Sciences of the Republic of Bashkortostan*. 2015;20(3):14–27. (In Russ.)
4. Imaeva LP, Imaev VS, Mel'nikova VI, Koz'min BM. Recent structures and tectonic regimes of the stress-strain state of the Earth's crust in the northeastern sector of the Russian Arctic region. *Geotektonika*. 2016;6:3–22. (In Russ.) <https://doi.org/10.7868/S0016853X16060035>
5. Toro J, Miller EL, Prokopiev AV, Zhang X, Veselovskiy R. Mesozoic orogens of the Arctic from Novaya Zemlya to Alaska. *Journal of the Geological Society*. 2016;173(6):989–1006. <https://doi.org/10.1144/jgs2016-083>
6. Gatinskii YuG, Rundkvist DV, Vladova GL, Mirlin EG, Mironov YuV, Rozhkova VV, et al. Subduction zones: acting forces, geodynamic types, seismicity and metallogeny. *Vestnik Otdeleniya geologii, geofiziki, geokhimii i gornykh nauk Rossiiskoi akademii nauk*. 2020;1(2):1–11. (In Russ.)
7. Glotov VE, Glotova LP, Ushakov MV. The tectonic control of the ice regime in Upper Kolyma rivers. *Geokrogiya. Inzhenernaya geologiya. Gidrogeologiya. Geokrogiya*. 2017;3:31–40. (In Russ.)
8. Glotov VE, Glotova LP, Ushakov MV. Flooding processes in Subarctic mountains as affected by catchment areas geology. *Ustoichivoe razvitiye gornykh territorii = Sustainable Development of Mountain Territories*. 2020;12(1):26–38. (In Russ.)
9. Leonov MG, Kocharyan GG, Revuzhenko AF, Lavrikov SV. Tectonics of rock loosening: geological data and physics of the process. *Geodinamika i tektonofizika = Geodynamics & Tectonophysics*. 2020;11(3):491–521. (In Russ.) <https://doi.org/10.5800/GT-2020-11-3-0488>
10. Kissin IG. The fluid system and geophysical heterogeneities of the consolidated Earth crust of the continents. *Vestnik Otdeleniya geologii, geofiziki, geokhimii i gornykh nauk Rossiiskoi akademii nauk*. 2001;2:1–22. (In Russ.)
11. Pinneker EV, Pisarskii BI. Groundwater and permafrost rock interaction features. In: *Regional'naya hidrogeologiya i inzhenernaya geologiya Vostochnoi Sibiri = Regional hydrogeology and engineering geology of Eastern Siberia*. Novosibirsk: Nauka; 1978. p.21–27. (In Russ.)
12. Belikovich AV, Galanin AA, Galanin AV, Galanin DA, Galanina LM, Golovin OS, et al. *Nature and resources of Chukotka*. Magadan: North-East Interdisciplinary Scientific Research Institute named after M.A. Shilo, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences; 1997. 236 p. (In Russ.)
13. Byalobzheskii SG, Goryachev NA, Shpikerman VM. Cratons and orogenic belts of Russian East. In: Khanchuk AI (ed.). *Geodinamika, magmatizm i metallogeniya Vostoka Rossii = Geodynamics, magmatism and metallogeny of the East of Russia*. Book 1. Vladivostok: Dal'nauka; 2006. P.144–152. (In Russ.)
14. Tibilov IV. *Geologic history of Northern Chukotka from viewpoints of a thermodynamic paradigm of endogenous processed*. Magadan: North-East Interdisciplinary Scientific Research Institute named after M.A. Shilo, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences; 2005. 302 p. (In Russ.)
15. Afanasenko VE, Zamolotchkova SA, Tishin MI, Zuev IA. *North Chukotska region*. In: Ershov ED (ed.). *Geokriologiya SSSR = USSR Geocryology*. Moscow: Nedra; 1989. p.280–293. (In Russ.)
16. Fotiev SM. Underground waters of cryogenic area of Russia (classification). *Kriosfera Zemli*. 2013;17(2):41–59. (In Russ.)
17. Alekseev VR. Melt water as a cryogenic resource of the planet. *Geografiya i prirodnye resursy*. 2012;1:24–31. (In Russ.)
18. Alekseev VR, Boiaryntsev YeL, Gopchenko YeD, Serbov MG, Zavaliv NV. The mechanism of cryogenic runoff control at the formation of water balance of small mountain rivers in the area of permafrost rocks. *Ukrainskii hidrometeorologicheskii zhurnal = Ukrainian Hydrometeorological Journal*. 2011;8:182–194. (In Russ.)
19. Alekseev VR, Gorin VV, Kotov SV. Giant icings – taryns of Northern Chukotka. *Led i sneg = Ice and Snow*. 2011;4:85–93. (In Russ.)
20. Tolstikhin ON. *Icing mounds and groundwater in the USSR North-East*. Novosibirsk: Nauka; 1974. 164 p. (In Russ.)
21. Glotov VE, Ushakov MV. Climate-related changes in the runoff of polar rivers in Western Chukotka. *Kriosfera Zemli*. 2020;24(6):33–44. [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2020-6\(33-44\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2020-6(33-44))

**Сведения об авторе / Information about the author**

Глотов Владимир Егорович,
доктор геолого-минералогических наук,
главный научный сотрудник Лаборатории региональной геологии и геофизики,

Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт

им. Н.А. Шило ДВО РАН,

685000, г. Магадан, ул. Портовая, 16, Россия,

✉ e-mail: geocol@neisri.ru

Vladimir E. Glotov,

Dr. Sci. (Geol. & Mineral.),

Chief Researcher of the Laboratory of Regional Geology and Geophysics,

North-East Interdisciplinary Scientific Research Institute named after M.A. Shilo,

Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences,

16 Portovaya St., Magadan 685000, Russia,

✉ e-mail: geocol@neisri.ru

Заявленный вклад автора / Contribution of the author

Автор выполнил исследовательскую работу, на основании полученных результатов провел обобщение, подготовил рукопись к печати.

The author performed the research, made a generalization on the basis of the results obtained and prepared the copyright for publication.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

The author declares no conflicts of interests.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and approved by the author.

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 04.03.2021; одобрена после рецензирования 08.04.2021; принятa к публикации 12.05.2021.

The article was submitted 04.03.2021; approved after reviewing 08.04.2021; accepted for publication 12.05.2021.



Оригинальная статья / Original article

УДК 550.34+556.3

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-2-141-150>



Гидрологические предвестники землетрясений и вулканических активизаций по данным наблюдений в скважинах полуострова Камчатка

© Г.Н. Копылова^a, С.В. Болдина^b

^{a,b}Камчатский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук», г. Петропавловск-Камчатский, Россия

Резюме: Цель работы заключалась в представлении результатов обобщения данных о проявлениях гидрологических предвестников землетрясений и активизаций вулканов по многолетним наблюдениям в скважинах, расположенных в восточных районах полуострова Камчатка. Основным рассматриваемым вопросом являлась связь проявлений гидрологических предвестников в нескольких скважинах с величинами магнитуды M_w и эпицентralного расстояния землетрясений до скважин d_e , а также с параметрами сейсмического воздействия в районе наблюдений: удельной плотностью энергии сейсмических волн e и макросейсмической интенсивностью сотрясений I_{MSK-64} . В результате исследований выявлено, что гидрологические предвестники в двух-четырех скважинах проявлялись в течение времени от одного до девяти месяцев перед наиболее сильными землетрясениями с магнитудами $M_w = 6,6\text{--}7,8$ на расстояниях $d_e = 90\text{--}300$ км. Такие землетрясения сопровождались сотрясениями интенсивностью $I_{MSK-64} = 4\text{--}6$ баллов, и величины e при таких землетрясениях составляли не менее 0,1 Дж/м³; гидрологические предвестники были приурочены к области, для которой величины отношения эпицентralного расстояния землетрясений d_e к максимальному линейному размеру очага землетрясения L составляли от 1 до 3,7. С использованием установленных связей между проявлениями гидрологических предвестников и параметрами землетрясений составляются еженедельные прогнозные заключения для экспертных советов по прогнозу землетрясений по данным текущих наблюдений в скважинах. В скважине, расположенной на расстоянии 15 и 20 км от действующих вулканов Корякского и Авача, проявлялся эффект аномального роста давления подземной воды перед извержениями 1991 и 2008–2009 гг. Таким образом, можно сделать вывод о том, что функционирующие технические средства наблюдений в скважинах, результаты изучения гидрологических предвестников землетрясений и извержений вулканов, а также опыт их применения в работе экспертных советов составляют научно-технический базис разработки геоинформационной технологии прогнозирования природных катастроф в Камчатском крае.

Ключевые слова: скважина, гидрологические предвестники, землетрясение, вулкан, геоинформационная технология, полуостров Камчатка

Благодарности: Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-00576-21 и целевой программы «Развитие») с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира».

Для цитирования: Копылова Г.Н., Болдина С.В. Гидрологические предвестники землетрясений и вулканических активизаций по данным наблюдений в скважинах полуострова Камчатка. *Науки о Земле и недропользование*. 2021. Т. 44. № 2. С. 141–150. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-2-141-150>

Hydrogeological precursors of earthquakes and volcanic activations according to observation data in Kamchatka Peninsula wells

© Galina N. Kopylova^a, Svetlana V. Boldina^b

^{a,b}Kamchatka Branch of Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

Abstract: The purpose of the study is generalization of data on the manifestations of hydrogeological earthquake precursors and volcanic activations based on long-term observations in the wells of the eastern part of the Kamchatka Peninsula. The main problem under consideration is the connection between the manifestations of hydrogeological precursors in several wells with the values of the magnitude M_w and epicentral distance of earthquakes to the wells d_e as well as with



the parameters of seismic action in the observation area including specific density of seismic wave energy e and macroseismic intensity of shaking I_{MSK-64} . The study results revealed that hydrogeological precursors in two-four wells had been manifesting for the period from 1 to 9 months before the strongest earthquakes with $M_w = 6.6\text{--}7.8$ at the epicentral distances $d_e = 90\text{--}300$ km. Such earthquakes were accompanied by the shakings of the intensity of $I_{MSK-64} = 4\text{--}6$ points. The specific density of seismic energy under such earthquakes was minimum 0.1 J/m^3 . The hydrogeological precursors were confined to the area for which the ratios of the earthquake epicentral distance d_e to the maximum linear size of the earthquake source L , km ranged from 1 to 3.7. Using the established relationships between the manifestations of hydrogeological precursors and earthquake parameters, weekly prognostic conclusions were made for expert earthquake prediction councils based on the data of current observations in wells. The well located at the distance of 15 and 20 km from the Koryaksky and Avacha active volcanoes featured the anomalous rise of groundwater pressure before the eruptions in 1991 and 2008–2009. Therefore, a conclusion can be drawn that observation equipment operating in wells, the study results of hydrogeological precursors of earthquakes and volcanic eruptions as well as their application experience in the work of expert councils can form the scientific and technical basis for the development of geoinformation prediction technology for natural disasters in the Kamchatka Krai.

Keywords: well, hydrogeological precursors, earthquake, volcano, geoinformation technology, the Kamchatka Peninsula

Acknowledgements: The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (no. 075-00576-21 and the target program Development). The data were obtained through the use of the unique research facility “Seismic infrasound complex for monitoring Arctic cryolithozone and continuous seismic monitoring of the Russian Federation, neighbouring territories and the world”.

For citation: Kopylova GN, Boldina SV. Hydrogeological precursors of earthquakes and volcanic activations according to observation data in Kamchatka Peninsula wells. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2021;44(2):141–150. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-2-141-150>

Введение

Рост населения и увеличение площади урбанизированных территорий в сейсмоактивных регионах Земли с проявлениями активного вулканизма вызывает необходимость создания надежных систем оценки сейсмической и вулканоопасности, а также обеспечения прогнозов сильных землетрясений и пароксизмальных извержений вулканов. К таким регионам относится территория полуострова Камчатка, расположенного в пределах Тихоокеанского сейсмического пояса в зоне сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг (рис. 1, а). Здесь различными научными и производственными учреждениями проводятся многолетние исследования предвестников землетрясений и извержений вулканов. На основе таких предвестников создаются методы прогнозирования, которые используются в работе экспертных советов по прогнозу землетрясений и извержений вулканов [1, 2].

Автоматизированные системы регистрации различных видов предвестников и результаты исследования их связи с параметрами землетрясений и извержений вулканов рассматриваются нами в качестве научно-технического базиса геоинформационной технологии прогнозирования природных катастроф. Назначением данной технологии является ее

использование административными органами при осуществлении превентивных мероприятий и повышении качества управлеченческих решений в кризисных ситуациях, сопряженных с высокой вероятностью возникновения сильного землетрясения или извержения вулкана. Главными компонентами ее являются: автоматизированные системы наблюдений, передачи и обработки данных за параметрами полей Земли для оперативного выделения предвестников; научно обоснованные и апробированные на практике правила применения предвестников для прогнозирования землетрясений и извержений вулканов; система принятия решений о прогнозе катастрофического события, о доведении его до населения и осуществлении превентивных мероприятий.

Особенностью создания научно-технического базиса геоинформационной технологии прогнозирования природных катастроф является необходимость длительного (от нескольких лет до десятилетий) этапа мониторинговых исследований геофизических, геохимических, гидрогеологических, деформационных и других полей Земли и соответствующих видов предвестников. Причина преимущественно эмпирического и длительного по времени способа получения научного знания о предвестниках имеет объективный характер и заключа-



ется в редкости возникновения главных объектов прогнозирования – сильных землетрясений с катастрофическими последствиями и пароксизмальных вулканических извержений. В Камчатском регионе повторяемость опасных землетрясений с величинами магнитуд порядка 7–8 составляет от десятков до первых сотен лет, а периодичность пароксизмальных извержений вулканов Корякского и Авача, расположенных вблизи г. Петропавловска-Камчатского, – первые десятки лет [1]. С учетом высокой социальной и экономической значимости административных решений по прогнозам природных катастроф накопление научного знания о предвестниках, их свойствах и особенностях проявления в конкретном регионе не может подменяться гипотетическими представлениями о них. Поэтому опытно-экспериментальное примене-

ние предвестников в практике прогнозирования землетрясений и извержений вулканов в реальном времени является необходимым этапом проверки и верификации всех видов предвестников.

В настоящей работе представлены результаты обобщения данных о гидрологических предвестниках (ГП) землетрясений в пяти наблюдательных скважинах Петропавловск-Камчатского полигона, расположенного на полуострове Камчатка (рис. 1, *b*), с использованием материалов из ранее опубликованных работ авторов [3–8] и других исследователей [9–11]; дана оценка современного состояния гидрологического метода как потенциального элемента научно-технического базиса геоинформационной технологии прогнозирования природных катастроф в Камчатском крае.

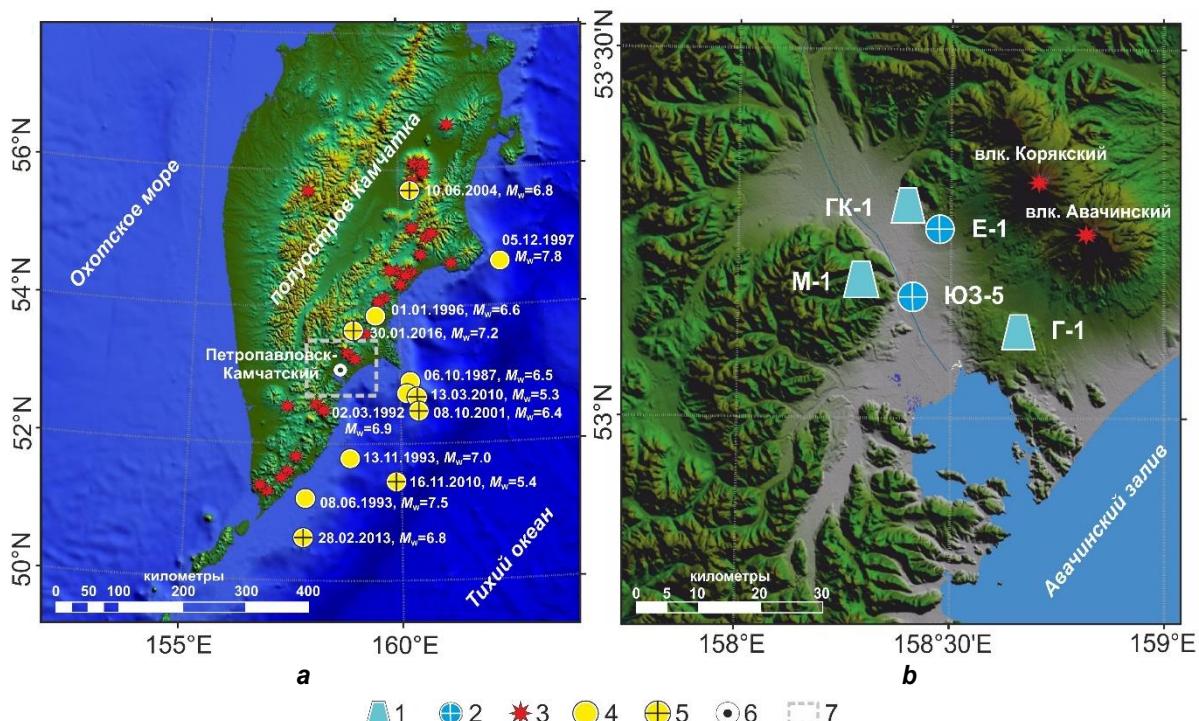


Рис. 1. Схемы расположения эпицентров землетрясений в районе полуострова Камчатка, перед которыми проявлялись гидрологические предвестники (а), и наблюдательных скважин на территории Петропавловск-Камчатского полигона (б):

- 1 – самоизливающаяся скважина;
- 2 – пьезометрическая скважина;
- 3 – действующий вулкан;
- 4–5 – эпицентры землетрясений, перед которыми гидрологические предвестники были выявлены:
- 4 – ретроспективно, 5 – в режиме реального времени;
- 6 – г. Петропавловск-Камчатский;
- 7 – Петропавловск-Камчатский полигон

Fig. 1. Location diagrams of epicenters of earthquakes on the Kamchatka Peninsula preceded by hydrogeological precursor manifestations (a) and observation wells on the Petropavlovsk-Kamchatsky test site (b):

- 1 – flowing well;
- 2 – pressure observation well;
- 3 – active volcano;
- 4–5 – epicenters of the earthquakes, before which hydrogeological precursors were identified: 4 – retrospectively, 5 – in real time mode;
- 6 – the city of Petropavlovsk-Kamchatsky;
- 7 – the Petropavlovsk-Kamchatsky test site



Материалы и методы исследования

Камчатский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (КФ ФИЦ ЕГС РАН) много лет проводит наблюдения на сети скважин на территории Петропавловск-Камчатского полигона (см. рис. 1) с целью поиска ГП в изменениях параметров подземных вод: уровня / давления, температуры и химического состава воды и газа [12, 13]. Наблюдательные скважины (см. рис. 1, б) вскрывают напорные подземные воды в скальных водовмещающих породах на глубинах от первых сотен метров до 2,5 км. В работах [1–3, 12–15] приводятся данные о скважинах, технических средствах измерения параметров подземных вод, дается описание методов обработки данных наблюдений, рассматриваются выявленные гидрогеодинамические и гидрохимические эффекты перед землетрясениями и активизациями ближайших вулканов, анализируются примеры успешного использования ГП при прогнозировании землетрясений. В работах [14–16] рассматриваются сигналы в изменении давления воды в скважине Е-1 при активизациях вулканов Корякского и Авача.

Уникальной особенностью многолетнего эксперимента по регистрации параметров подземных вод в скважинах Петропавловск-Камчатского полигона является то, что эти данные используются для составления регулярных еженедельных сообщений о наличии / отсутствии ГП. По данным наблюдений за вариациями уровня воды в скважинах Е-1 и ЮЗ-5 (см. рис. 1, б) прогностические заключения составляются в Лаборатории геофизических исследований КФ ФИЦ ЕГС РАН под руководством Г.Н. Копыловой с 2002 г. По данным гидрохимических наблюдений на скважинах ГК-1, М-1 и Г-1 заключения составляются в Лаборатории гидросейсмологии КФ ФИЦ ЕГС РАН [1, 3]. Сейсмопрогностические заключения передаются в экспертные советы по прогнозу землетрясений, действующие в Камчатском крае. Одной из функций таких советов, в частности Камчатского филиала

Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений, оценке сейсмической опасности и риска (КФ РЭС), является оценка поданных прогнозов на предмет их соответствия с произошедшими землетрясениями [1–3].

Результаты исследования

Связь гидрогеологических предвестников с параметрами землетрясений. Рассмотрим зависимость между проявлениями ГП в нескольких ($n \geq 2$) скважинах от параметров последующих землетрясений – величин их магнитуды M_w и эпицентralьного расстояния d_e , км – с учетом параметров воздействия землетрясений в районе наблюдений (рис. 2). В качестве параметров воздействия ожидающего землетрясения после проявления ГП использовалась расчетная величина удельной плотности сейсмической энергии e , Дж/м³, [3, 17–19] и интенсивность сотрясений по 12-балльной шкале MSK-64 I_{MSK-64} ¹ в районе г. Петропавловска-Камчатского.

Всего за время наблюдений произошло семь землетрясений (таблица), перед которыми ГП проявлялись в двух-четырех скважинах. Все такие землетрясения относились к наиболее сильным сейсмическим событиям с магнитудами $M_w = 6,6\text{--}7,8$ и происходили на эпицентralьных расстояниях $d_e = 90\text{--}300$ км от скважин. На территории Петропавловск-Камчатского полигона такие землетрясения сопровождались сотрясениями с интенсивностью $I_{MSK-64} = 4\text{--}6$ баллов. В районах скважин величины сейсмической энергии e при таких землетрясениях составляли от 0,1 до 4,5 Дж/м³. Было обнаружено, что ГП проявляются в нескольких скважинах исключительно в ближней и средней (промежуточной) зонах очагов землетрясений [3, 21], для которых величина отношения эпицентralьного расстояния землетрясений d_e к максимальному линейному размеру очага землетрясения L составляет от 1 до 3,7 (см. таблицу).

Время и заблаговременность проявления ГП перед землетрясениями в отдельных скважинах составляли от одного до девяти месяцев (см. таблицу). Это показывает, что оперативная диагностика ГП дает возможность их

¹ Медведев С.В., Шпонхойер В., Карник В. Шкала сейсмической интенсивности MSK-64. М.: Изд-во МГК АН СССР, 1965. 11 с.

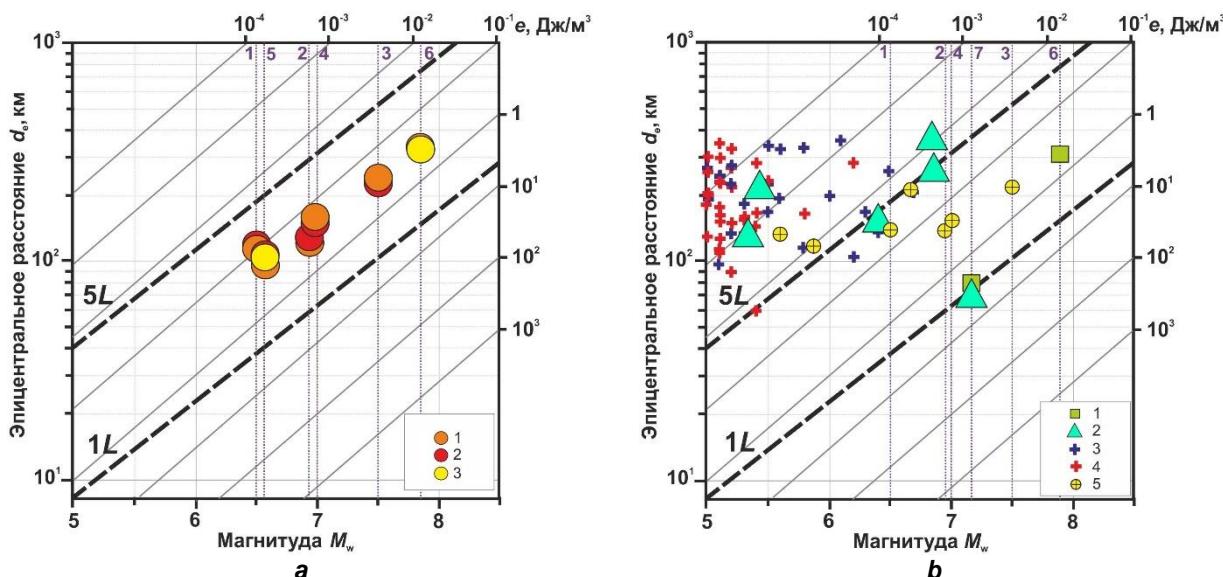


Рис. 2. Распределение гидрологических предвестников в наблюдательных скважинах в зависимости от магнитуды M_w и эпицентralного расстояния d_e последующих землетрясений, а также удельной плотности сейсмической энергии e :

a – гидрологические предвестники в химическом составе воды в самоизливающихся скважинах:

1 – ГК-1; 2 – М-1; 3 – Г-1; *b – гидрологические предвестники в изменениях уровня воды в пьезометрических скважинах: 1 – ЮЗ-5; 2–5 – Е-1: 2 – гидрологические предвестники выделены в реальном времени с выдачей заключения о возможном землетрясении для Камчатского филиала Российской экспертизы совета по прогнозу землетрясений, оценке сейсмической опасности и риска, 3 – гидрологические предвестники перед землетрясениями с $M_w \geq 5$, $d_e \leq 350$ км выделены ретроспективно, 4 – гидрологические предвестники перед землетрясениями с $M_w \geq 5$, $d_e \leq 350$ км не проявлялись, 5 – гидрологические предвестники перед землетрясениями 1987–1996 гг. выделены ретроспективно [5]*

Тонкими вертикальными пунктирными линиями показаны землетрясения 1–7 (таблица), которым предшествовали проявления гидрологических предвестников в двух-четырех скважинах

Линии 1L, 5L показывают один и пять максимальных линейных размеров очага землетрясения в зависимости от величины магнитуды [20]

Fig. 2. Distribution of hydrogeological precursors in observation wells depending on the magnitude M_w and epicentral distance d_e of the consequent earthquakes, as well as specific density of the seismic energy e :

a – hydrogeological precursors in the chemical composition of water in flowing wells: 1 – GK-1; 2 – M-1; 3 – G-1;

b – hydrogeological precursors in water level changes in pressure observation wells: 1 – YuZ-5; 2–5 – E-1:

2 – hydrogeological precursors are identified in real-time and a prognostic conclusion on possible earthquake is given for the Kamchatka Branch of the Russian Expert Council on Earthquake Prediction, Assessment of Seismic Hazard and Risk, 3 – hydrogeological precursors of the earthquakes with $M_w \geq 5$, $d_e \leq 350$ km were identified retrospectively, 4 – hydrogeological precursors of the earthquakes with $M_w \geq 5$, $d_e \leq 350$ km did not manifest themselves,

5 – hydrogeological precursors of 1987–1996 earthquakes were identified retrospectively [5]

Thin vertical dashed lines show earthquakes 1–7 (see the table),

which were preceded by the manifestations of hydrogeological precursors in two-four wells

Lines 1L and 5L show one and five maximum linear sizes of the earthquake source depending on the magnitude [20]

использования в комплексе с другими сейсмо-прогностическими данными для осуществления средне-краткосрочного прогнозирования сильных землетрясений. Результаты анализа ГП в пяти скважинах Петропавловск-Камчатского полигона (см. рис. 1, *b*) также показывают, что все они являются информативными для обнаружения ГП перед сильными землетрясениями при условии обеспечения их естественного режима, не нарушенного техногенными воздействиями.

Повышенная чувствительность скважины Е-1 к процессам подготовки землетрясений и вулканических активаций. Скважина Е-1 расположена в 12 и 25 км от действующих вулканов Корякского и Авача (см. рис. 1, *b*). Она характеризуется повышенной чувствительностью к процессам подготовки землетрясений на расстояниях до 350 км. В ней ГП проявляется как перед сильными ($M_w \geq 6,6$), так и перед средними по силе землетрясениями ($M_w = 5–6,5$) [3, 5, 16]. При этом степень



Землетрясения, которым предшествовали проявления гидрогеологических предвестников в двух-четырех наблюдательных скважинах, полуостров Камчатка (номера землетрясений соответствуют номерам на рис. 2)^{2,3}
Earthquakes preceded by the manifestations of hydrogeological precursors in two-four observation wells, the Kamchatka Peninsula (earthquake numbers correspond to the numbers in Fig. 2)^{2,3}

Землетрясение	Дата, координаты эпицентра	H , км	M_w	L , км	d_e , км	d_e/L	e , Дж/м ³	I_{MSK-64} , баллы	Скважина; продолжительность / заблаговременность проявления гидрогеологических предвестников*, недели
1	06.10.1987, 52.86°N 160.23°E	33	6,5	37	130–134	3,5–3,7	0,1	5	ГК-1 – 30/30, М-1 – 4/4, Е-1 – 5/5
2	02.03.1992, 52.76°N 160.20°E	20	6,9	56	133–136	2,4	0,2	5–6	ГК-1 – 39/39, М-1 – 4/4, Е-1 – 9,5/9,5
3	08.06.1993, 51.20°N 157.80°E	40	7,5	103	220–233	2,1–2,3	0,3	5	ГК-1 – 4/4, М-1 – 4/21,5, Е-1 – 36/36
4	13.11.1993, 51.79°N 158.83°E	40	7	62	157–167	2,5–2,7	0,1–0,2	5–6	ГК-1 – 4/4, М-1 – 4/17, Е-1 – 12/12
5	01.01.1996, 53.88°N 159.44°E	0	6,6	41	95–108	2,3–2,6	0,1–0,2	4–5	ГК-1 – 30/30, М-1 – 4/13, Г-1 – 21,5/21,5
6	05.12.1997, 54.64°N 162.55°E	10	7,8	139	305–314	2,2–2,3	0,3–0,4	5–6	ГК-1 – 21,5/21,5, Г-1 – 13/13, Е-1 – 3/3, Ю3-5 – 3/3
7	30.01.2016, 53.86°N 158.73°E	168	7,2	76	70–80	0,9–1,1	2,7–4,1	4	Е-1 – 3/3, Ю3-5 – 15/15

Примечание. H – глубина очага землетрясения; M_w – магнитуда землетрясения; L – максимальный линейный размер очага землетрясения по [20]; d_e – эпицентральное расстояние до скважин; e – удельная плотность энергии сейсмических волн; I_{MSK-64} – интенсивность сотрясений в районе г. Петропавловска-Камчатского по 12-балльной шкале макросейсмической интенсивности⁴. * Продолжительность предвестника – продолжительность аномальных изменений гидрогеологических параметров в скважине; заблаговременность предвестника – время от начала аномальных изменений до землетрясения.

Note. H – depth of the earthquake source; M_w – magnitude of the earthquake; L – maximum linear size of the earthquake source according to [20]; d_e – epicentral distance to wells; e – specific density of seismic wave energy; I_{MSK-64} – shaking intensity according to the 12-point scale of macroseismic intensity⁴ in the area of the city of Petropavlovsk-Kamchatsky.

* Duration of the precursor – duration of anomalous changes of hydrogeological parameters in the well; precursor lead time – time from the onset of anomalous changes to the earthquake.

связи проявлений ГП перед землетрясениями увеличивается с ростом величины магнитуды: ГП проявляются примерно в 50 % случаев перед событиями с $M_w = 5–6,5$ и в 100 % случаев перед землетрясениями с $M_w = 6,6–7,8$ (см. рис. 2, b).

По данным наблюдений в скважине Е-1 в режиме реального времени были выделены ГП с выдачей заблаговременных прогнозов шести землетрясений 2001–2016 гг. с $M_w = 5,3–7,2$ (см. рис. 1, a; 2, b). По заключениям КФ

² Earthquake Hazards // USGS [Электронный ресурс]. URL: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes> (18.02.2021).

³ Каталог землетрясений Камчатки и Командорских островов (1962 г. – наст. вр.) // EMSD [Электронный ресурс]. URL: <http://sdis.emsd.ru/info/earthquakes/catalogue.php> (18.02.2021).

⁴ Медведев С.В., Шпонхойер В., Карник В. Шкала сейсмической интенсивности MSK-64. М.: Изд-во МГК АН СССР, 1965. 11 с.



РЭС эти прогнозы были признаны оправдавшими по времени, местоположению и величине магнитуды ожидаемых сейсмических событий [1, 22, 23].

За время наблюдений на скважине Е-1 с 1987 г. трижды происходили активизации близких вулканов, в том числе эксплозивно-эфузивное извержение вулкана Авача в январе 1991 г., гидротермально-магматическое извержение Корякского вулкана в декабре 2008 и 2009 г., а также усиление сейсмичности и фумарольной деятельности вулкана Авача в октябре 2019 – марте 2020 г. [14, 15]. В каждом случае перед такими активизациями наблюдалось повышение уровня воды в течение первых лет, показывающее рост давления подземной воды с амплитудами 0,045–0,122 бар. В качестве причины роста давления рассматривались два гипотетических механизма, инициированных движением гидротермально-магматического флюида: за счет квазиупругой деформации объемного сжатия водовмещающих пород [16] и за счет увеличения газовой разгрузки в ствол скважины [24].

Заключение

Таким образом, созданная в КФ ФИЦ ЕГС РАН техническая и информационная инфраструктура автоматизированных наблюдений на скважинах Петропавловск-Камчатского полигона обеспечивает получение, обработку и оперативный анализ данных с выделением ГП в режиме, близком к реальному времени.

Установленные связи проявлений ГП в нескольких скважинах с параметрами наиболее сильных землетрясений совместно с оценками их воздействия в районах наблюдений, а также результаты использования ГП в практике работы экспертных советов по прогнозу землетрясений составляют научно-технический базис для включения гидрологического метода скважинных наблюдений в разработку геоинформационной технологии прогнозирования природных катастроф в Камчатском крае. Отдельные скважины, расположенные вблизи действующих вулканов, также могут использоваться для мониторинга вулканической активности и прогнозирования извержений.

Список литературы

1. Чебров В.Н., Салтыков В.А., Серафимова Ю.К. Прогнозирование землетрясений на Камчатке. По материалам работы Камчатского филиала Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений, оценке сейсмической опасности и риска в 1998–2009 гг. М.: Светоч Плюс, 2011. 304 с.
2. Чебров В.Н., Салтыков В.А., Серафимова Ю.К. Опыт выявления предвестников сильных ($M \geq 6,0$) землетрясений на Камчатке в 1998–2011 гг. по материалам КФ РЭС // Вулканология и сейсмология. 2013. № 1. С. 85–95. <https://doi.org/10.7868/S0203030613010033>
3. Kopylova G., Boldina S. Hydrogeological earthquake precursors: a case study from the Kamchatka peninsula // Frontiers in Earth Science. 2020. Vol. 8. P. 576017. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.576017>
4. Копылова Г.Н., Сугробов В.М., Хаткевич Ю.М. Особенности изменения режима источников и гидрологических скважин Петропавловского полигона (Камчатка) под влиянием землетрясений // Вулканология и сейсмология. 1994. № 2. С. 53–70.
5. Копылова Г.Н. Изменения уровня воды в скважине Елизовская-1, Камчатка, вызванные сильными землетрясениями (по данным наблюдений в 1987–1998 гг.) // Вулканология и сейсмология. 2001. № 2. С. 39–52.
6. Копылова Г.Н. Изменения уровня воды в скважине ЮЗ-5, Камчатка, вызванные землетрясениями // Вулканология и сейсмология. 2006. № 6. С. 52–64.
7. Копылова Г.Н., Болдина С.В. О механизме гидрологического предвестника Кроноцкого землетрясения 5 декабря 1997 г., $M_w = 7,8$ // Тихоокеанская геология. 2012. Т. 31. № 5. С. 104–114.
8. Болдина С.В., Копылова Г.Н. Эффекты Жупановского землетрясения 30 января 2016 г., $M_w = 7,2$, в изменениях уровня воды в скважинах ЮЗ-5 и Е-1, Камчатка // Геодинамика и тектонофизика. 2017. Т. 8. № 4. С. 863–880. <https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-4-0321>
9. Biagi P.F., Ermini A., Kingsley S.P., Khatkevich Y.M., Gordeev E.I. Groundwater ion content precursors of strong earthquakes in Kamchatka (Russia) // Pure and Applied Geophysics. 2000. Vol. 157. P. 1359–1377. <https://doi.org/10.1007/PL00001123>
10. Biagi P.F., Ermini A., Cozzi E., Khatkevich Y.M., Gordeev E.I. Hydrochemical precursors in Kamchatka (Russia) related to the strongest earthquakes in 1988–1997 // Natural Hazards. 2000. Vol. 21. P. 263–276. <https://doi.org/10.1023/A:1008178104003>
11. Хаткевич Ю.М., Рябинин Г.В. Гидрогеохимические исследования на Камчатке // Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки. К 25-летию Камчатского филиала ГС РАН / отв. ред. Е.И. Гордеев, В.Н. Чебров. Петропавловск-Камчатский: Камчатский печатный двор, 2004. С. 96–112.
12. Копылова Г.Н., Болдина С.В. Гидрогеосейсмологические исследования на Камчатке: 1977–2017 гг. // Вулканология и сейсмология. 2019. № 2. С. 3–20. <https://doi.org/10.31857/S0205-9614201923-20>



13. Копылова Г.Н., Болдина С.В. Гидрогеосейсмические вариации уровня воды в скважинах Камчатки: монография. Петропавловск-Камчатский: Камчатпресс, 2019. 144 с.
14. Копылова Г.Н., Болдина С.В., Чубарова Е.Г. Проявление активизаций вулканов Авачинской группы в изменениях уровня воды в скважине Е-1 // Вулканализм и связанные с ним процессы: материалы XXIII ежегод. науч. конф., посвящ. Дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский: Изд-во ИВиС ДВО РАН, 2020. С. 99–102.
15. Копылова Г.Н., Болдина С.В. Изменения давления подземных вод при магматической активизации: на примере скважины Е-1, полуостров Камчатка, Россия // Геотермальная вулканология, гидрогеология, геология нефти и газа (Geothermal Volcanology Workshop 2020): материалы Всерос. науч. конф. с междунар. уч. Петропавловск-Камчатский: Изд-во ИВиС ДВО РАН, 2020. С. 87–90.
16. Копылова Г.Н., Болдина С.В. О связи изменений уровня воды в скважине Е-1, Восточная Камчатка, с активизацией вулкана Корякский в 2008–2009 гг. и сильными ($M \geq 5$) землетрясениями // Вулканология и сейсмология. 2012. № 5. С. 41–54.
17. Копылова Г.Н., Болдина С.В. Эффекты сейсмических волн в изменениях уровня воды в скважине: экспериментальные данные и модели // Физика Земли. 2020. № 4. С. 102–122. <https://doi.org/10.31857/S0002333720030035>
18. Wang C.-Y. Liquefaction beyond the near field // Seismological Research Letters. 2007. Vol. 78. Iss. 5. P. 512–517. <https://doi.org/10.1785/gssrl.78.5.512>
19. Wang C.-Y., Manga M. Earthquakes and water. Berlin – Heidelberg: Springer, 2010. 228 p.
20. Ризниченко Ю.В. Размеры очага корового землетрясения и сейсмический момент // Исследования по физике землетрясений: сб. стат. / отв. ред. Ю.В. Ризниченко. М.: Наука, 1976. С. 9–27.
21. Копылова Г.Н., Юсупов Ш.С., Серафимова Ю.К., Шин Л.Ю., Болдина С.В. Гидрохимические предвестники землетрясений (на примере районов полуострова Камчатка, Россия, и Республики Узбекистан) // Вестник Камчатской региональной ассоциации «Учебно-научный центр». Науки о Земле. 2020. Вып. 48. № 4. С. 5–20. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2020-4-48-5-20>
22. Чебров В.Н., Абубакиров И.Р., Богданов В.В., Болдина С.В., Бусс Ю.Ю., Власов Ю.А. [и др.]. Сильные камчатские землетрясения 2013 года / под ред. В.Н. Чеброва. Петропавловск-Камчатский: Новая книга, 2014. 252 с.
23. Чебров В.Н., Кугаенко Ю.А., Абубакиров И.Р., Дроздина С.Я., Иванова Е.И., Матвеенко Е.А. [и др.]. Жупановское землетрясение 30.01.2016 г. с $K_s = 15,7$, $M_w = 7,2$, $I = 6$ (Камчатка) // Вестник Камчатской региональной ассоциации «Учебно-научный центр». Науки о Земле. 2016. Вып. 29. № 1. С. 5–16.
24. Kiryukhin A., Voronin P., Zhuravlev N., Kopylova G. Water-methane geothermal reservoirs in a south-west foothills of Koryaksky volcano, Kamchatka // Proceedings, 46th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University. Stanford, 2021. P. 320–325.

References

- Chebrov VN, Saltykov VA, Serafimova YuK. *Earthquake forecasting in Kamchatka. A case study of the Kamchatka branch of the Russian Expert Council for earthquake forecasting, assessment of seismic hazards and risk in 1998–2009*. Moscow: Svetoch Plyus; 2011. 304 p. (In Russ.)
- Chebrov VN, Saltykov VA, Serafimova YuK. Identifying the precursors of large ($M \geq 6.0$) earthquakes in Kamchatka based on data from the Kamchatka Branch of the Geophysical Service: 1998–2011. *Vulkanologiya i seismologiya*. 2013;1:85–95. (In Russ.) <https://doi.org/10.7868/S0203030613010033>
- Kopylova G, Boldina S. Hydrogeological earthquake precursors: a case study from the Kamchatka peninsula. *Frontiers in Earth Science*. 2020;8:576017. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.576017>
- Kopylova GN, Sugrobov VM, Khatkevich YuM. Earthquake-induced variations in the regime of springs and hydrogeological wells in the Petropavlovsk test site, Kamchatka. *Vulkanologiya i seismologiya*. 1994;2:53–70. (In Russ.)
- Kopylova GN. Variations of water level in Elizovskaya-1 well, Kamchatka due to large earthquakes: 1987–1998 observations. *Vulkanologiya i seismologiya*. 2001;2:39–52. (In Russ.)
- Kopylova GN. Earthquake-induced Water Level Changes in the YuZ-5 Well, Kamchatka. *Vulkanologiya i seismologiya*. 2006;6:52–64. (In Russ.)
- Kopylova GN, Boldina SV. On the mechanism of a hydrogeodynamic precursor of the Kronotsky earthquake, December 5, 1997, $M_w = 7.8$. *Tikhookeanskaya geologiya*. 2012. T. 31. № 5. S. 104–114. (In Russ.)
- Boldina SV, Kopylova GN. Effects of the January 30, 2016, $M_w = 7.2$ Zhupanovsky earthquake on the water level variations in wells YuZ-5 and E-1 in Kamchatka. *Geodinamika i tektonofizika = Geodynamics & Tectonophysics*. 2017;8(4):863–880. (In Russ.) <https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-4-0321>
- Biagi PF, Ermini A, Kingsley SP, Khatkevich YM, Gordeev EI. Groundwater ion content precursors of strong earthquakes in Kamchatka (Russia). *Pure and Applied Geophysics*. 2000;157:1359–1377. <https://doi.org/10.1007/PL00001123>
- Biagi PF, Ermini A, Cozzi E, Khatkevich YM, Gordeev EI. Hydrochemical precursors in Kamchatka (Russia) related to the strongest earthquakes in 1988–1997. *Natural Hazards*. 2000;21:263–276. <https://doi.org/10.1023/A:1008178104003>
- Khatkevich YuM, Ryabinin GV. Hydrogeochemical researches on Kamchatka. In: Gordeev EI, Chebrov VN (eds.). *Kompleksnye seismologicheskie i geofizicheskie issledovaniya Kamchatki. K 25-letiyu Kamchatskogo filiala GS RAN = Complex seismological and geophysical researches of Kamchatka. To 25th Anniversary of Kamchatkan Experimental & Methodical Seismological Department*.



- Petropavlovsk-Kamchatsky: Kamchatskii pechatnyi dvor; 2004. p.96–112. (In Russ.)
12. Kopylova GN, Boldina SV. Hydrogeoseismological research in Kamchatka: 1977–2017. *Vulkanologiya i seismologiya*. 2019;2:3–20. <https://doi.org/10.31857/S0205-9614201923-20>
13. Kopylova GN, Boldina SV. *Hydrogeoseismic variations of water-level in Kamchatka wells*. Petropavlovsk-Kamchatsky: Kamchatpress; 2019. 144 p. (In Russ.)
14. Kopylova GN, Boldina SV, Chubarova EG. Manifestation of the Avacha group volcanoes activation in E-1 well water-level variations. In: *Vulkanizm i svyazannye s nim protsessy: materialy XXIII ezhegodnoi nauchnoi konferentsii, posvyashchennoi Dnyu vulkanologa = Volcanism and related processes: Proceedings of the 23th annual scientific conference devoted to the Volcanologist's Day*. Petropavlovsk-Kamchatsky: Institute of Volcanology and Seismology, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences; 2020. p.99–102. (In Russ.)
15. Kopylova GN, Boldina SV. Groundwater pressure changes due to magmatic activation: case study of the E-1 well, Kamchatka peninsula, Russia. In: *Geotermal'naya vulkanologiya, gidrogeologiya, geologiya nefti i gaza (Geothermal Volcanology Workshop 2020): materialy Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem = Geothermal Volcanology, Hydrogeology, Oil and Gas Geology (Geothermal Volcanology Workshop 2020): Proceedings of All-Russian Scientific Conference with International Participation*. Petropavlovsk-Kamchatsky: Institute of Volcanology and Seismology, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences; 2020. p.87–90. (In Russ.)
16. Kopylova GN, Boldina SV. On the relationships of water-level variations in the E-1 well, Kamchatka to the 2008–2009 resumption of activity on Koryakskii volcano and to large ($M \geq 5$) earthquakes. *Vulkanologiya i seismologiya*. 2012;5:41–54. (In Russ.)
17. Kopylova GN, Boldina SV. Effects of seismic waves in water level variations in a well: empirical data and models. *Fizika Zemli*. 2020;4:102–122. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0002333720030035>
18. Wang CY. Liquefaction beyond the near field. *Seismological Research Letters*. 2007;78(5):512–517. <https://doi.org/10.1785/gssrl.78.5.512>
19. Wang CY, Manga M. *Earthquakes and water*. Berlin – Heidelberg: Springer; 2010. 228 p.
20. Riznichenko YuV. Dimensions of the source of the crustal earthquake and seismic moment. In: Riznichenko YuV (ed.). *Issledovaniya po fizike zemletryasenii = Studies on the physics of earthquakes*. Moscow: Nauka; 1976. p.9–27. (In Russ.)
21. Kopylova GN, Yusupov ShS, Serafimova YuK, Shin LYu, Boldina SV. Hydrogeochemical earthquake precursors (on the example of areas of the Kamchatka Peninsula, Russia, and the Republic of Uzbekistan). *Vestnik Kamchatskoi regional'noi assotsiatsii "Uchebno-nauchnyi tsentr". Nauki o Zemle = Bulletin of Kamchatka Regional Association "Educational-Scientific Center". Earth Sciences*. 2020;48(4):5–20. (In Russ.) <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2020-4-48-5-20>
22. Chebrov VN, Abubakirov IR, Bogdanov VV, Boldina SV, Buss YuYu, Vlasov YuA, et al. *Large Kamchatka earthquakes in 2013*. Petropavlovsk-Kamchatsky: Novaya kniga; 2014. 252 p. (In Russ.)
23. Chebrov VN, Kugayenko YuA, Abubakirov IR, Droznina SYa, Ivanova EI, Matveenko EA, et al. The January 30th, 2016 earthquake with $K_s = 15.7$, $M_w = 7.2$, $I = 6$ in the Zhupanovsky region (Kamchatka). *Vestnik Kamchatskoi regional'noi assotsiatsii "Uchebno-nauchnyi tsentr". Nauki o Zemle = Bulletin of Kamchatka Regional Association "Educational-Scientific Center". Earth Sciences*. 2016;29(1):5–16. (In Russ.)
24. Kiryukhin A, Voronin P, Zhuravlev N, Kopylova G. Water-methane geothermal reservoirs in a south-west foothills of Koryaksky volcano, Kamchatka. *Proceedings, 46th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University*. Stanford; 2021. p.320–325.

Сведения об авторах / Information about the authors



Копылова Галина Николаевна,
доктор геолого-минералогических наук, доцент,
главный научный сотрудник Лаборатории геофизических исследований,
Камчатский филиал Федерального исследовательского центра
«Единая геофизическая служба Российской Академии наук»,
683006, г. Петропавловск-Камчатский, бул. Пийпа, 9, Россия,
✉ e-mail: gala@emsd.ru

SPIN: 6586-6121,
WoS: AAO-3267-2020,
Scopus: 36084741800,
ORCID: 0000-0002-0762-2959,
Loop: 866354,
<https://www.researchgate.net/profile/G-Kopylova>

Galina N. Kopylova,
Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Associate Professor,
Chief Researcher of the Laboratory of Geophysical Research,
Kamchatka Branch of Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences,
9 Piip Boulevard, Petropavlovsk-Kamchatsky 683006, Russia,
✉ e-mail: gala@emsd.ru



SPIN: 6586-6121,
WoS: AAO-3267-2020,
Scopus: 36084741800,
ORCID: 0000-0002-0762-2959,
Loop: 866354,
<https://www.researchgate.net/profile/G-Kopylova>



Болдина Светлана Васильевна,
кандидат геолого-минералогических наук,
старший научный сотрудник Лаборатории геофизических исследований,
Камчатский филиал Федерального исследовательского центра
«Единая геофизическая служба Российской Академии наук»,
683006, г. Петропавловск-Камчатский, бул. Пийпа, 9, Россия,
e-mail: boldina@emsd.ru
SPIN: 7286-8399,
WoS: G-2558-2017,
Scopus: 22953141000,
ORCID: 0000-0001-7234-0053,
Loop: 866367,
<https://www.researchgate.net/profile/Sv-Boldina>
Svetlana V. Boldina,
Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Senior Researcher of the Laboratory of Geophysical Research,
Kamchatka Branch of Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences,
9 Piip Boulevard, Petropavlovsk-Kamchatsky 683006, Russia,
e-mail: boldina@emsd.ru
SPIN: 7286-8399,
WoS: G-2558-2017,
Scopus: 22953141000,
ORCID: 0000-0001-7234-0053,
Loop: 866367,
<https://www.researchgate.net/profile/Sv-Boldina>

Заявленный вклад авторов / Contribution of the authors

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.
The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 05.03.2021; одобрена после рецензирования 09.04.2021; принятая к публикации 13.05.2021.

The article was submitted 05.03.2021; approved after reviewing 09.04.2021; accepted for publication 13.05.2021.



Оригинальная статья / Original article

УДК 556.32(571.62)

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-2-151-158>

Взаимодействие подземных и поверхностных вод в зоне Хабаровского водного узла

© В.В. Кулаков^a, Р.С. Штенгелов^b, Д.В. Матвеенко^c^{a,c}Институт водных и экологических проблем ДВО РАН, г. Хабаровск, Россия^bМосковский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

Резюме: В приведенном исследовании представлены результаты многолетнего мониторинга уровней подземных вод в пределах Хабаровского водного узла в междуречье Амура и Тунгуски на площади Среднеамурского артезианского бассейна в водоносном горизонте плиоцен-нижнечетвертичных аллювиальных отложений. Наблюдения осуществлялись по девяти кустам скважин внешнего и пяти кустам скважин внутреннего мониторинга на площадке Тунгусского водозабора с глубиной трех наблюдательных скважин в кусте от 15 до 50 м. Были уточнены параметры взаимодействия подземных вод с Пемзенской протокой за период 2012–2020 гг. При подпоре подземных вод от протоки в период наводнения среднее значение параметра эквивалентной длины ΔL для верхнего уровня водоносного горизонта составляет 40 м, для среднего уровня – 87 м, а для нижнего уровня – 605 м. Вертикальный водообмен в продуктивной толще в прибрежной зоне протоки характеризуется значениями коэффициента перетока 0,136 сут.⁻¹ между верхним и средним уровнями наблюдений и 0,0116 сут.⁻¹ между средним и нижним уровнями.

Ключевые слова: подземные воды, уровни, Амур, Хабаровский водный узел, Тунгусский водозабор

Для цитирования: Кулаков В.В., Штенгелов Р.С., Матвеенко Д.В. Взаимодействие подземных и поверхностных вод в зоне Хабаровского водного узла. *Науки о Земле и недропользование*. 2021. Т. 44. № 2. С. 151–158. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-2-151-158>

Interaction of ground and surface water in Khabarovsk water node area

© Valeriy V. Kulakov^a, Rostislav S. Shtengelov^b, Dmitry V. Matveenko^c^{a,c}Institute of Water and Environmental Problems, Far East Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russia^bLomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Abstract: This research presents the results of long-term monitoring of groundwater levels within the Khabarovsk water node in the Amur and Tunguska interfluvia on the area of the Middle Amur artesian basin in the aquifer of Pliocene-Lower Quaternary alluvial deposits. Observations have been carried out on 9 groups of wells of external monitoring and 5 groups of wells of internal monitoring at the Tunguska reservoir, with a depth of 3 observation wells in the group from 15 to 50 m. The interaction parameters of groundwater and the Pemzenskaya channel have been specified for the period from 2012 to 2020. When the channel causes groundwater afflux during the flood, the average value of the equivalent length parameter ΔL is 40 m for the upper level of the aquifer, 87 m – for the middle level, and it is 605 m for the lower level. Vertical water exchange in the productive strata in the shore zone of the channel is characterized by the values of the overflow coefficient of 0.136 days⁻¹ between the upper and middle observation levels and 0.0116 days⁻¹ between the middle and lower levels.

Keywords: ground water, levels, Amur, Khabarovsk water node, Tunguska reservoir

For citation: Kulakov VV, Shtengelov RS, Matveenko DV. Interaction of ground and surface water in Khabarovsk water node area. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2021;44(2):151–158. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-2-151-158>

Введение

В Хабаровском водном узле на междуречье Амура и Тунгуски в районе г. Хабаровска на площади Среднеамурского артезианского бассейна [1–3] в водоносном горизонте плиоцен-нижнечетвертичных аллювиальных отложений (пески, гравий) осуществляется мони-

торинг подземных вод [4–7]. Наблюдения осуществляются по девяти кустам скважин внешнего мониторинга глубиной от 15 до 50 м, расположенных на разном удалении от Тунгусского водозабора подземных вод и русла р. Амур (рис. 1).

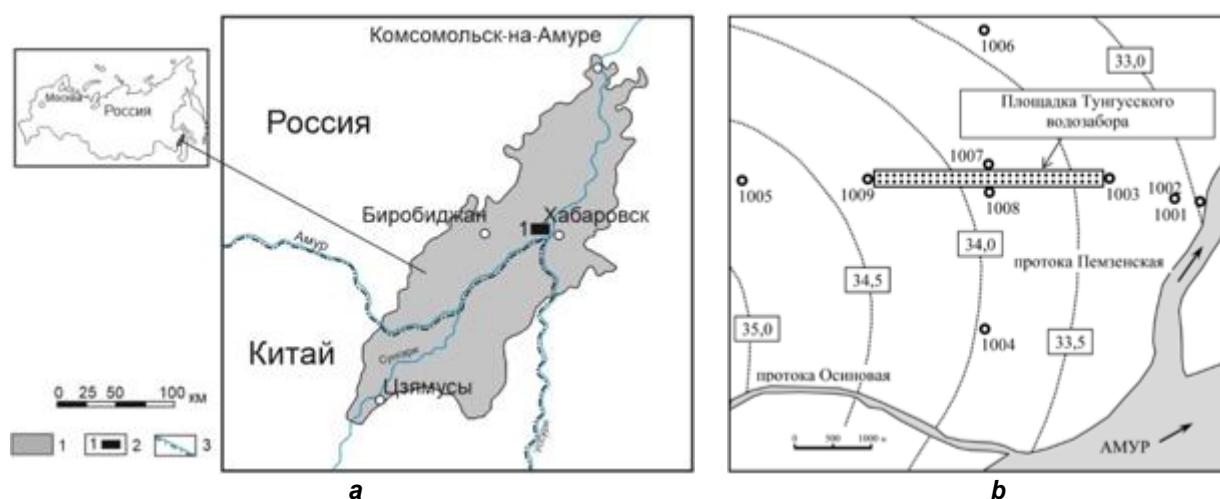


Рис. 1. Хабаровский водный узел в Среднеамурском артезианском бассейне:

a – схема расположения участка исследований [7]:

1 – Среднеамурский артезианский бассейн, 2 – Хабаровский водный узел, 3 – государственная граница;

b – схема размещения кустов наблюдательных скважин внешнего мониторинга (1001–1009) с гидроизогипсами естественного потока подземных вод, абс. отм., м [4]

Fig. 1. Khabarovsk water node in the Middle Amur artesian basin:

a – location diagram of the research site [7]:

1 – Middle Amur artesian basin, 2 – Khabarovsk water node, 3 – state border;

b – layout of groups of observation wells of external monitoring (1001–1009) with hydroisohyps of the natural groundwater flow, abs. marked, m [4]

Материалы и методы исследования

В пределах Тунгусского водозабора, состоящего из шестидесяти проектных эксплуатационных скважин, выделено пять секций, в центре которых расположено пять кустов скважин внутреннего мониторинга, оборудованных аналогично скважинам внешнего мониторинга. Расстояние от водозаборного ряда до кустов 1004 (в направлении протоки Осиновой), 1005 (вглубь аллювиальной террасы) и 1006 (в направлении р. Тунгуски) составляет около 2 км и соответствует изолиниям прогнозного понижения уровней на 4–5 м при проектном водоотборе первой очереди в объеме 106 тыс. м³/сут. Кусты 1001 и 1002 расположены по кратчайшему направлению от восточного фланга водозабора по нормали к урезу Пемзенской протоки (см. рис. 1).

Ярусные кусты состоят из трех компактно расположенных наблюдательных скважин, оборудованных на разных уровнях водоносного горизонта с интервалами фильтров длиной от 2 до 6 м (в среднем 3,1 м) на глубинах от 12,78 до 15,89 м (верхний уровень), 28,79–31,9 м (средний уровень) и 40,75–43,86 м (нижний уровень).

На всех четырнадцати кустах скважин мониторинга установлены автоматические датчики уровней и температуры подземных вод фирмы ПОЛИНОМ типа КЕДР-ДМ v2 с фиксацией параметров каждый час и ежесуточной передачей данных через Интернет на компьютер.

Режим подземных вод в районе Тунгусского водозабора в предэксплуатационный и начальный периоды эксплуатации (с июля 2012 г.) свидетельствует о незначительном влиянии достигнутого водоотбора на гидро-геодинамическую обстановку [8–10].

На междуречье Амура и Тунгуски выделяется две зоны: 1 – активного влияния гидрологического режима в протоках Амура – приречный тип режима подземных вод (кусты 1001–1004); 2 – междуречного режима за счет инфильтрационного питания атмосферными осадками (кусты 1005–1009).

Результаты исследования и их обсуждение

В связи с катастрофическим наводнением на Амуре [11–15] определяющее влияние на режим уровней подземных вод в 2013 г. наряду с водоотбором из скважин Тунгусского



водозабора оказал подпертый режим фильтрации. Амплитуда колебания уровней в скважинах куста 1005 достигла 2,97 м (при 0,52 м в 2012 г.), куста 1006 – 2,1 м (при 0,56 м в 2012 г.), кустов 1007 и 1008 – 2,52 м (при 0,46 м в 2012 г.).

В приречной зоне максимальные уровни подземных вод зафиксированы на отметках 36,74–37,73 м при отметке уровня Амура 38,77 м (3–4 сентября 2013 г.). В зоне междуречного режима максимальный уровень зафиксирован на отметке 32 м. На пике паводка столб поверхностных вод Амура над устьем скважин куста 1001 составлял около 3 м.

Уровни подземных вод в скважинах располагались ниже поверхности земли и уровня поверхностных вод, затопивших территорию. Разница в отметках уровней поверхностных и подземных вод изменилась от 1,5 до 6,5 м. Наличие покровных суглинков в кровле водоносного горизонта на территории [16] обусловило затрудненный водообмен между поверхностными и подземными водами, в связи с чем активное влияние паводковых поверхностных вод Амура на подземную гидросферу в пределах Тунгусского водозабора и на прилегающей территории не было отмечено (таблица).

В связи с многолетней изменчивостью гидрометеорологической обстановки, существенно проявляющейся в районе Хабаровского водного узла, выявление развивающейся депрессии напоров подземных вод произведено путем сопоставления годовых синхронов среднемесячного положения уровней [17, 18].

Анализ данных по скважине 1003-3, наиболее близко расположенной к действующему водозабору, не показывает прогрессирующего развития понижения уровня. Уровни подземных вод устойчиво находились на отметках 31–32 м с закономерной реакцией до 33–34 м в осенние периоды паводков на Амуре 2019–2020 гг. По состоянию на конец 2020 г. можно сделать вывод об отсутствии на площади внешнего мониторинга значимого проявления депрессии напоров в зоне Тунгусского месторождения подземных вод.

По синхронным данным наблюдений на трех уровнях в скважинах 1001-1,2,3 и 1002-1,2,3 с учетом реальной пространственной структуры потока подземных вод выполнен детальный анализ вертикальных перетоков в разрезе продуктивной толщи и направленности взаимодействия с протокой Пемзенской (рис. 2). При разгрузке подземных вод в протоку вертикальные перетоки восходящие, а при подпоре от протоки – нисходящие.

Влияние катастрофического наводнения на р. Амур в 2013 г. на подземные воды

Хабаровского водного узла [5, 7]

Impact of the catastrophic flood on the Amur river in 2013 on the ground water of the Khabarovsk water node [5, 7]

Пункт наблюдения	Дата максимального уровня	Время от пика наводнения до установления максимального уровня подземных вод, дни	Абсолютная отметка, м		Разность отметок уровней поверхностных и подземных вод
			Точки наблюдения	Уровня природных вод	
Река Амур (г. Хабаровск)	03–04.09.2013		30,67	38,77	
Куст 1001	04.09.2013	Ориентировочно 1	35,76	Не установлена	Не установлена
Куст 1002	06.09.2013	2	38,81	36,74	2,03
Куст 1004	03.09.2013	1–5	38,42	37,73	1,04
Куст 1005	26.11.2013	82	40,25	35,42	3,35
Куст 1006	06.11.2013	63	38,7	32	6,77
Куст 1007	13–15.09.2013	10–12	39,28	32,74	6,03
Куст 1008	13–15.09.2013	10–12	39,01	33,04	5,73
Куст 1009	13–15.09.2013	10–12	39,07	32,72	6,05

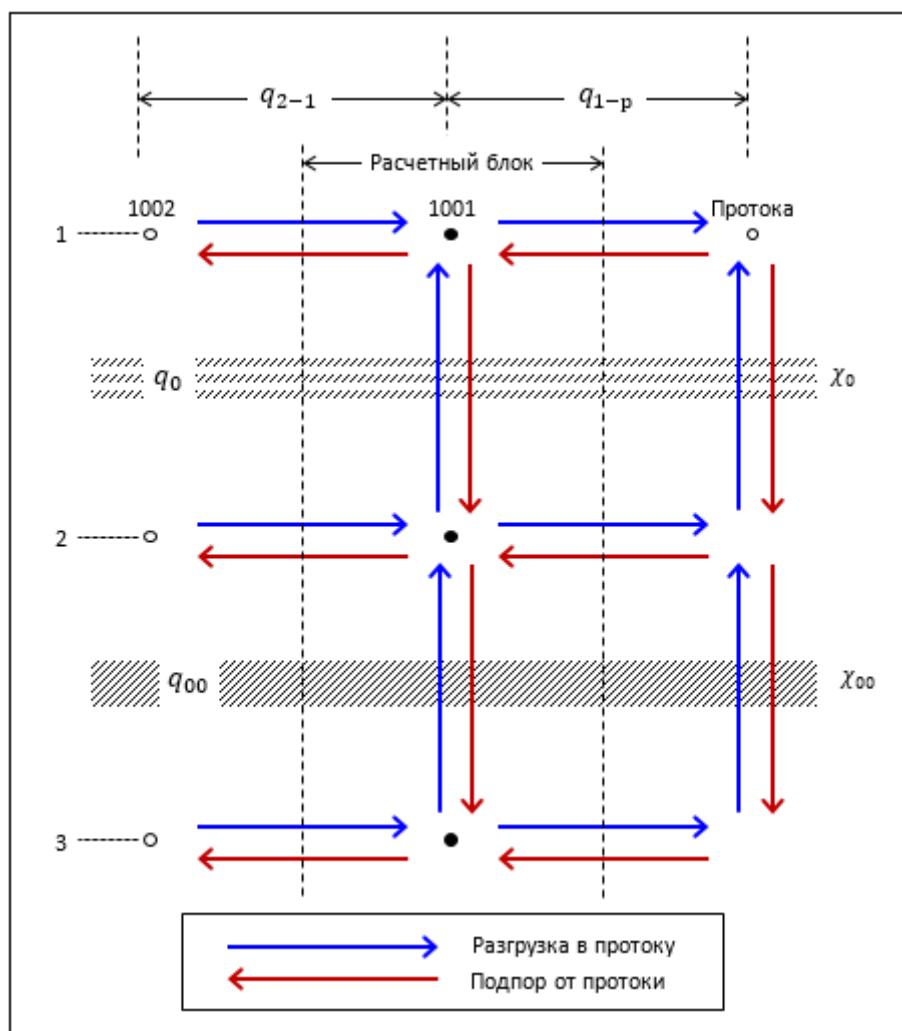


Рис. 2. Конечно-разностная схема взаимодействия подземных вод с протокой
Fig. 2. Finite-difference scheme of groundwater and channel interaction

Выполнена оценка параметра эквивалентной длины ΔL [19, 20] по каждому уровню наблюдений в скважинах 1001 и 1002 за период 2012–2020 г. Количество доступных оценок по состоянию подпора от протоки (1359) более чем в пять раз превышает количество оценок по состоянию разгрузки подземных вод в протоку (251), что позволяет считать эти оценки более достоверными.

Причина явного преобладания «подпорных» состояний состоит в высокой внутригидродинамической динамичности водного режима гидросети и в незначительных величинах инфильтрационного питания подземных вод [21, 22]. При градиенте $5 \cdot 10^{-4}$ и суммарной проводимости 3000–4000 м²/сут. единичный расход латерального потока составляет 1,5–2 м²/сут. В связи с повсеместным распространением покровных глинистых образований поверхность левобережной террасы Амура заболочена.

Инфильтрационное питание водоносного горизонта происходит в затрудненном режиме «дождевания» с вертикальным градиентом порядка единицы и не превышает 10^{-4} м/сут. (30–40 мм/год) [19]. В связи с малыми расходами потока уровни подземных вод в приречной зоне не успевают восстанавливаться при снижении уровня протоки и, напротив, быстро воспринимают подпор при повышении ее уровня.

Заключение

Таким образом, в ходе исследования установлено, что при подпоре подземных вод в период наводнения среднее значение параметра эквивалентной длины ΔL для верхнего уровня водоносного горизонта составляет 40 м, для среднего уровня – 87 м, а для нижнего уровня – 605 м.



Эти оценки дают возможность проверки параметров вертикального строения продуктивной толщи χ_0 , χ_{00} , принятых при подсчете запасов подземных вод месторождения [23]. Значение коэффициента перетока χ_0 [24, 25] между верхним и средним уровнями наблюдений равно $0,136 \text{ сут.}^{-1}$, что удовлетворительно совпадает с принятым по результатам разведки

месторождения ($0,15 \text{ сут.}^{-1}$). Расчет для интервала между средним и нижним уровнями дает коэффициент перетока $\chi_{00} = 0,0116 \text{ сут.}^{-1}$, что примерно вдвое меньше полученного при разведке ($0,025 \text{ сут.}^{-1}$) и свидетельствует либо о пропорциональном уменьшении коэффициента фильтрации, либо о возрастании мощности разделяющего слоя.

Список литературы

- Гидрогеология СССР. Т. 23. Хабаровский край и Амурская область / ред. Н.А. Маринов. М.: Недра, 1971. 514 с.
- Караванов К.П. Подземные воды как природный ресурс при решении проблемы устойчивого развития Приамурья. Хабаровск: Изд-во ИВЭП ДВО РАН, 1996. 40 с.
- Zaisheng H., Jayakumar R., Ke L., Hao W., Rui C. Review on transboundary aquifers in People's Republic of China with case study of Heilongjiang-Amur River Basin // Environmental Geology. 2008. Vol. 54. P. 1411–1422. <https://doi.org/10.1007/s00254-007-0922-4>
- Кулаков В.В., Андреева Д.В., Козырев Р.С., Матвеенко Д.В., Штенгелов Р.С. Мониторинг естественного и нарушенного режима подземных вод в Амуро-Тунгусском междуречье // Регионы нового освоения: естественные сукцессии и антропогенная трансформация природных комплексов: материалы конф. с междунар. уч. Хабаровск: Изд-во ИВЭП ДВО РАН, 2017. С. 165–168.
- Кулаков В.В., Медведева Н.И. Влияние катастрофического наводнения на уровень подземных вод Амуро-Тунгусского междуречья // Водные и экологические проблемы, преобразование экосистем в условиях глобального изменения климата: материалы Всерос. конф. Хабаровск: Изд-во ИВЭП ДВО РАН, 2014. С. 101–103.
- Кулаков В.В., Тесля В.Г., Штенгелов Р.С. Тунгусское месторождение подземных вод Хабаровского водного узла // Вода: экология и технология: сб. докл. 7-го Междунар. конгресса ЭКВАТЭК-2006. Ч. 1. М., 2006. С. 255–256.
- Кулаков В.В., Штенгелов Р.С. Мониторинг уровней подземных вод междуречья Амура и Тунгуски // Вестник Северо-Восточного научного центра Дальневосточного отделения Российской академии наук. 2019. № 3. С. 63–70. <https://doi.org/10.34078/1814-0998-2019-3-63-70>
- Ковалевский В.С. Влияние изменений гидрогеологических условий на окружающую среду. М.: Наука, 1994. 138 с.
- Коноплянцев А.А. Изучение, прогноз и картирование режима подземных вод. М.: Недра, 1979. 193 с.
- Боревский Б.В., Руденко Ю.Ф., Шестопалов В.М. Типизация и принципы изучения месторождений пресных вод с учетом влияния их эксплуатации на окружающую среду. Киев: Изд-во ИГН, 1986. 49 с.
- Ким В.И., Махинов А.Н. Гидрологический режим р. Амур в пределах Хабаровского водного узла //
- Фундаментальные проблемы изучения и использования воды и водных ресурсов: материалы науч. конф. Иркутск, 2005. С. 92–94.
- Махинов А.Н., Ким В.И., Воронов Б.А. Наводнение в бассейне Амура 2013 года: причины и последствия // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. 2014. № 2. С. 5–14.
- Бойкова К.Г. Наводнения на реках Амурского бассейна // Вопросы географии Дальнего Востока: сб. стат. / науч. ред. и сост. А.В. Иванов. Вып. 20. Хабаровск: Изд-во Приамурского географического общества, 1963. С. 192–259.
- Водные ресурсы Хабаровского края: монография / ред. К.П. Караванов, А.М. Мордовин, Н.А. Нарбут. Хабаровск: Изд-во ДВО АН СССР, 1990. 173 с.
- Мордовин А.М. Водные ресурсы и водообеспеченность населения // Водные ресурсы Хабаровского края: монография / ред. К.П. Караванов, А.М. Мордовин, Н.А. Нарбут. Хабаровск: Изд-во ДВО АН СССР, 1990. С. 39–59.
- Kulakov V.V., Fisher N.K., Kondratieva L.M., Grischek T. Riverbank filtration as an alternative to surface water abstraction for safe drinking water supply to the city of Khabarovsk, Russia // Riverbank filtration for water security in desert countries. NATO science for peace and security. Series C: Environmental security / ed. M. Shamrukh. Dordrecht: Springer, 2011. P. 281–298.
- Ковалевский В.С. Исследования режима подземных вод в связи с их эксплуатацией. М.: Недра, 1986. 198 с.
- De Wiest R. Replenishment of aquifers intersected by streams // Journal of the Hydraulics Division. 1963. Vol. 89. Iss. 6. P. 165–191. <https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0000953>
- Шестаков В.М., Поздняков С.П. Геогидрология. М.: Академкнига, 2003. 176 с.
- Бочевер Ф.М., Гармонов И.В., Лебедев А.В., Шестаков В.М. Основы гидрогеологических расчетов. М.: Недра, 1969. 368 с.
- Гриневский С.О. Гидрогеодинамическое моделирование взаимодействия подземных и поверхностных вод: монография. М.: ИНФРА-М, 2012. 152 с.
- Шестаков В.М., Невечеря И.К., Авилина И.В. Методика оценки ресурсов подземных вод на участках береговых водозаборов: монография. М.: КДУ, 2009. 192 с.
- Кулаков В.В., Штенгелов Р.С. Оценка запасов пресных подземных вод в речных долинах Приамурья // Подземные воды востока России: материалы



Всерос. совещ. по подземным водам Востока России с междунар. уч. Тюмень, 2009. С. 254–257.

24. Pickens J.F., Grisak G.E. Scale-dependent dispersion in a stratified granular aquifer // Water Resources Research. 1981. Vol. 17. Iss. 4. P. 1191–1211. <https://doi.org/10.1029/WR017i004p01191>

25. Goode D.J. Particle velocity interpolation in block-centered finite difference groundwater flow models // Water Resources Research. 1990. Vol. 26. Iss. 5. P. 925–940. <https://doi.org/10.1029/WR026i005p00925>

References

1. Marinov NA. *Hydrogeology of the USSR*. Vol. 23. *Khabarovsk Territory and Amur Region*. Moscow: Nedra; 1971. 514 p. (In Russ.)
2. Karavanov KP. *Groundwater as a natural resource when solving the problem of Amur region sustainable development*. Khabarovsk: Institute of Water and Environmental Problems of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences; 1996. 40 p. (In Russ.)
3. Zaisheng H, Jayakumar R, Ke L, Hao W, Rui C. Review on transboundary aquifers in People's Republic of China with case study of Heilongjiang-Amur River Basin. *Environmental Geology*. 2008;54:1411–1422. <https://doi.org/10.1007/s00254-007-0922-4>
4. Kulakov VV, Andreeva DV, Kozyrev RS, Matveenko DV, Shtengelov RS. Monitoring of the natural and disturbed regime of groundwater in the Amur-Tungus interfluvium. In: *Regiony novogo osvoeniya: estestvennye suktsessii i antropogennaya transformatsiya prirodnnykh kompleksov: materialy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem = Regions of new development: natural successions and anthropogenic transformation of natural complexes: materials of the conference with international participation*. Khabarovsk: Institute of Water and Environmental Problems of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences; 2017. p.165–168. (In Russ.)
5. Kulakov VV, Medvedeva NI. Influence of catastrophic flooding on the level of underground water of the Amur-Tunguska interfluvium. In: *Vodnye i ekologicheskie problemy, preobrazovanie ekosistem v usloviyakh global'nogo izmeneniya klimata: materialy Vserossiiskoi konferentsii = Water and ecological problems, ecosystem transformation in the context of global climate change: Proceedings of the All-Russian conference*. Khabarovsk: Institute of Water and Environmental Problems of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences; 2014. p.101–103. (In Russ.)
6. Kulakov VV, Teslya VG, Shtengelov RS. Tunguska underground water deposit of the Khabarovsk water node. In: *Voda: ekologiya i tekhnologiya: sbornik dokladov 7-go Mezhdunarodnogo kongressa EKVATEK -2006 = Water: ecology and technology: collected reports of the 7th International Congress EKVATEK-2006*. Part 1. Moscow; 2006. p.255–256. (In Russ.)
7. Kulakov VV, Shtengelov RS. Monitoring of groundwater levels in the Amur-Tunguska interfluvium. *Vestnik Severo-Vostochnogo nauchnogo tsentra Dal'nevostochnogo otdeleniya Rossiiskoi akademii nauk = Bulletin of the North-East Scientific Center, Russia Academy of Sciences Far East Branch*. 2019;3:63–70. (In Russ.) <https://doi.org/10.34078/1814-0998-2019-3-63-70>
8. Kovalevskii VS. *The effect of changes in hydrogeological conditions on environment*. Moscow: Nauka; 1994. 138 p. (In Russ.)
9. Konoplyantsev AA. *Study, forecast and mapping of groundwater regime*. Moscow: Nedra; 1979. 193 p. (In Russ.)
10. Borevskii BV, Rudenko YuF, Shestopalov VM. *Typification and principles of studying fresh water deposits considering the environmental impact of their operation*. Kiev: Institute of Geological Sciences; 1986. 49 p. (In Russ.)
11. Kim VI, Makhinov AN. Hydrological regime of the river Amur within the Khabarovsk water node. In: *Fundamental'nye problemy izucheniya i ispol'zovaniya vody i vodnykh resursov: materialy nauchnoi konferentsii = Fundamental problems of water and water resources study and use: materials of the scientific conference*. Irkutsk; 2005. p.92–94. (In Russ.)
12. Makhinov AN, Kim VI, Voronov BA. Floods in the Amur Basin in 2013: causes and consequences. *Vestnik Dal'nevostochnogo otdeleniya Rossiiskoi akademii nauk = Vestnik of Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences*. 2014;2:5–14. (In Russ.)
13. Boikova KG. Floods on the Amur basin rivers. In: Ivanov AV (ed.). *Voprosy geografii Dal'nego Vostoka = Issues of Far East Geography*. Iss. 20. Khabarovsk: Amur Geographical Society; 1963. p.192–259. (In Russ.)
14. Karavanov KP, Mordovin AM, Narbut NA. *Water resources of the Khabarovsk Territory*. Khabarovsk: Far East Branch of the USSR Academy of Sciences; 1990. 173 p. (In Russ.)
15. Mordovin AM. Water resources and population water supply. In: Karavanov KP, Mordovin AM, Narbut NA. (eds.). *Vodnye resursy Khabarovskogo kraia = Water resources of the Khabarovsk Territory*. Khabarovsk: Far East Branch of the USSR Academy of Sciences; 1990. p.39–59. (In Russ.)
16. Kulakov VV, Fisher NK, Kondratieva LM, Grischek T. Riverbank filtration as an alternative to surface water abstraction for safe drinking water supply to the city of Khabarovsk, Russia. In: Shamrukh M (ed.). *Riverbank filtration for water security in desert countries. NATO science for peace and security. Series C: environmental security*. Dordrecht: Springer; 2011. p.281–298.
17. Kovalevskii VS. *Studying groundwaters regime due to their exploitation*. Moscow: Nedra; 1986. 198 p. (In Russ.)
18. De Wiest R. Replenishment of aquifers intersected by streams. *Journal of the Hydraulics Division*. 1963; 89(6):165–191. <https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0000953>
19. Shestakov VM, Pozdnyakov SP. *Geohydrology*. Moscow: Akademkniga; 2003. 176 p. (In Russ.)
20. Bochever FM, Garmonov IV, Lebedev AV, Shestakov VM. *Basics of hydrogeological calculations*. Moscow: Nedra; 1969. 368 p. (In Russ.)



21. Grinevskii SO. *Hydrogeodynamic modeling of ground and surface waters interaction*. Moscow: INFRA-M; 2012. 152 p. (In Russ.)
22. Shestakov VM, Nevecherya IK, Avilina IV. *Assessment methodology of groundwater resources at shore water intakes*. Moscow: KDU; 2009. 192 p. (In Russ.)
23. Kulakov VV, Shtengelov RS. Assessment of fresh groundwater reserves in the river valleys of the Amur region river valleys. In: *Podzemnye vody vostoka Rossii: materialy Vserossiiskogo soveshchaniya po podzemnym vodam Vostoka Rossii s mezhdunarodnym uchastiem = Underground waters of the East of Russia: Proceedings of All-* Russian meeting on groundwater of the East of Russia with international participation. Tyumen; 2009. p.254–257. (In Russ.)
24. Pickens JF, Grisak GE. Scale-dependent dispersion in a stratified granular aquifer. *Water Resources Research*. 1981;17(4):1191–1211. <https://doi.org/10.1029/WR017i004p01191>
25. Goode DJ. Particle velocity interpolation in block-centered finite difference groundwater flow models. *Water Resources Research*. 1990;26(5):925–940. <https://doi.org/10.1029/WR026i005p00925>

Сведения об авторах / Information about the authors



Кулаков Валерий Викторович,
доктор геолого-минералогических наук,
главный научный сотрудник Лаборатории гидрологии и гидрогеологии,
Институт водных и экологических проблем ДВО РАН,
680000, г. Хабаровск, ул. Дикопольцева, 56, Россия,
✉ e-mail: vvkulakov@mail.ru
Valeriy V. Kulakov,
Dr. Sci. (Geol. & Mineral.),
Chief Researcher of the Laboratory of Hydrology and Hydrogeology,
Institute of Water and Environmental Problems,
Far East Branch of the Russian Academy of Sciences,
56 Dikopoltsev St., Khabarovsk 680000, Russia,
✉ e-mail: vvkulakov@mail.ru



Штенгелов Ростислав Степанович,
доктор геолого-минералогических наук,
профессор кафедры гидрогеологии,
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
119991, г. Москва, Ленинские горы, 1, Россия,
e-mail: rssteng@mail.ru
Rostislav S. Shtengelov,
Dr. Sci. (Geol. & Mineral.),
Professor of the Department of Hydrogeology,
Lomonosov Moscow State University,
1 Leninskie Gory, Moscow 119991, Russia,
e-mail: rssteng@mail.ru



Матвеенко Дмитрий Владимирович,
младший научный сотрудник Лаборатории гидрологии и гидрогеологии,
Институт водных и экологических проблем ДВО РАН,
680000, г. Хабаровск, ул. Дикопольцева, 56, Россия,
e-mail: matveenkodv@yandex.ru
Dmitry V. Matveenko,
Junior Researcher of the Laboratory of Hydrology and Hydrogeology,
Institute of Water and Environmental Problems,
Far East Branch of the Russian Academy of Sciences,
56 Dikopoltsev St., Khabarovsk 680000, Russia,
e-mail: matveenkodv@yandex.ru

Заявленный вклад авторов / Contribution of the authors

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
The authors contributed equally to this article.

**Конфликт интересов / Conflict of interests**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.
The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 05.03.2021; одобрена после рецензирования 12.04.2021; принята к публикации 14.05.2021.

The article was submitted 05.03.2021; approved after reviewing 12.04.2021; accepted for publication 14.05.2021.



Оригинальная статья / Original article

УДК 550.461

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-2-159-166>



Особенности строения и процессы формирования сложнопостроенного гидрогохимического разреза в Байкальской рифтовой зоне

© С.Х. Павлов^a

^aИнститут земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия

Резюме: Целью данной работы являлось исследование влияния органического вещества на формирование ионно-солевого и газового состава азотно-метановых и метановых термальных вод, распространенных в осадочных породах глубоких горизонтов артезианских бассейнов. Объектом исследования стали Тункинский межгорный артезианский бассейн Байкальской рифтовой зоны и Тунгурское газонефтяное месторождение Охотско-Сахалинского бассейна, где в глубоких горизонтах распространены содовые (инверсионные) низко- и высокоминерализованные подземные воды. Работа основана на синтезе результатов традиционного изучения состава природных растворов и количественного исследования физико-химических взаимодействий в системе «вода – порода», проведенного с помощью программного комплекса «Селектор» по степени протекания гидрогохимического процесса, которая задавалась величиной отношения порода / вода. При взаимодействии использовались химически чистая вода и порода среднего химического состава. Применение физико-химического моделирования позволило проследить процессы формирования состава термальных вод в осадочных породах в зависимости от степени взаимодействия воды с породой и количества органического вещества. В результате установлено определяющее влияние содержащегося в породе органического вещества на интенсивность протекания гидрогохимического процесса: величину минерализации, соотношение компонентов и количество образующихся метана, азота и углекислоты. Соответствие состава модельных и природных растворов показало возможность формирования различной степени газонасыщенности как низко-, так и высокоминерализованных гидрокарбонатных натриевых подземных вод в пластовых условиях глубоких горизонтов осадочных бассейнов за счет внутренних резервов системы «вода – порода» без привлечения каких-либо компонентов из внешних источников.

Ключевые слова: метановые термы, термодинамическое моделирование, физико-химическое взаимодействие, состав модельных и природных растворов

Для цитирования: Павлов С.Х. Особенности строения и процессы формирования сложнопостроенного гидрогохимического разреза в Байкальской рифтовой зоне. *Науки о Земле и недропользование*. 2021. Т. 44. № 2. С. 159–166. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-2-159-166>

Structural features and formation processes of a complex hydrogeochemical section in the Baikal rift zone

© Sergey Kh. Pavlov^a

^aInstitute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

Abstract: The purpose of the work is to study the effect of organic matter on the formation of ion-salt and gas composition of nitrogen-methane and methane thermal water occurring in the sedimentary rocks of deep horizons of artesian basins. The object of research is the Tunka intermountain artesian basin of the Baikal rift zone and the Tungor gas and oil field of the Okhotsk-Sakhalin basin, in the deep horizons of which soda (inversion) low- and high-mineralized groundwater is common. The study combines the results of the traditional study of the composition of natural solutions and the quantitative research of physical and chemical interactions in the “water – rock” system conducted using the Selector software package according to the degree of the hydrogeochemical process, which was set by the value of the rock/water ratio. Chemically pure water and rocks of medium chemical composition were used in interaction. With the use of physicochemical modeling the formation of thermal water composition in sedimentary rocks depending on the interaction degree between water and rock and the amount of organic matter was unravelled. As a result, it was determined that the organic matter present in the rock has the dominant influence on the intensity of the hydrogeochemical process determining the amount of mineralization, the ratio of components, and the amount of methane, nitrogen, and carbon dioxide produced. The correspondent compositions of the model and natural solutions showed the possibility to form low- and high-mineralized sodium bicarbonate groundwater of different gas-saturation degree in the conditions of deep horizons of sedimentary basins due to the internal reserves of the “water – rock” system not involving any components from external sources.

Keywords: methane hot springs; thermodynamic modeling; physicochemical interaction; composition of model and natural solutions



For citation: Pavlov SKh. Structural features and formation processes of a complex hydrogeochemical section in the Baikal rift zone. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use.* 2021;44(2):159–166. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-2-159-166>

Введение

Весьма сложные гидрогеологические условия существуют даже в верхних горизонтах платформенных структур [1], что же касается рифтовых и рифтоподобных зон, то здесь они отличаются особой сложностью [2], однако по-прежнему продолжают рассматриваться по весьма упрощенным схемам [3, 4 и др.]. В Байкальской рифтовой зоне выявлены весьма сложные гидрогеологические, гидрогеодинамические, гидрохимические и гидрогеотермические условия [5]. Здесь, подобно Кавказским минеральным водам, на разных гипсометрических уровнях одного и того же разреза распространены различные химические типы минеральных вод, движущиеся в противоположных направлениях [6], происхождение которых активно обсуждается [7, 8 и др.].

В Тункинской впадине установлено существование двух водонапорных систем, в которых формирование ресурсов и состава подземных вод происходит принципиально различными путями [5]. В кристаллических породах фундамента впадины широко распространены азотные и углекислые термы, имеющие инфильтрационное происхождение и вместе с пресными водами представляющие единую водонапорную систему, развитие которой определяется динамикой инфильтрационных вод в области питания в Тункинских гольцах. В глубоких же горизонтах осадочной толщи распространены метановые термы седиментационного генезиса. В этой работе были исследованы физико-химические взаимодействия воды с различными породами, слагающими разрез, и прослежены процессы формирования азотных, углекислых и метановых терм.

Процессы формирования азотных и углекислых терм исследовались с реальными породами, в которых наряду с петрогенными были определены содержания летучих элементов, химический же состав осадочных пород реконструировался. Неполный силикатный анализ этих пород, заимствованный из работы [9], последовательно дополнялся

средними величинами летучих элементов из работ [10, 11] с последующей их корректировкой, благодаря чему состав модельных растворов приближался к составу реальных терм. Средние содержания органического углерода (C_{org}) в осадочных породах, которые принимались в расчет, колеблются около 1 % [10, 11], тогда как его концентрации в осадочной толще Тункинской впадины достигают 5–8 % [12].

Материалы и методы исследования

Целью данного исследования являлось выяснение влияния органического вещества на формирование состава подземных вод глубоких горизонтов. Поэтому исследование проведено уже не на примере ограниченных анализов химического состава пород Тункинской впадины, а на основе масштабных обобщений полноценных данных по обширным площадям регионального уровня, для которых рассчитаны средние значения химического состава осадочных пород. С этой целью, как и в работе [5] с помощью программного комплекса «Селектор» [13, 14], были исследованы процессы физико-химических взаимодействий воды с глинистым спанцем [11] по степени протекания гидрохимического процесса, когда масса воды, равная 1 кг, остается постоянной на всех этапах взаимодействия, а количество породы увеличивается от 10^{-6} до 10^0 кг с шагом 0,1. В системе, закрытой к атмосфере, температура и давление были постоянными и составляли 50 °C и 70 бар. В модель дополнительно были введены гомологи углеводородов и органические кислоты. Было проведены три серии расчетов для содержаний C_{org} в породе 1, 2 и 3 % [12].

Результаты исследования

Результаты расчетов для величин отношения порода / вода 0,1 и 1 для содержаний углерода 1 и 2 % и 0,04, 0,1, 0,4 и 1 для содержаний углерода 3 % представлены в таблице. Для сравнения в таблицу включены



результаты анализа метановых вод Тункинской впадины [5] и высококарбонатных подземных вод Тунгorskого газонефтяного месторождения Охотско-Сахалинского бассейна [15].

Результаты расчетов показывают, что в этих условиях формируются высокощелочные с высокими восстановительными свойствами растворы, минерализация которых увеличивается по мере не только увеличения степени взаимодействия воды с породой, но и повышения содержания органического вещества в породе, причем в последнем случае интенсивнее, и при максимальной степени взаи-

модействия минерализация растворов изменяется от 2,5 до 8,7 и 17,8 г/кг H₂O. Во всех случаях формируются метановые воды содового состава, в которых содержание щелочноzemельных металлов остается на очень низком уровне. Концентрация калия хоть и незначительно, но повышается – как с увеличением степени взаимодействия, так и с увеличением органического вещества в породе. Концентрация аммония многократно превышает содержание этих катионов.

В анионной части растворов кроме главных гидрокарбонатных и карбонатных ионов

Величины Eh, pH, минерализации и компонентов модельных растворов, мг/кг H₂O, в системе «вода – глинистый сланец» при температуре 50 °C и давлении 70 бар с различным содержанием органического углерода и величиной отношения порода / вода в сравнении с природными термами Eh, pH values of salinity and components of model solutions, mg/kg H₂O, in the “water – clay shale” system at the temperature of 50 °C and pressure of 70 bar with the different content of organic carbon and rock/water ratio as compared to natural hot springs

C _{орг} , %	Порода / вода	Eh, В	pH	Минерализация	NH ₄ ⁺	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	HS ⁻
1	0,1	-0,470	9,41	1345	11	0,5	415	0,5	0	537	154	0,67
	1	-0,459	9,21	2494	103	0,8	677	0,9	0	450	90	0,59
2	0,1	-0,461	9,27	1877	14	0,7	569	0,7	0	887	193	0,81
	1	-0,411	8,66	8702	83	3,2	2598	0,7	0	4738	328	0,64
3	0,04	-0,365	7,95	1322	25	1,4	330	3,5	0,2	876	8	0,12
	0,1	-0,388	8,30	3116	48	6,6	830	1,3	0,1	2033	50	0,28
	0,4	-0,407	8,62	9967	60	3,6	2895	0,5	0	6123	388	0,55
	1	-0,387	8,38	17828	80	6,5	5268	0,2	0,2	10918	428	0,27
P-1* (728–766)		-0,2	8,4	1291	3	2,6	327	25	7,3	840	25	0
(2016–2048)**		–	–	9600	–	2781	20	10	6464	–	–	–
(2080–2110)***		–	–	10100	–	3434	14	10	4764	–	–	–
C _{орг} , %	Порода / вода	Cl ⁻	F ⁻	HSiO ₃ ⁻	SiO ₂ ⁰	CO ₂ ⁰	CH ₄ ⁰	N ₂ ⁰	NH ₃ ⁰	Газ, мл/кг H ₂ O		
										N ₂	CO ₂	CH ₄
1	0,1	63	42	30	15	0,2	555	0,7	62	0	0	0
	1	634	121	19	15	0,3	1085	19	366	161	0,04	6364
2	0,1	62	42	22	15	0,5	910	0,8	58	0,5	0	374
	1	634	208	5	15	10	882	14	73	365	4	15488
3	0,04	25	16	1	15	11	725	0,8	5	0	0	0
	0,1	62	41	2	15	10	908	1	21	2	0,3	1276
	0,4	249	166	5	15	15	890	8	47	113	3	8966
	1	636	425	3	14	45	877	10	33	393	30	24492
P-1* (728–766)		75	1	0	33	0"	82"	17"	0"	8"	0,5"	91"
(2016–2048)**		336	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
(2080–2110)***		1830	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

Примечание. * – химический состав метановых термальных вод из скважины Р-1 в интервале 728–766 м в Тункинской впадине; “ – содержание растворенных и свободных газов в скважине Р-1 в Тункинской впадине выражено в %. **, *** – химический состав подземных вод Тунгorskого газонефтяного месторождения Охотско-Сахалинского бассейна в интервале опробования, м: ** – 2016–2048; *** – 2080–2110.

Note. * – chemical composition of methane thermal water from the well R-1 in the range of 728–766 m in the Tunka depression; “ – the content of dissolved and free gases in the well R-1 in the Tunka depression is expressed in %. **, *** – chemical composition of groundwater in the Tungor oil and gas field of the Okhotsk-Sakhalin basin in the sampling interval, m: ** – 2016–2048; *** – 2080–2110.

** – chemical composition of groundwater in the Tungor oil and gas field of the Okhotsk-Sakhalin basin in the sampling interval, m: ** – 2016–2048; *** – 2080–2110.



повышенные и даже высокие концентрации имеют ионы хлора и фтора. Весьма примечательной особенностью данной системы является то, что при значительном содержании серы в породе она практически полностью концентрируется в твердой фазе в форме пирита и в микроколичествах присутствует в растворе в форме гидросульфида. Характерной особенностью системы является незначительное присутствие в растворе кремния в форме гидросиликатного иона и кремниевой кислоты.

Благодаря способности углерода к диспропорционированию, интенсивное развитие в системе получили как окисленные, так и восстановленные формы углерода, которые не только присутствуют в растворенной форме, но и формируют газовую fazу. Наряду с гидрокарбонатными и карбонатными ионами в растворе присутствует углекислота. Ее содержание как в растворенной форме, так и в газовой fazе низкое, но имеет устойчивую тенденцию к повышению с увеличением содержания C_{org} в породе.

С такой же закономерностью в системе происходит увеличение метана, содержание которого в отличии от углекислоты высокое и очень высокое. Содержание растворенного метана в разных растворах C_{org} из-за низкой его растворимости при одинаковой степени взаимодействия колеблется около средней величины, тогда как в газовой fazе его содержание многократно увеличивается и достигает 6,4; 15,5 и 24,5 л/кг H_2O . В газовой fazе в незначительном количестве появляется также этан, содержание которого увеличивается от сотых до первых единиц десятых долей мг/кг H_2O . Азот присутствует в форме аммония, амиака и азота в растворенной и газовой fazах. С появлением газовой fazы начинается перераспределение азота между раствором и газовой fazой в пользу последней.

В растворах породы, содержащей 1 и 2 % C_{org} , появляются карбоксильная группа и ион уксусной кислоты, а в растворах породы с 3 % C_{org} добавляется еще и ацетат натрия. Содержания их невелики, максимальные значения достигают десятых долей и первых мг/кг H_2O . Однако здесь нужно учитывать, что это соответствует условиям полного равновесия,

тогда как при более высоком уровне метастабильности количество их было явно выше [16]. Тем не менее важно то, что они образуются и что при увеличении концентрации органического вещества отмечается их рост, а это является одним из важных факторов интенсификации гидрогеохимического процесса. Физико-химические процессы взаимодействия в геохимических системах, включающих углерод и воду, очень сложны. Особая, можно сказать, уникальная роль углерода заключается в том, что в системах «газ – водный раствор – минералы – органическое вещество» он является тем реагентом, который относительно легко переходит от одной степени окисления к другой на пути необратимой эволюции этой системы от метастабильного к полному или близкому к полному термодинамическому равновесию. Глубокое понимание и объяснение значения этих процессов в геохимических системах, содержащих углерод и воду, приводится в работах [17–22].

Обсуждение полученных результатов

Сравнение модельных растворов с реальными термами показывает следующее. Величине минерализации метановых терм Тункинской впадины наиболее близки модельные растворы, сформировавшиеся при величинах отношения порода / вода 0,1 для 1 % C_{org} и 0,04 для 3 % C_{org} . Тем не менее наиболее близок к природному состав второго модельного раствора. Почти идентичны природным в нем количества щелочных и гидрокарбонатных ионов, сопоставимы значения хлора и кремния, а также присутствует азотно-метановый газ. Значительные отличия имеют щелочноземельные металлы и фтор. Поведение щелочноземельных металлов является слабым звеном модельных растворов на данном этапе применения моделирования. Что же касается фтора, то здесь явно проявляется эффект геологической неоднородности относительно химического состава пород, который достаточно убедительно раскрыт в работе [23].

Два анализа высококарбонатных вод по величине минерализации достаточно близки друг другу и соответствуют модельному раствору с 3 % C_{org} в породе при величине



отношения порода / вода 0,4. Однако по ионно-солевому составу наиболее близка модельному раствору вода с минерализацией 9,6 г/кг H_2O . Связано это прежде всего с величиной иона хлора, которая в обоих растворах очень близка, соответственно, и концентрации карбонатных ионов и натрия практически равны. Во втором анализе незначительное увеличение минерализации природной воды до 10,1 г/кг H_2O сопровождается почти восьмикратным повышением концентрации иона хлора и существенным уменьшением концентрации гидрокарбонатных ионов, что приводит к значительному различию с составом модельного раствора. Здесь важно то, что в первом случае соответствие состава модельного раствора и природной воды достигнуто при взаимодействии породы среднего химического состава с повышенным содержанием Ca_{org} с химически чистой водой без участия дополнительных источников хлора. Известно, что колебания содержаний химических элементов в породе от их средних значений могут иметь достаточно широкий интервал, поэтому и здесь вполне реально допущение того, что повышенное содержание хлора в термальной воде связано прежде всего с его повышенным относительно среднего значения содержанием в породе.

Заключение

Таким образом, количественное исследование физико-химических взаимодействий в

системе «вода – глинистый сланец», в которой глинистый сланец имеет средний химический состав и содержит различное количество органического вещества, показало следующее. Присутствие в породе органического вещества и его количество является основным фактором активности гидрохимического процесса, который многократно увеличивает его интенсивность. В результате взаимодействия формируются щелочные и высокощелочные с высокими восстановительными свойствами бессульфатные метановые воды содового состава, в которых образуется газовая фаза весьма значительного объема. Средний состав породы обеспечивает формирование растворов, которые имеют высокую сходимость как с низко-, так и с высокоминерализованными природными термальными водами. Наряду с этим четко проявилась хорошо выраженная в природе геологическая неоднородность, в данном случае по химическому составу пород. Этот фактор формирования состава подземных вод требует пристального внимания при исследовании гидрохимических процессов, без учета которого процессы формирования состава подземных вод нельзя считать раскрытыми. Высокоминерализованные (инверсионные) гидрокарбонатные натриевые воды, достаточно широко распространенные во многих артезианских бассейнах, формируются внутри системы «вода – порода» без привлечения каких-либо компонентов из внешних источников.

Список литературы

1. Шестаков В.М. Учет геологической неоднородности – ключевая проблема гидрохимики // Вестник Московского университета. Геология. 2003. № 1. С. 29–28.
2. Карцев А.А., Абукова Л.А. Нефтегазовая гидрохимия на современном этапе // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 1998. № 4. С. 12–17.
3. Плюснин А.М., Замана Л.В., Шварцев С.Л., Токаренко О.Г., Чернявский М.К. Гидрохимические особенности состава азотных терм Байкальской рифтовой зоны // Геология и геофизика. 2013. Т. 54. № 5. С. 647–664.
4. Шварцев С.Л., Замана Л.В., Плюснин А.М., Токаренко О.Г. Равновесие азотных терм Байкальской рифтовой зоны с минералами водовмещающих пород как основа для выявления механизмов их формирования // Геохимия. 2015. № 8. С. 720–733. <https://doi.org/10.7868/S0016752515060084>
5. Павлов С.Х., Чудненко К.В., Голубева В.А., Оргильянов А.И., Бадминов П.С., Крюкова И.Г. Геологические факторы и физико-химические процессы формирования подземных вод Тункинской впадины // Гидрохимика и тектонофизика. 2018. Т. 9. № 1. С. 221–248. <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-1-0346>
6. Кавказские минеральные воды / отв. ред. В.В. Иванов. М.: Изд-во ЦНИИКФ, 1972. 158 с.
7. Лаврушин В.Ю., Лисенков А.Б., Айдаркожина А.С. Генезис Ессентукского месторождения углекислых вод (Северный Кавказ) // Геохимия. 2020. Т. 65. № 1. С. 77–91. <https://doi.org/10.31857/S0016752520010082>
8. Абрамов В.Ю., Вавичкин А.Ю. Особенности формирования термогазохимического состава минеральных вод Ессентукского месторождения // Разведка и охрана недр. 2010. № 10. С. 27–32.

9. Мазилов В.Н., Кашик С.А., Ломоносова Т.К. Олигоценовые отложения Тункинской впадины (Байкальская рифтовая зона) // Геология и геофизика. 1993. Т. 34. № 8. С. 81–87.
10. Виноградов А.П. Средние содержания химических элементов в главных типах изверженных горных пород земной коры // Геохимия. 1962. № 7. С. 555–571.
11. Ронов А.Б., Ярошевский А.А., Мигдисов А.А. Химическое строение земной коры и геохимический баланс главных элементов. М.: Наука, 1990. 182 с.
12. Логачев Н.А. Кайнозойские континентальные отложения впадин байкальского типа // Известия Академии наук СССР. Серия геологическая. 1958. № 4. С. 18–29.
13. Карпов И.К. Физико-химическое моделирование на ЭВМ в геохимии. Новосибирск: Наука, 1981. 247 с.
14. Чудненко К.В. Термодинамическое моделирование в геохимии: теория, алгоритмы, программное обеспечение, приложения. Новосибирск: Гео, 2010. 287 с.
15. Киреева Т.А., Всеволожский В.А. Инверсионные гидрокарбонатно-натриевые воды как показатель нефтегазоносности глубоких частей геологического разреза // Глубинная нефть. 2013. Т. 1. № 2. С. 234–245 [Электронный ресурс]. URL: http://journal.deepoil.ru/images/stories/docs/DO-1-2-2013/7_Kireeva-Vsevolozhskiy_1-2-2013.pdf (10.02.2021).
16. Павлов С.Х., Карпов И.К., Чудненко К.В. Диспропорционирование и фракционирование углерода в системе «углерод – вода – газ» // Геохимия. 2006. № 7. С. 797–800.
17. Helgeson H.C., Knox A.M., Owens C.E., Shock E.L. Petroleum, oil field waters, and authigenic mineral assemblages: are they in metastable equilibrium in hydrocar-
- bon reservoirs // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1993. Vol. 57. Iss. 14. P. 3295–3339. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(93\)90541-4](https://doi.org/10.1016/0016-7037(93)90541-4)
18. Karpov I.K., Chudnenko K.V., Kulik D.A. Modeling chemical mass transfer in geochemical processes: thermodynamic relations, conditions of equilibria, and numerical algorithms // American Journal of Science. 1997. Vol. 297. Iss. 8. P. 767–806. <https://doi.org/10.2475/ajs.297.8.767>
19. Karpov I.K., Chudnenko K.V., Kulik D.A., Bychinskii V.A. The convex programming minimization of five thermodynamic potentials other than Gibbs energy in geochemical modeling // American Journal of Science. 2002. Vol. 302. Iss. 4. P. 281–311. <https://doi.org/10.2475/ajs.302.4.281>
20. Palandri J.L., Reed M.H. Reconstruction of in situ composition of sedimentary formation waters // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2001. Vol. 65. Iss. 11. P. 1741–1767. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(01\)00555-5](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(01)00555-5)
21. Plyasunov A.V., Shock E.L. Standard state Gibbs energies of hydration of hydrocarbons at elevated temperatures as evaluated from experimental phase equilibria studies // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2000. Vol. 64. Iss. 16. P. 2811–2833. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(00\)00401-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(00)00401-4)
22. Price L.C., DeWitt E. Evidence and characteristics of hydrolytic disproportionation of organic matter during metasomatic processes // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2001. Vol. 65. Iss. 21. P. 3791–3826. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(01\)00762-1](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(01)00762-1)
23. Павлов С.Х., Чудненко К.В., Хромов А.В. Моделирование формирования фторидных азотных терм в системе «вода – кристаллическая порода» // Геодинамика и тектонофизика. 2020. Т. 11. № 2. С. 378–396. <https://doi.org/10.5800/GT-2020-11-2-0481>

References

1. Shestakov VM. Account of geological heterogeneity as a major problem of hydrogeodynamics. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Geologiya*. 2003;1:29–28. (In Russ.)
2. Kartsev AA, Abukova LA. Petroleum hydrology at present stage. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Neft' i gaz = Oil and Gas Studies*. 1998;4:12–17. (In Russ.)
3. Plyusnin AM, Zamana LV, Shvartsev SL, Tokarenko OG, Chernyavskii MK. Hydrogeochemical peculiarities of the composition of nitric thermal waters in the Baikal Rift Zone. *Geologiya i geofizika*. 2013;54(5):647–664. (In Russ.)
4. Shvartsev SL, Zamana LV, Plyusnin AM, Tokarenko OG. Equilibrium of nitric springs of the Baikal rift zone with the minerals of water-bearing rocks as a basis for their formation mechanism identification. *Geokhimiya*. 2015;8:720–733. <https://doi.org/10.7868/S0016752515060084>
5. Pavlov SK, Chudnenko KV, Golubev VA, Orgilyanov AI, Badminov PS, Kryukova IG. Geological factors and physicochemical processes of groundwater formation in the Tunka depression. *Geodinamika i tektonofizika = Geodynamics & Tectonophysics*. 2018;9(1):221–248. (In Russ.) <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-1-0346>
6. Ivanov VV. *Caucasian mineral waters*. Moscow: Central Research Institute of Balneology and Physiotherapy; 1972. 158 p. (In Russ.)
7. Lavrushin VY, Aidarkozhina AS, Lisenkov AB. Genesis of the Essentuki deposit of carbonate water (North Caucasus). *Geokhimiya*. 2020;65(1):77–91. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0016752520010082>
8. Abramov VYu, Vavichkin AYu. Formation features of the thermogeochemical composition of mineral water of the Essentuki deposit. *Razvedka i okhrana nedr = Prospect and Protection of Mineral Resources*. 2010;10:27–32. (In Russ.)
9. Mazilov VN, Kashik SA, Lomonosova TK. Oligocene deposits in the Tunka depression (Baikal rift zone). *Geologiya i geofizika*. 1993;34(8):81–87. (In Russ.)
10. Vinogradov AP. Average contents of chemical elements in the main types of igneous rocks of the crust. *Geokhimiya*. 1962;7:555–571. (In Russ.)
11. Ronov AB, Yaroshevskii AA, Migdissov AA. *Chemical composition of the Earth's crust and the geochemical balance of the main elements*. Moscow: Nauka; 1990. 182 p. (In Russ.)



12. Logachev NA. Cenozoic continental deposits in Baikal type depressions. *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Seriya geologicheskaya*. 1958;4:18–29. (In Russ.)
13. Karpov IK. *Physico-chemical computer modeling in geochemistry*. Novosibirsk: Nauka; 1981. 247 p. (In Russ.)
14. Chudnenko KV. *Thermodynamic modeling in geochemistry: the theory, algorithms, the software, applications*. Novosibirsk: Geo; 2010. 287 p. (In Russ.)
15. Kireeva TA, Vsevolozhsky VA. Contrails sodium bicarbonate-water oil and gas as an indicator of the deeper parts of the geological section. *Glubinnaya neft'*. 2013;1(2):234–245. Available from: http://journal.deepoil.ru/images/stories/docs/DO-1-2-2013/7_Kireeva-Vsevolozhskiy_1-2-2013.pdf [Accessed 10th February 2021]. (In Russ.)
16. Pavlov SKh, Karpov IK, Chudnenko KV. Carbon disproportionation and fractionation in the “carbon – water – gas” system. *Geokhimiya*. 2006;7:797–800. (In Russ.)
17. Helgeson HC, Knox AM, Owens CE, Shock EL. Petroleum, oil field waters, and authigenic mineral assemblages: are they in metastable equilibrium in hydrocarbon reservoirs. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1993;57(14):3295–3339. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(93\)90541-4](https://doi.org/10.1016/0016-7037(93)90541-4)
18. Karpov IK, Chudnenko KV, Kulik DA. Modeling chemical mass transfer in geochemical processes: thermodynamic relations, conditions of equilibria, and numerical algorithms. *American Journal of Science*. 1997;297(8):767–806. <https://doi.org/10.2475/ajs.297.8.767>
19. Karpov IK, Chudnenko KV, Kulik DA, Bychinskii VA. The convex programming minimization of five thermodynamic potentials other than Gibbs energy in geochemical modeling. *American Journal of Science*. 2002;302(4):281–311. <https://doi.org/10.2475/ajs.302.4.281>
20. Palandri JL, Reed MH. Reconstruction of in situ composition of sedimentary formation waters. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2001;65(11):1741–1767. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(01\)00555-5](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(01)00555-5)
21. Plyasunov AV, Shock EL. Standard state Gibbs energies of hydration of hydrocarbons at elevated temperatures as evaluated from experimental phase equilibria studies. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2000;64(16):2811–2833. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(00\)00401-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(00)00401-4)
22. Price LC, DeWitt E. Evidence and characteristics of hydrolytic disproportionation of organic matter during metasomatic processes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2001;65(21):3791–3826. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(01\)00762-1](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(01)00762-1)
23. Pavlov SK, Chudnenko KV, Khromov AV. Modeling the formation of fluoride nitrogen-rich hot springs in the water – crystalline rock system. *Geodinamika i tektonofizika = Geodynamics & Tectonophysics*. 2020;11(2):378–396. (In Russ.) <https://doi.org/10.5800/GT-2020-11-2-0481>

Сведения об авторе / Information about the author



Павлов Сергей Харитонович,
кандидат геолого-минералогических наук,
старший научный сотрудник Лаборатории гидрогеологии,
Институт земной коры СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия,
✉ e-mail: spavlov@crust.irk.ru
Sergey Kh. Pavlov,
Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Senior Researcher of the Hydrogeology Laboratory,
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
128 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia,
✉ e-mail: spavlov@crust.irk.ru

Заявленный вклад автора / Contribution of the author

Автор по итогам количественного изучения процессов физико-химических взаимодействий в системе «вода – порода – газ – органическое вещество» проследил процессы формирования содовых метановых термальных вод в глубоких горизонтах артезианских бассейнов в зависимости от концентрации органического вещества в породе. На основании полученных результатов провел обобщение, подготовил рукопись к печати.

Having conducted a quantitative study of the physical and chemical interaction processes in the “water – rock – gas – organic matter” system, the author traced the formation processes of soda methane thermal waters in the deep horizons of artesian basins depending on organic matter concentration in rock. On the basis of the results obtained he made a generalization and prepared the copyright for publication.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.
The author declares no conflicts of interests.



Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.
The final manuscript has been read and approved by the author.

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 04.03.2021; одобрена после рецензирования 06.04.2021; принята к публикации 10.05.2021.

The article was submitted 04.03.2021; approved after reviewing 06.04.2021; accepted for publication 10.05.2021.



Оригинальная статья / Original article

УДК 556+502/504

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-2-167-173>

Идентификация природных и техногенных процессов в подземной гидросфере на основе анализа полиаренов

© А.П. Хаустов^a, М.М. Редина^b^{a,b}Российский университет дружбы народов, г. Москва, Россия

Резюме: Цель работы заключалась в анализе возможности идентификации генезиса загрязнений подземной гидросферы на основе данных о полиаренах как геохимических маркерах. Маркерная роль обусловлена токсичностью, стойкостью, привязкой этих веществ к конкретным источникам загрязнения и процессам в природе и техносфере. Основным методом исследования являлся анализ индикаторных соотношений полиаренов. Объектом исследования служили подземные воды разных регионов мира, загрязненные природными и антропогенными полиаренами. В результате авторами показаны основные направления отечественных и зарубежных исследований и освещены проблемы их проведения. С применением индикаторных соотношений успешно распознаны пирогенно и петрогенно загрязненные пробы подземных вод и продемонстрированы примеры изучения полиаренов как геохимических маркеров. Установлено, что полиарены являются эффективным индикатором генезиса загрязнений подземной гидросферы. Тем не менее их анализ требует применения современных методов отбора, подготовки проб, экстракции, что значительно осложняет исследования на практике.

Ключевые слова: подземная гидросфера, подземные воды, полициклические ароматические углеводороды, техногенез, загрязнение

Благодарности: Работа выполнена при поддержке Программы стратегического академического лидерства Российского университета дружбы народов.

Для цитирования: Хаустов А.П., Редина М.М. Идентификация природных и техногенных процессов в подземной гидросфере на основе анализа полиаренов. *Науки о Земле и недропользование*. 2021. Т. 44. № 2. С. 167–173. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-2-167-173>

Polyarene analysis-based identification of natural and technogenic processes in underground hydrosphere

© Alexander P. Khaustov^a, Margarita M. Redina^b^{a,b}RUDN University, Moscow, Russia

Abstract: The purpose of the study is to analyze the possibility to identify the pollution genesis of the underground hydrosphere based on the data on polyarenes as geochemical markers. Their marker role is due to their toxicity, persistence and confinement to specific pollution sources and natural and technogenic processes. The main research method is the analysis of indicator ratios of polyarenes. The object of research is groundwater from different regions of the world, which are polluted by natural and anthropogenic polyarenes. The main directions of domestic and foreign researches as well as the problems of their implementation are shown. The use of indicator ratios enabled successful identification of pyro- and petrogenically polluted samples of groundwater also the examples of the study of polyarenes as geochemical markers were demonstrated. The polyarenes are shown to be an effective indicator of the pollution genesis in the underground hydrosphere. However, their analysis requires the use of modern methods of sampling, sample preparation and extraction, which significantly complicates research in practice.

Keywords: underground hydrosphere, groundwater, polycyclic aromatic hydrocarbons, technogenesis, pollution

Acknowledgements: The research was supported by the Strategic Academic Leadership Program of the Peoples' Friendship University of Russia (RUDN).

For citation: Khaustov AP, Redina MM. Polyarene analysis-based identification of natural and technogenic processes in underground hydrosphere. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2021;44(2):167–173. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-2-167-173>



Введение

Индикаторная роль полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) для идентификации природных и антропогенных процессов исследуется более 40 лет. Первые оценки для загрязненных промышленных районов (работы 70-х гг. XX века) являлись результатами исследований динамики загрязнения подземной гидросферы в зоне влияния промышленного объекта (производство смол) [1 и др.]. Интерес к ПАУ вызван их токсичностью, стойкостью в окружающей среде, способностью мигрировать на дальние расстояния, а также маркировать природные и антропогенные процессы. Обнаружение ПАУ в изучаемых объектах в определенных концентрациях и соотношениях позволяет определить источник, удаленность точки отбора проб от конкретных источников, выявить техногенный или природный генезис загрязнения.

Современные публикации по анализу и интерпретации количественных оценок ПАУ в подземной гидросфере посвящены целому ряду вопросов.

Одним из них является оценка общего уровня загрязнения подземных вод ПАУ и его динамики в связи с сезонностью инфильтрации либо удаленностью от источника. В ходе изучения данной темы отмечены максимумы суммы 16 ПАУ ($\Sigma 16\text{ПАУ}$) 3 мг/л [2, 3] (из них 2,8 – нафталин за счет сравнительно более высокой растворимости). В работе [4] для крупного индустриального района выявлено закономерное снижение $\Sigma 16\text{ПАУ}$ с глубиной при среднем значении 1420 нг/дм³ и высоком среднем значении экологического риска.

Другим важным вопросом для исследования стало создание моделей взаимодействия компонентов подземной гидросферы друг с другом и с сопредельными средами; моделей транспорта, накопления, трансформации ПАУ. Так, в статье [5] оценена возможность проникновения ПАУ (пирена) в грунтовые воды в течение 100 лет сквозь 6-метровую слабопроницаемую зону аэрации (с поверхности изолирована грунтами со строительным мусором и глинами, далее по разрезу – супеси и суглинки). Показана обратная зависимость скорости деградации ПАУ от массы молекул.

Уделено внимание также моделированию загрязнений подземной гидросферы ПАУ в специфических условиях: для карстовых пород, в условиях курортных зон (с учетом перспектив использования вод); при разливах нефти и нефтепродуктов; при пожарах и т. д., а также идентификации преобладающих источников загрязнения в общем потоке поллютантов. Так, в зоне пожаров в Португалии выявлены 15 из 16 контролируемых ПАУ в подземных водах [6]. Общая $\Sigma 16\text{ПАУ}$ в районах пожаров – 23,1–95,1 нг/дм³ (среднее – 62,9 нг /дм³), что в 1–6 раз выше среднего уровня в контрольном районе, а среди набора ПАУ преобладают 5-6-кольцевые. Это позволяет оценить размеры зоны влияния пожаров как источника загрязнения.

Идентификация процессов накопления ПАУ и анализ факторов деградации (адсорбция, бактериальное разложение, фотолиз и др.) рассмотрены, например, в работе [7]: здесь для четырех эпикарстовых водосборов на юго-западе Китая оценены вертикальная миграция и сезонные колебания ПАУ из почв в подземные воды и риски загрязнения. Вертикальное распределение коррелирует с токсичными органическими соединениями в почвах на малых высотах, а почвы породы слабо сорбируют многокольцевые ПАУ.

Оценка рисков для здоровья населения при загрязнении подземных вод ПАУ проанализирована в числе прочих в работе [8]: авторами выявлен значительный риск канцерогенных заболеваний населения (сельские районы восточного Китая) за счет загрязнения при сжигании ископаемого топлива.

Также рассматриваются технологии очистки вод (фотодеградация, включая ультрафиолетовое облучение; искусственные барьеры, в том числе биобарьеры), технологии и методы экологического (гидрогеоэкологического) мониторинга.

В России отмечаются единичные исследования. Впервые данные о ПАУ в пресных подземных водах с методикой анализа были приведены в работе Ю.П. Турова и др. 1999 г. [9]. В данной публикации показано, что слабая защищенность водоносных горизонтов в подземных водах региона до глубин 230 м обусловила высокие концентрации ПАУ



(до 18 мкг/дм³), фенолов (до 29 мкг/дм³), парафинов (до 48 мкг/дм³). Кроме того, в одной из скважин томского водозабора зафиксированы 18-кратные превышения нормативов бенз(а)пирена. В работах Ю.И. Пиковского [10 и др.] подчеркивались высокие индикационные свойства ПАУ в гидротермальных процессах. В целом внимание к проблемам мониторинга и анализа присутствия ПАУ в подземной гидросфере в отечественных исследованиях недостаточно.

В связи с вышеизложенным целью представленного исследования являлся анализ возможности идентификации генезиса загрязнений подземной гидросферы на основе данных о ПАУ как геохимических маркеров.

Материал и методы исследования

Предлагаемое исследование основано на обзоре литературных источников о содержании ПАУ в подземной гидросфере в регионах мира в различных условиях техногенной нагрузки и на собственных данных авторов о содержании ПАУ в природных источниках подземных вод Крымского полуострова.

ПАУ – это группа относительно стойких органических загрязнителей, состоящих из двух и более бензольных колец, с канцерогенными и мутагенными свойствами. На практике для контроля в окружающей среде используют несколько перечней ПАУ: в перечне Евросоюза – 4 обязательных соединения¹; в перечне Агентства по охране окружающей среды США (англ.: *United States Environmental Protection Agency*) – 16 веществ². Нормативы содержания ПАУ для питьевых вод и поверхностных водных объектов в странах мира весьма различны. В некоторых работах вводится «максимально допустимый предел» в 10 мкг/дм³, рекомендованный для обеспечения безопасности грунтовых вод, что чрезвычайно много и не обосновано однозначно. Агентством по охране окружающей среды США для Σ16ПАУ в питьевых водах установлена норма 200 нг/дм³. Директива Евросоюза определяет

норму 100 нг/дм³ для Σ4ПАУ, отдельно нормируются бенз(а)пирен (10 нг/дм³). В России нормируются лишь концентрации в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования нафталина (10 мкг/дм³) и бенз(а)пирена (10 нг/дм³). Для расфасованных питьевых вод установлен норматив бенз(а)пирена 5 нг/дм³ (первая категория) и 1 нг/дм³ (высшая категория). Прочие ПАУ в отечественной практике не являются объектом обязательного наблюдения.

Крайне малые концентрации, сложности экстракции и определения ПАУ в воде порождают большие погрешности анализа. Это сдерживает широкое применение ПАУ как индикаторов в прикладных задачах гидрогеологии [11, 12 и др.]. Оптimalен анализ с использованием высокоэффективной хроматографии и масс-спектрометрии. Наибольшие ошибки (до 80–90 %) возникают при пробоотборе, хранении и экстракции проб; только 10 % – при измерении сигнала. Наш эксперимент показал, что при пробоотборе в темные новые полиэтиленовые упаковки идет активное выщелачивание значительных количеств большинства ПАУ за счет агрессивности вод [13]. В связи с этим пробоотбор должен проводиться в темное стекло с фиксацией гексаном или кислотой, с предпочтительно твердофазной экстракцией на специальные «патроны». Анализ ПАУ в подземных водах регламентирован ПНД Ф 14.1:2:4.70-96 «Количественный химический анализ вод. Методика измерений массовых концентраций полициклических ароматических углеводородов в питьевых, природных и сточных водах методом высокоэффективной жидкостной хроматографии». Это актуальный документ, но устаревшие методы экстракции делают результаты неточными. С 2016 г. для атмосферных осадков и поверхностных вод действует РД 52.44.590-2016 «Массовая концентрация приоритетных компонентов полициклических ароматических углеводородов в пробах атмосферных осадков и поверхностных вод. Методика измерений методом высокоэффективной

¹ Бенз(а)пирен (BaP), бенз(б)флуорантен (BbFlu), бенз(к)флуорантен (BkFlu) и индено(1,2,3-cd)пирен (IP).

² Нафталин (Naph), аценафтен (Ace), аценафтилен (Acn), флуорен (Fluo), антранцен (An), фененатрен (Phen), флуорантен (Flu), пирен (Py), хризен (Chr), бенз(а)антрацен (BaA), BaP, BbFlu, BkFlu, дибенз(а,х)антрацен (DbA), IP, бенз(g,h,i)периллен (Bghi)



жидкостной хроматографии». Формально он не применим к подземным водам, но результаты точнее за счет более полной экстракции.

Индикаторные соотношения ПАУ позволяют определить характер их источника загрязнения. Традиционно применяют:

- отношения концентраций «кинетических» и «термодинамических» изомеров ПАУ одной молекулярной массы;
- отношения сумм концентраций легких ПАУ к многокольцевым;
- доли концентраций ПАУ, характеризующих конкретные техногенные процессы (типы производств).

Для соотношений известны границы между пиро- и петрогенными процессами; значения, соответствующие конкретным технологиям, техногенным источникам, удаленности от источника загрязнения. Наиболее распространены соотношения: Flu / (Flu + Py) с границей между пиро- и петрогенными процессами 0,1 и An / (An + Phen) с границей 0,5.

Объектами анализа в данном исследовании стали содержащие ПАУ природные источники (грязевой вулкан, пресный источник, рапа соленого озера на Крымском полуострове); подземные воды под свалками гудрона в Германии [14], в промышленном центре в Боснии [4], в мегаполисе в Индии [15], в сельских районах Индии [16] и Китае [8], в зоне лесных пожаров в Португалии [6], на газовом заводе в Соединенных Штатах Америки [1];

в источниках выхода нефте содержащих вод («гидротермальная нефть») в Калифорнийском заливе Соединенных Штатов Америки [17].

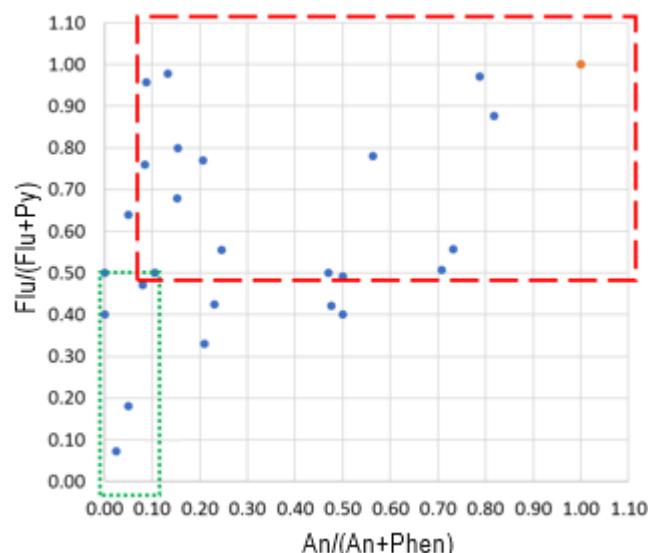
Результаты исследования и обсуждение

Распределение проб в плоскости индикаторных соотношений с выделением явно пирогенной (высокотемпературные процессы образования загрязнений) и петрогенной (низкотемпературные процессы) областей показано на рисунке.

В явно пирогенной зоне – точки, соответствующие загрязнениям вследствие пожаров, размещения отходов на городских свалках, хранилища промышленных отходов; в петрогенной – «гидротермальные нефти», загрязнения в индустриальном районе Боснии, природные источники Керченского полуострова. Для точек за пределами выделенных зон необходим дополнительный анализ, включая применение дополнительных индикаторных соотношений [18–21], более четко определяющих характер источника.

Заключение

ПАУ – эффективные индикаторы природных и техногенных процессов в подземной гидросфере, однако исследования их в отечественной практике редки. Одной из причин сложившейся ситуации является сложность аналитических определений. Не уделяется



Оценка генезиса загрязнений подземных вод на основе индикаторных соотношений

Красным пунктиром выделена пирогенная область, зеленым – петрогенная

Assessment of groundwater pollution genesis based on indicator ratios

Red dotted line indicates the pyrogenic area, green dotted line – the petrogenic area



должного внимания пробоотбору, хранению и экстракции ПАУ из водных растворов. Недоучет липофильности и сорбционных свойств ПАУ ко всему прочему становится причиной серьезных ошибок при моделировании потоков загрязнителей.

Поведение ПАУ в растворах (а в подземной гидросфере тем более) во многом обусловлено их физико-химическими свойствами, подверженностью фотолизу и окислению

микробиотой по сравнению с их поведением в других средах.

Низкая эффективность экстракции и ошибки аналитических определений, физико-химические процессы поведения ПАУ в системе «вода – породы – органическое вещество» приводят к тому, что большинство ранних количественных оценок и моделей требует ревизии, особенно при идентификации источников загрязнения.

Список литературы

1. Mattox C.F., Humenick M.J. Organic groundwater contaminants from UCG // Proceedings of the 5th Underground Coal Conversion Symposium. Alexandria, 1979.
2. Richard D.E., Dwyer D.F. Aerated biofiltration for simultaneous removal of iron and polycyclic aromatic hydrocarbons from groundwater // Water Environment Research. 2001. Vol. 73. Iss. 6. P. 673–683. <https://doi.org/10.2175/106143001x143411>
3. Groher D.M. An investigation of factors affecting the concentrations of polycyclic aromatic hydrocarbons in groundwater at coal tar waste sites. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1990. 145 p.
4. Ilić P., Nešković Markić D., Stojanović Bjelić L. Evaluation of sources and ecological risk of PAHs in different layers of soil and groundwater // Preprints. 2020. <https://doi.org/10.20944/preprints202002.0224.v1>
5. Галицкая И.В., Позднякова И.А. К проблеме загрязнения подземных вод и пород зоны аэрации нефтепродуктами и ПАУ на городских территориях // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2011. №. 4. С. 337–343.
6. Mansilha C., Carvalho A., Guimarães P., Espinha Marques J. Water quality concerns due to forest fires: polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) contamination of groundwater from mountain areas // Journal of Toxicology and Environmental Health. Part A. 2014. Vol. 77. Iss. 14–16. P. 806–815. <https://doi.org/10.1080/15287394.2014.909301>
7. Sun Y., Zhang S., Lan J., Xie Z., Pu J., Yuan D., et al. Vertical migration from surface soils to groundwater and source appointment of polycyclic aromatic hydrocarbons in epikarst spring systems, southwest China // Chemosphere. 2019. Vol. 230. P. 616–627. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.05.007>
8. Liang M., Liang H., Rao Z., Xu D. Occurrence of polycyclic aromatic hydrocarbons in groundwater from rural areas in eastern China: spatial distribution, source apportionment and health cancer risk assessment // Chemosphere. 2020. Vol. 259. P. 127534. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127534>
9. Туров Ю.П., Кадычагов П.Б., Гузняева М.Ю., Альшанский А.М. Полициклические ароматические углеводороды в подземных водах и почвах Обь-Томского междуречья // Химия в интересах устойчивого развития. 1999. №. 7. С. 291–299.
10. Пиковский Ю.И. Природные и техногенные потоки углеводородов в окружающей среде: монография. М.: Изд-во МГУ, 1993. 208 с.
11. Хаустов А.П., Редина М.М., Яковлева Е.В. Водопоявления подземных вод как геохимические самообразующие объекты (интерпретация на основе распределения ПАУ) // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2018. № 3. С. 3–17.
12. Хаустов А.П., Редина М.М. Парадоксы концентрирования углеводородов в компонентах геосистем (на примере ПАУ) // Сергеевские чтения: геоэкологические аспекты реализации национального проекта «Экология». Диалог поколений: материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. Вып. 22. М., 2020. С. 94–103.
13. Khaustov A., Redina M., Goryainov S. Migration of PAHs and phthalates from package materials during water storage: glass or plastic? // Polycyclic Aromatic Compounds. 2020. P. 1–13. <https://doi.org/10.1080/10406638.2020.1734033>
14. Schlanges I., Meyer D., Palm W.U., Ruck W. Identification, quantification and distribution of PAC-metabolites, heterocyclic PAC and substituted PAC in groundwater samples of tar-contaminated sites from Germany // Polycyclic Aromatic Compounds. 2008. Vol. 28. Iss. 4–5. P. 320–338. <https://doi.org/10.1080/10406630802377807>
15. Masih A., Lal J.K. Concentrations and carcinogenic profiles of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in groundwater of an urban site at a Terai belt of North India // International Journal of Applied Engineering Research. 2014. Vol. 9. Iss. 1. P. 1–8.
16. Masih A., Saini R., Taneja A. Contamination and exposure profiles of priority polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in groundwater in a semi-arid region in India // International Journal of Water. 2008. Vol. 4. Iss. 1–2. P. 136–147. <https://doi.org/10.1504/IJW.2008.018152>
17. Kawka O.E.M. Hydrothermal alteration of sedimentary organic matter in Guaymas Basin, Gulf of California. Corvallis: Oregon State University, 1990. 236 p.
18. Khaustov A.P., Redina M.M. Indicator ratios of polycyclic aromatic hydrocarbons for geoenvironmental studies of natural and technogenic objects // Water Resources. 2017. Vol. 44. Iss. 7. P. 903–913. <https://doi.org/10.1134/S0097807817070065>



19. Moyo S., McCrindle R., Mokgalaka N., Myburgh J., Mujuru M. Source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments from polluted rivers // *Pure and Applied Chemistry*. 2013. Vol. 85. Iss. 12. P. 2175–2196. <https://doi.org/10.1351/pac-con-12-10-08>
20. Soclo H.H., Garrigues P., Ewald M. Origin of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in coastal marine sediments: case studies in Cotonou (Benin) and Aquitaine (France) areas // *Marine Pollution Bulletin*. 2020. Vol. 40. Iss. 5. P. 387–396. [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(99\)00200-3](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(99)00200-3)
21. Țigănuș D., Coatu V., Lazăr L., Oros A., Spînu A.D. Identification of the sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments from the Romanian Black Sea sector // *Revista Cercetări Marine*. 2013. Vol. 43. Iss. 1. P. 187–196.

References

1. Mattox CF, Humenick MJ. Organic groundwater contaminants from UCG. In: *Proceedings of the 5th Underground Coal Conversion Symposium*. Alexandria; 1979.
2. Richard DE, Dwyer DF. Aerated biofiltration for simultaneous removal of iron and polycyclic aromatic hydrocarbons from groundwater. *Water Environment Research*. 2001;73(6):673–683. <https://doi.org/10.2175/106143001x143411>
3. Groher DM. *An investigation of factors affecting the concentrations of polycyclic aromatic hydrocarbons in groundwater at coal tar waste sites*. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology; 1990. 145 p.
4. Ilić P, Nešković Markić D, Stojanović Bjelić L. Evaluation of sources and ecological risk of PAHs in different layers of soil and groundwater. *Preprints*. 2020. <https://doi.org/10.20944/preprints202002.0224.v1>
5. Galitskaya IV, Pozdnyakova IA. Contamination of groundwater and unsaturated zone deposits with oil products and PAH in urban areas. *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya. Gidrogeologiya. Geokriologiya*. 2011;4:337–343. (In Russ.)
6. Mansilha C, Carvalho A, Guimarães P, Espinha Marques J. Water quality concerns due to forest fires: polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) contamination of groundwater from mountain areas. *Journal of Toxicology and Environmental Health. Part A*. 2014;77(14–16):806–815. <https://doi.org/10.1080/15287394.2014.909301>
7. Sun Y, Zhang S, Lan J, Xie Z, Pu J, Yuan D, et al. Vertical migration from surface soils to groundwater and source appointment of polycyclic aromatic hydrocarbons in epikarst spring systems, southwest China. *Chemosphere*. 2019;230:616–627. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.05.007>
8. Liang M, Liang H, Rao Z, Xu D. Occurrence of polycyclic aromatic hydrocarbons in groundwater from rural areas in eastern China: spatial distribution, source apportionment and health cancer risk assessment. *Chemosphere*. 2020;259:127534. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127534>
9. Turov YuP, Kadychagov PB, Guznyaeva MYu, Al'shanskii AM. Polycyclic aromatic hydrocarbons in groundwater and soils of the Ob-Tomsk interfluve. *Khimika v interesakh ustoichivogo razvitiya*. 1999;7:291–299. (In Russ.)
10. Pikovskii Yul. *Natural and technogenic flows of hydrocarbons in the environment*. Moscow: Lomonosov Moscow State University; 1993. 208 p. (In Russ.)
11. Khaustov AP, Redina MM, Yakovleva EV. Groundwater sources as geochemical system-creating objects (interpretation based on PAH distribution). *Geoekologiya*.
12. Khaustov AP, Redina MM. Paradoxes of hydrocarbons concentration in geosystem components (for the case of PAH). In: *Sergeevskie chteniya: geoekologicheskie aspekty realizatsii natsional'nogo proekta "Ekologiya". Dialog pokolenii: materialy godichnoi sessii Nauchnogo soveta RAN po problemam geoekologii, inzhenernoi geologii i hidrogeologii = Sergeevskie readings: geoecological aspects of the implementation of the national project "Ecology". Dialogue of generations: materials of the annual session of the Scientific Council of the Russian Academy of Sciences on the problems of geoecology, engineering geology and hydrogeology*. Iss. 22. Moscow; 2020. p.94–103. (In Russ.)
13. Khaustov A, Redina M, Goryainov S. Migration of PAHs and phthalates from package materials during water storage: glass or plastic? *Polycyclic Aromatic Compounds*. 2020;1–13. <https://doi.org/10.1080/10406638.2020.1734033>
14. Schlanges I, Meyer D, Palm WU, Ruck W. Identification, quantification and distribution of PAC-metabolites, heterocyclic PAC and substituted PAC in groundwater samples of tar-contaminated sites from Germany. *Polycyclic Aromatic Compounds*. 2008;28(4–5):320–338. <https://doi.org/10.1080/10406630802377807>
15. Masih A, Lal JK. Concentrations and carcinogenic profiles of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in groundwater of an urban site at a Terai belt of North India. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2014;9(1):1–8.
16. Masih A, Saini R, Taneja A. Contamination and exposure profiles of priority polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in groundwater in a semi-arid region in India. *International Journal of Water*. 2008;4(1–2):136–147. <https://doi.org/10.1504/IJW.2008.018152>
17. Kawka OEM. *Hydrothermal alteration of sedimentary organic matter in Guaymas Basin, Gulf of California*. Corvallis: Oregon State University; 1990. 236 p.
18. Khaustov AP, Redina MM. Indicator ratios of polycyclic aromatic hydrocarbons for geoenvironmental studies of natural and technogenic objects. *Water Resources*. 2017;44(7):903–913. <https://doi.org/10.1134/S0097807817070065>
19. Moyo S, McCrindle R, Mokgalaka N, Myburgh J, Mujuru M. Source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments from polluted rivers. *Pure and Applied Chemistry*. 2013;85(12):2175–2196. <https://doi.org/10.1351/pac-con-12-10-08>



20. Soclo HH, Garrigues P, Ewald M. Origin of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in coastal marine sediments: case studies in Cotonou (Benin) and Aquitaine (France) areas. *Marine Pollution Bulletin*. 2020;40(5):387–396. [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(99\)00200-3](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(99)00200-3)

21. Țigănuș D, Coatu V, Lazăr L, Oros A, Spînu AD. Identification of the sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments from the Romanian Black Sea sector. *Revista Cercetări Marine*. 2013;43(1):187–196.

Сведения об авторах / Information about the authors



Хаустов Александр Петрович,
доктор геолого-минералогических наук, профессор,
профессор кафедры прикладной экологии,
Российский университет дружбы народов,
117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6, Россия,
✉ e-mail: khaustov-ap@rudn.ru
ORCID: 0000-0002-5338-3960

Alexander P. Khaustov,
Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Professor,
Professor of the Department of Applied Ecology,
RUDN University,
6 Miklukho-Maklaya St., Moscow 117198, Russia,
✉ e-mail: khaustov-ap@rudn.ru
ORCID: 0000-0002-5338-3960



Редина Маргарита Михайловна,
доктор экономических наук, доцент,
заведующая кафедрой прикладной экологии,
Российский университет дружбы народов,
117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6, Россия,
e-mail: redina-mm@rudn.ru
ORCID: 0000-0002-3169-0142

Margarita M. Redina,
Dr. Sci. (Econ.), Associate Professor,
Head of the Department of Applied Ecology,
RUDN University,
6 Miklukho-Maklaya St., Moscow 117198, Russia,
e-mail: redina-mm@rudn.ru
ORCID: 0000-0002-3169-0142

Заявленный вклад авторов / Contribution of the authors

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов / Conflict of interests

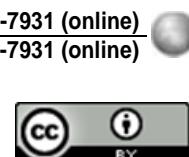
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.
The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 04.03.2021; одобрена после рецензирования 08.04.2021; принятая к публикации 11.05.2021.

The article was submitted 04.03.2021; approved after reviewing 08.04.2021; accepted for publication 11.05.2021.



Оригинальная статья / Original article

УДК 550.845-032.27(1-925.11/16)

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-2-174-183>

Изотопно-гидрогохимическая характеристика радоновых вод Белокурихинского месторождения

© А.А. Хващевская^a, Ю.Г. Копылова^b, Д.А. Новиков^c,А.Н. Пыряев^d, А.А. Максимова^e, А.С. Деркачев^f, А.А. Редин^g^{a,b}Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия^{c,e,f}Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, г. Новосибирск, Россия^dИнститут геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск, Россия^gАО «Курорт Белокуриха», г. Белокуриха, Россия

Резюме: Цель данной работы заключалась в проведении комплексных изотопно-геохимических исследований минеральных вод Белокурихинского месторождения. Лабораторное изучение химического состава вод было выполнено методами титриметрии, ионной хроматографии, масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой. Изотопный состав кислорода, водорода и углерода водорастворенной углекислоты исследовался с помощью прибора Isotope Ratio Mass Spectrometer Finnigan™ MAT 253, снабженного приставками пробоподготовки H/Device (для анализа отношений δD) и GasBench II (для анализа отношений δ¹⁸O и δ¹³C DIC). На месторождении распространены два водоносных горизонта: первый безнапорный водоносный горизонт объединяет рыхлые отложения четвертичного возраста, второй напорный водоносный горизонт включает граниты верхнепалеозойского возраста различной степени трещиноватости – от монолитных до выветрелых. По геохимическим коэффициентам было выделено три группы вод: трещинно-жильные воды гранитов, залегающие в выветрелых гранитах; грунтовые воды зоны редкоzemельной минерализации и фонового состава; поверхностные воды р. Белокурихи. Изотопные данные по кислороду и водороду свидетельствуют, что эксплуатируемые водоносные горизонты Белокурихинского месторождения имеют инфильтрационное питание метеорными водами со смешением акцента питания к осадкам зимнего периода. В работе представлены первые данные комплексных изотопно-гидрогохимических исследований азотно-кремнистых слаборадоновых термальных вод Белокурихинского месторождения. Воды имеют НСО₃-SO₄ Na и SO₄-HCO₃ Na состав с величиной общей минерализации от 198 до 257 мг/дм³, характеризуются щелочными pH 8,6–9,6, содержанием кремния от 19,8 до 24,6 мг/дм³ и относятся к трещинно-жильным водам гранитов верхнего палеозоя. Активность ²²²Rn составляет до 359 Бк/дм³. Значения δD (от -126,9 до -102,7 ‰) и δ¹⁸O (от -17,5 до -14,2 ‰) изученных вод указывают на их метеорное происхождение. Значения δ¹³C DIC варьируют от -9,7 до -25,6 ‰ и указывают на биогенное происхождение углерода.

Ключевые слова: радоновые воды, стабильные изотопы кислорода, водорода, углерода, Белокурихинское месторождение минеральных радоновых вод, Алтай-Саянская складчатая область

Благодарности: Исследования проводились при финансовой поддержке проекта ФНИ № 0331-2019-0025, РФФИ и Правительства Новосибирской области в рамках научного проекта № 19-45-540004, а также Государственного Задания РФ «Наука» в рамках проекта № FSWW-0022-2020.

Для цитирования: Хващевская А.А., Копылова Ю.Г., Новиков Д.А., Пыряев А.Н., Максимова А.А., Деркачев А.С. [и др.]. Изотопно-гидрогохимическая характеристика радоновых вод Белокурихинского месторождения. Науки о Земле и недропользование. 2021. Т. 44. № 2. С. 174–183. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-2-174-183>

Isotope-hydrogeochemical features of the Belokurikha field radon waters

© Albina A. Khvashchevskaya^a, Yulia G. Kopylova^b, Dmitry A. Novikov^c,Aleksandr N. Pyrayev^d, Anastasia A. Maksimova^e, Anton S. Derkachev^f, Anatoly A. Redin^g^{a,b}National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia^{c,e,f}Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch
of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia^dV.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch
of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia^gBelokurikha Resort JSC, Belokurikha, Russia

Abstract: The purpose of the work is to carry out integrated isotope-geochemical studies of the mineral waters of the Belokurikha deposit. The methods of titrimetry, ion chromatography, inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) have been used in the laboratory investigation of the chemical composition of waters. The isotope composition



of oxygen, hydrogen and carbon in dissolved carbon dioxide has been studied with the help of the Isotope Ratio Mass Spectrometer Finnigan™ MAT 253 equipped with the attachments for sample preparation H/Device (to analyze the δD ratio) and GasBench II (to analyze $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ ratios). There are two aquifers at the deposit. The first nonartesian aquifer comprises loose sediments of the Quaternary age. The second artesian aquifer includes the granites of the upper Paleozoic age with the different fracture degree: from monolith to loosened. Three groups of waters are distinguished on the basis of geochemical coefficients: fracture-vein waters bedded in weathered granites; groundwaters of the zone of rare earth mineralization and background composition; surface waters of the Belokurikha river. The isotope data on oxygen and hydrogen provide evidence that the production aquifers of the Belokurikha field are fed through the infiltration of meteoric waters, with the feeding shift to winter precipitation. The paper provides the first data of the integrated isotope-hydrogeochemical studies of nitric-siliceous low-radon thermal waters of the Belokurikha deposit. The composition of these waters is $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{ Na}$ and $\text{SO}_4\text{-HCO}_3\text{ Na}$ with the total dissolved salts value ranging from 198 to 257 mg/dm³. The waters are characterized by alkaline pH of 8.6–9.6, silicon content ranging from 19.8 to 24.6 mg/dm³, and they are referred to the fracture-vein waters of the Upper Paleozoic granites. ^{222}Rn activity is up to 359 Bq/dm³. The ratios of δD (from -126.9 to -102.7 ‰) and $\delta^{18}\text{O}$ (from -17.5 to -14.2 ‰) in the studied waters indicate their atmospheric origin. The values of $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ vary from -9.7 to -25.6 ‰ and point to the biogenic origin of carbon.

Keywords: radon waters, stable isotopes of oxygen, hydrogen, carbon, Belokurikha deposit of mineral radon waters, the Altay-Sayan folded area

Acknowledgements: The research was funded by the project of the Fundamental Scientific Research no. 0331-2019-0025 of the Russian Foundation for Basic Research as a part of the scientific project no. 19-45-540004 and the State Task of the Russian Federation "Science" within the framework of the project no. FSWW-0022-2020.

For citation: Khvashchevskaia AA, Kopylova YG, Novikov DA, Pyrayev AN, Maksimova AA, Derkachev AS, et al. Isotope-hydrogeochemical features of the Belokurikha field radon waters. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2021;44(2):174–183. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-2-174-183>

Введение

Радоновые воды на территории Сибири пользуются большим распространением благодаря особенностям геологического строения и широким проявлением процессов кислого магматизма. Открыто более 25 месторождений [1] и проявлений: Заельцовское [2–6], Каменское [7], Шивелигское [8], Шумак [9], Чойган [9] и другие [10–14].

Белокурихинское месторождение термальных азотно-кремнистых слаборадоновых вод расположено в западной части Алтая-Саянской складчатой области, в долине р. Белокурихи. Первые скважины глубиной до 140 м были пробурены в ходе детальных поисково-разведочных работ, проводившихся под руководством профессора М.И. Кучина в период с 1931 по 1938 гг. Большой вклад в изучение гидрогеологических условий месторождения внесли Н.М. Елманова, А.А. Логинов, А.А. Редин и другие. Эксплуатация ведется с 1949 г. по настоящее время. Утвержденные в 1996 г. эксплуатационные запасы термальных радоновых вод по категориям А+В составили 900 м³/сут., однако экспериментальным путем установлено, что оптимальная величина суммарного водоотбора из эксплуатационных скважин не должна превышать 674 м³/сут. Это позволит сохранить стабильность химиче-

ского состава подземных вод, включая бальнеологические показатели. В настоящее время на месторождении эксплуатируются скважины № 3э, 3д и 4э, в резерве скважины № 4д, 1э, 5э, 10э, также имеются три наблюдательные скважины 3гр, 4гр, 10гр (рис. 1, а).

Материалы и методы исследования

В марте 2020 г. в связи с выполнением работ по переоценке запасов подземных минеральных термальных радоновых вод на Белокурихинском месторождении было отобрано 15 проб из эксплуатационных и наблюдательных скважин, одного колодца, двух источников и р. Белокурихи. Лабораторное изучение химического состава методами титриметрии, ионной хроматографии, масс-спектрометрии с индуктивно связанный плазмой проводилось в Проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета. Исследование изотопного состава кислорода, водорода вод, а также углерода водорастворенной углекислоты проводилось в Аналитическом центре многоэлементных и изотопных исследований Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН.

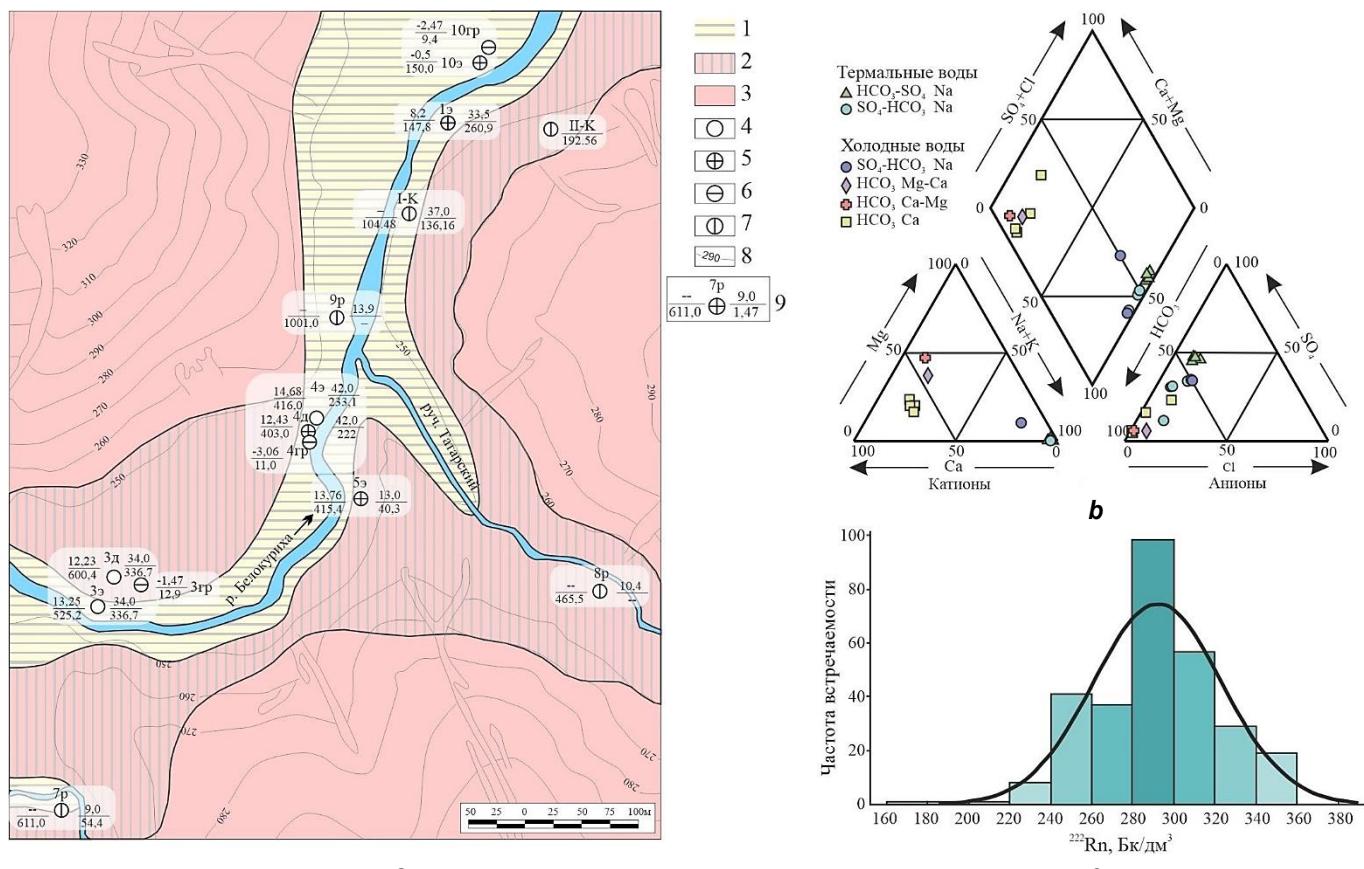


Рис. 1. Геохимические особенности Белокурихинского месторождения радоновых вод:
 а – гидрогеологическая схема месторождения (1–3 – зоны распространения: 1 – аллювиальных вод, 2 – холодных трещинных вод гранитов, 3 – термальных трещинных вод гранитов;
 4–7 – скважины: 4 – эксплуатационные, 5 – резервные (наблюдательные), 6 – наблюдательные (на грунтовые воды), 7 – разведочные; 8 – изогипсы, м; 9 – дробь слева: числитель – напор над поверхностью, м (май 2020 г.), знаменатель – глубина скважины, м; дробь справа: числитель – температура, °С, знаменатель – активность радона, Бк/дм³;
 б – диаграмма Пайпера состава природных вод Белокурихинского месторождения;

Fig. 1. Geochemical features of the Belokurikha radon water deposit:
 a – hydrogeological scheme of the deposit (1–3 – distribution zones of: 1–alluvial waters,
 2 – cold fracture waters of granites, 3 – thermal fracture waters of granites;
 4–7 – wells: 4 – production wells, 5 – reserve (observation) wells, 6 – groundwater observation wells,
 7 – exploration wells; 8 – isohypsum, m; 9 – fraction on the left: numerator – head

above the surface, m (May 2020), denominator – well depth, m; fraction on the right:

numerator – temperature, °C, denominator – radon activity, Bq/dm³;

b – Piper diagram of natural water composition of the Belokurikha deposit;

c – 3D radon distribution in production well waters

Результаты исследования и их обсуждение

Гидрогеологическое строение. Особенности гидрогеологических условий месторождения определяются весьма сложным геологическим строением изучаемой территории, которая находится в зоне сочленения Западно-Сибирской плиты и горных сооружений Алтая. Переход между ними маркируется тектонической зоной, которая в рельефе выражена резким уступом и структурно контро-

лируется крупным Белокурихинским разломом субширотного простирания. Он оперяется более мелкими дизъюнктивными нарушениями, определяющими блоковую структуру месторождения и анизотропию фильтрационно-емкостных свойств [15]. В гидрогеологическом разрезе развиты два гидравлически взаимосвязанных водоносных горизонта: безнапорный, объединяющий рыхлые отложения четвертичного возраста, и напорный, включающий граниты верхнего палеозоя. Напорные



воды разгружаются в четвертичных отложениях и дренируются р. Белокурихой.

Гидрогеохимические особенности. Рассмотрим подробнее особенности геохимии изученных вод, разделенных на однородные геохимические совокупности с помощью коэффициентов (Ca/Si , Mg/Si , Na/Si , Si/Na , Ca/Na , Ca/Mg , $r\text{Na}/r\text{Cl}$ и SO_4/Cl). Отношения Ca/Na , Ca/Mg , Ca/Si , Mg/Si , Na/Si использованы для оценки особенностей обогащения вод за счет процессов гидролиза алюмосиликатов и конгруэнтного растворения карбонатов; $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^- \gg 1$ и $r\text{Na}^+/r\text{Cl}^- \gg 1$ – гидролиза алюмосиликатов и окисления сульфидных минералов; пропорциональное увеличение значений $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^- = 1$, $r\text{Na}^+/r\text{Cl}^- \geq 1$, $\text{Ca/Na} > 0$ – испарительного концентрирования.

Группа трещинно-жильных вод гранитов объединяет несколько разновидностей: термальные (32,4–42,6 °C); термальные и холодные (≈ 13 °C), залегающие в выветрелых гранитах; холодные зоны смешения с грунтовыми водами. Средние значения геохимических коэффициентов для данной группы составляют: $\text{Ca/Si} = 0,14$; $\text{Mg/Si} = 0,05$; $\text{Na/Si} = 3,8$; $\text{Si/Na} = 0,26$; $\text{Ca/Na} = 0,04$; $\text{Ca/Mg} = 6,74$; $r\text{Na}/r\text{Cl} = 12,93$ и $\text{SO}_4/\text{Cl} = 4,99$. Это свидетельствует о преобладающей роли процессов гидролиза алюмосиликатов при формировании их химического состава. В целом термальные воды характеризуются $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{ Na}$ и $\text{SO}_4\text{-HCO}_3\text{ Na}$ составом (рис. 1, б) с величиной общей минерализации от 198 до 257 мг/дм³, щелочными pH 8,6–9,6 и содержанием кремния от 19,8 до 24,6 мг/дм³. Холодная разновидность отличается $\text{SO}_4\text{-HCO}_3\text{ Na}$ составом и величиной общей минерализации 184–234 мг/дм³, широкой вариацией pH (6,9–9,1) и содержанием кремния от 17,1 до 21,9 мг/дм³. Содержания радионуклидов для данной группы составляют, мг/дм³: ^{238}U – от $1,12 \cdot 10^{-6}$ до $7,31 \cdot 10^{-3}$; ^{232}Th – от $1,77 \cdot 10^{-6}$ до $9,79 \cdot 10^{-5}$. Отношение $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ в термальных водах варьирует в интервале от $3,95 \cdot 10^{-3}$ до 9,28. В скважине 3гр отмечаются процессы смешения с грунтовыми водами, что проявляется в росте отношений до следующих значений: $\text{Ca/Si} = 0,48$; $\text{Mg/Si} = 0,25$; $\text{Ca/Na} = 0,14$; а также снижении до: $\text{Na/Si} = 3,38$; $\text{Ca/Mg} = 1,92$; $r\text{Na}/r\text{Cl} = 7,45$; $\text{SO}_4/\text{Cl} = 2,93$. Сопоставимые

значения характеризуют отношение $\text{Si/Na} = 0,3$. В микрокомпонентном составе вод этой группы следует отметить высокие концентрации, мг/дм³: $\text{Li}_{0,64} > \text{W}_{0,37} > \text{Mo}_{0,041} > \text{Hg}_{0,0077} > \text{As}_{0,0055} > \text{Ge}_{0,0047} > \text{Ga}_{0,004} > \text{Be}_{0,00028} > \text{Th}_{0,000098}$. В водах отмечаются признаки концентрирования алюминия, иттрия и редкоземельных элементов (РЗЭ).

Ко второй группе относятся две разновидности грунтовых вод: зоны редкоземельной минерализации (скважина 4гр) и фонового состава. По сравнению с предыдущей группой возрастают средние значения геохимических коэффициентов у $\text{Ca/Na} = 3,16$; $\text{Ca/Si} = 6,22$; $\text{Mg/Si} = 1,25$; $\text{Si/Na} = 0,51$ и $\text{SO}_4/\text{Cl} = 6,63$. Данный рост, вероятно, обусловлен значительной долей карбонатной составляющей во вмещающих породах, что сопровождается закономерным снижением: $\text{Na/Si} = 1,98$; $\text{Ca/Mg} = 5,13$; $r\text{Na}/r\text{Cl} = 12,13$. Воды отличает $\text{HCO}_3\text{ Ca}$ состав с величиной общей минерализации от 252 до 392 мг/дм³, нейтральные и слабошелочные показатели pH (7,3–8,1) и содержание кремния от 7,9 до 10,5 мг/дм³. Содержания радионуклидов составляют, мг/дм³: ^{238}U – от $4,18 \cdot 10^{-3}$ до $2,93 \cdot 10^{-2}$; ^{232}Th – от $2,46 \cdot 10^{-6}$ до $8,57 \cdot 10^{-4}$. Отношение $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ в термальных водах варьирует в интервале от $2,94 \cdot 10^{-4}$ до $2,92 \cdot 10^{-2}$. В водах скважины 4гр отмечаются повышенные значения многих микрокомпонентов, мг/дм³: $\text{Fe}_{20,7} > \text{P}_{0,80} > \text{Mn}_{0,165} > \text{Ti}_{0,054} > \text{V}_{0,030} > \text{U}_{0,029} > \text{Zn}_{0,027} > \text{Cu}_{0,015} > \text{Cr}_{0,010} > \text{As}_{0,0044} > \text{Co}_{0,0030} > \text{Se}_{0,0014} > \text{Ga}_{0,0012} > \text{Th}_{0,00086} > \text{Zr}_{0,00038} > \text{Be}_{0,00018} > \text{Ge}_{0,00018} > \text{Bi}_{0,000046}$. Наряду с высокими содержаниями радиоактивных элементов следует отметить высокие концентрации иттрия (до 0,0025 мг/дм³) и РЗЭ (достигают 0,026 мг/дм³ для суммы легких РЗЭ и 0,0021 для суммы тяжелых РЗЭ).

К третьей разновидности относятся поверхностные воды р. Белокурихи, состав которой изменяется вниз по течению от $\text{HCO}_3\text{ Ca-Mg}$ до $\text{HCO}_3\text{ Mg-Ca}$. Величина общей минерализации варьирует от 124 до 133 мг/дм³, pH – от 7,5 до 7,6, а содержание кремния меняется от 7,8 до 8,6 мг/дм³. Содержания радионуклидов составляют, мг/дм³: ^{238}U – от $8,33 \cdot 10^{-4}$ до $1,81 \cdot 10^{-3}$; ^{232}Th – от $8,21 \cdot 10^{-5}$ до $2,2 \cdot 10^{-4}$. Отношение $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ в термальных водах варьирует в интервале от $4,54 \cdot 10^{-2}$ до



$2,64 \cdot 10^{-1}$. Средние значения геохимических коэффициентов составляют: Ca/Si – 1,89; Mg/Si – 1,11; Na/Si – 0,69; Si/Na – 1,63; Ca/Na – 2,93; Ca/Mg – 1,71; rNa/rCl – 5,45; SO₄/Cl – 3,7. В поверхностных водах наблюдаются сопоставимые концентрации кремния по сравнению с грунтовыми водами. Проба, отобранная в городе, имеет все черты антропогенного загрязнения, что проявляется в росте содержаний натрия и хлора. По существенному обогащению вод р. Белокурихи РЗЭ можно считать, что они также подвержены влиянию редкоземельной минерализации.

Изотопные исследования. В настоящей работе впервые выполнен комплекс исследований изотопного состава водорода и кислорода вод, а также углерода в водорастворенной форме углерода (англ.: *dissolved inorganic carbon, DIC*). Анализ полученных данных по изотопным отношениям кислорода и водорода изученных вод (рис. 2, а) показал, что все они имеют метеорное происхождение (значения δD и δ¹⁸O располагаются в большинстве случаев между глобальной (англ.: *global meteoric water line, GMWL*) и локальной (англ.: *local meteoric water line, LMWL*) линиями метеорных вод¹ [16]; локальная линия метеорных вод приведена для ближайшей точки наблюдений из представленных в международной базе данных Wiser – для города Иркутска). Несущественные положительные отклонения значений δ¹⁸O от локальной линии метеорных вод, по-видимому, обусловлены эффектом испарения вод до их инфильтрации [17, 18]. Для большинства подземных вод (см. рис. 2, а) характерно обогащение изотопных отношений кислорода и водорода легкими изотопами H и ¹⁶O, приводящее к смещению величин δD и δ¹⁸O к более отрицательным значениям вдоль локальной линии метеорных вод. Вероятно, это свидетельствует об инфильтрационном питании этих водоносных горизонтов водами со смещением акцента питания к зимнему периоду года (за счет активной эвапотранспирации летних осадков), поскольку проявление высотного эффекта – уменьшения концентрации дейтерия и ¹⁸O

в атмосферных осадках по мере увеличения абсолютных отметок местности – в исследованной области представляется затруднительным (перепад высот не превышает 100 м) [19].

Значения δ¹³C_{DIC} в исследованных водах варьируют в диапазоне от -9,7 до -12,1 ‰ для поверхностных вод р. Белокурихи и от -13,9 до -25,6 ‰ для подземных вод (рис. 2, б). При этом содержание DIC по сумме трех компонентов (CO_{2aq}, HCO₃⁻ и CO₃²⁻) составляет от 1300 до 4800 моль/л. Все полученные значения углеродных делт, а также содержание DIC в водах указывают на явное участие биогенной почвенной углекислоты, производимой при распаде остатков растений с фотосинтезом типа C₃, в формировании DIC. Существенная разница изотопного состава углерода в DIC изученных вод, по-видимому, может быть обусловлена различным геохимическим типом вод и, соответственно, разницей в соотношении компонентов DIC. Переход почвенной углекислоты в каждую из указанных форм сопровождается изотопным фракционированием, существенно различающимся величиной коэффициента ε [20]. Наиболее отрицательным значениям δ¹³C_{DIC} соответствует подземная вода с наибольшей долей водорастворенного CO_{2aq} (более 50 % от общей суммы DIC), имеющего в отличие от HCO₃⁻ и CO₃²⁻ отрицательную величину коэффициента ε, что, по-видимому, и является первопричиной самого легкого изотопного состава водорастворенного углерода в указанной пробе.

Углекислота вод р. Белокурихи в значительной степени насыщается легким изотопом ¹²C после подпитки реки подземными водами (значения δ¹³C_{DIC} становятся легче на 2,4 ‰) на фоне небольшого обогащения легкими изотопами водорода и кислорода самих вод (0,7 и 0,1 ‰ соответственно). Это может как свидетельствовать об участии поверхностного водосбора грунтовых вод в привнесении DIC в воды реки, так и указывать на то, что величина δ¹³C_{DIC} является более чувствительным в сравнении с δD и δ¹⁸O маркером смешения водных потоков.

¹ International Atomic Energy Agency // iaea.org [Электронный ресурс]. URL: <https://nucleus.iaea.org/wiser/index.aspx> (20.01.2021).

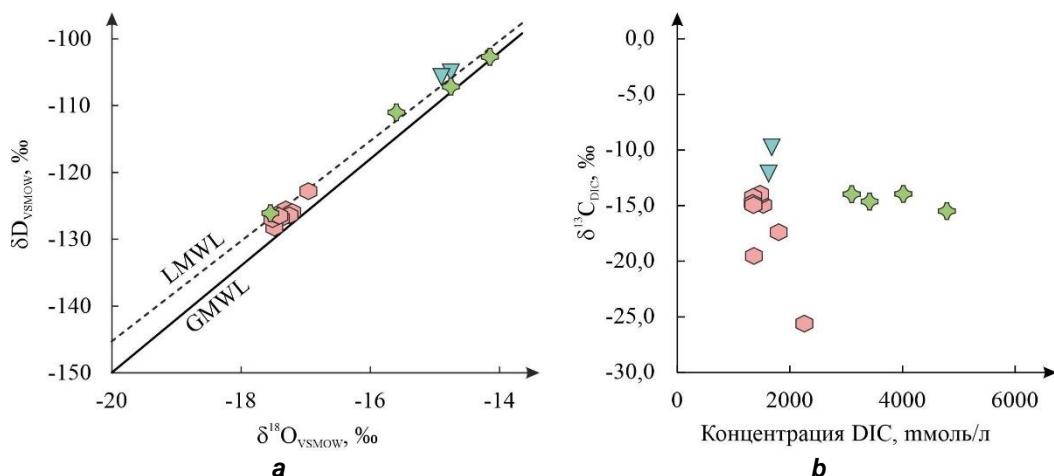


Рис. 2. Распределение стабильных изотопов водорода, кислорода и углерода в радоновых водах Белокурихинского месторождения:

a – значения δD и $\delta^{18}\text{O}$ для природных вод Белокурихинского месторождения радоновых вод относительно глобальной и локальной линий метеорных вод;

b – содержание и изотопный состав углерода в водорастворенной форме углерода исследованных вод:
1 – трещинно-жильные воды гранитов; 2 – зона редкоземельной минерализации и фонового состава; 3 – поверхностные воды

Fig. 2. Distribution of stable isotopes of hydrogen, oxygen and carbon in the radon waters of the Belokurikha deposit:

a – δD and $\delta^{18}\text{O}$ values for natural waters of the Belokurikha deposit of radon waters relatively global and local lines of meteoric water;

b – content and isotopic composition of carbon in the carbon water dissolved form of the studied waters:
1 – fracture-vein water of granites; 2 – zone of rare earth mineralization and background composition; 3 – surface water

Заключение

Таким образом, в настоящей работе представлены первые результаты комплексных изотопно-гидрогеохимических исследований Белокурихинского месторождения термальных азотно-кремнистых слаборадоновых вод. Установлены особенности трех геохимических групп природных вод, которые подразделяются в свою очередь на семь разновидностей. Термальные трещинно-жильные воды гранитоидов, которые эксплуатируются на месторождении с 1949 г., имеют $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{ Na}$ и $\text{SO}_4\text{-HCO}_3\text{ Na}$ состав с величиной общей минерализации от 198 до 257 мг/дм³, щелочными показателями pH 8,6–9,6, содержанием кремния от 19,8 до 24,6 мг/дм³. Содержания радионуклидов составляют, мг/дм³: ^{238}U – от $1,12 \cdot 10^{-6}$ до $7,31 \cdot 10^{-5}$; ^{232}Th – от $1,77 \cdot 10^{-6}$ до $9,42 \cdot 10^{-5}$. Отношение $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ в термальных

водах варьирует в интервале от $3,95 \cdot 10^{-3}$ до 9,28 при среднем значении 2,92. Активность ^{222}Rn в скважинах варьирует от 160 до 360 Бк/дм³ при среднем значении 290 Бк/дм³. Грунтовые и поверхностные воды подвержены влиянию редкоземельной и радиоактивной минерализации.

Предполагается инфильтрационное питание эксплуатируемых водоносных горизонтов Белокурихинского месторождения метеорными водами со смещением акцента питания к осадкам зимнего периода. Содержание DIC, а также значения $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ в исследованных водах указывают на биогенное происхождение углерода. Соотношение компонентов DIC оказывает существенное влияние на конечное значение $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ каждой пробы. Для поверхностных вод р. Белокурихи наблюдается обогащение DIC легким изотопом углерода ^{12}C .

Список литературы

- Посохов Е.В., Толстых Н.И. Минеральные воды (лечебные, промышленные, энергетические). Л.: Недра, 1977. 240 с.
- Вериго Е.К., Гусев В.К., Быкова В.В. Заельцовское месторождение радоновых вод // Новые данные по геологии и полезным ископаемым Западной



Сибири / отв. ред. Г.А. Селятицкий. Вып. 14. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1979. С. 47–51.

3. Новиков Д.А., Сухорукова А.Ф., Корнеева Т.В. Гидрогеология и гидрохимия Заельцовско-Мочищенского проявления радоновых вод (юг Западной Сибири) // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9. № 4. С. 1255–1274. <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-4-0394>

4. Novikov D.A., Korneeva T.V. Microelements in radon waters of the Zaelsovsky field (the southern part of West Siberia) // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1172. P. 012096. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1172/1/012096>

5. Novikov D.A., Dultsev F.F., Chernykh A.V. Role of water-rock interactions in the formation of the composition of radon waters of the Zaelsovsky field (the southern part of West Siberia) // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1451. P. 012007. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1451/1/012007>

6. Novikov D.A., Dultsev F.F., Kamenova-Totzeva R., Korneeva T.V. Hydrogeological conditions and hydrogeochemistry of radon waters in the Zaelsovsky-Mochishche zone of Novosibirsk, Russia // Environmental Earth Sciences. 2021. Vol. 80. P. 216. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09486-w>

7. Корнеева Т.В., Новиков Д.А. Формы миграции химических элементов в радоновых водах месторождения «Горводолечебница» (г. Новосибирск) // Труды Ферсмановской научной сессии Геологического института Кольского научного центра Российской академии наук. 2020. № 17. С. 287–291. <https://doi.org/10.31241/FNS.2020.17.054>

8. Булатов А.А., Копылова Ю.Г., Джабарова Н.К., Рычкова К.М., Аракчаа К.Д., Хващевская А.А. [и др.]. Новые сведения о составе радоновых вод (Шивелигское месторождение) // Курортная база и природные лечебно-оздоровительные местности Тувы и сопредельных регионов. 2013. № 1. С. 154–161.

9. Минеева Л.А., Аракчаа К.Д., Кызыл О.М. Физико-химическая характеристика минеральных вод месторождений Шумак и Чойган // Известия Иркутского государственного университета. Науки о Земле. 2016. Т. 17. С. 115–134.

10. Елисеев В.А. Радоновые азотно-термальные воды Алтая // Вопросы курортологии, физиотерапии и лечебной физической культуры. 2010. № 5. С. 38–40.

11. Новиков Д.А., Копылова Ю.Г., Вакуленко Л.Г., Сухорукова А.Ф., Пыряев А.Н. [и др.]. Изотопно-геохимические особенности проявления слаборадоновых вод «Инские источники» (юг Западной Сибири) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021. Т. 332. № 3. С. 135–145.

12. Новиков Д.А., Сухорукова А.Ф., Корнеева Т.В., Каменова-Тоцева Р.М., Максимова А.А., Деркачев А.С. [и др.]. Гидрогеология и гидрохимия месторождения радоновых вод «Каменское» (г. Новосибирск) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021. Т. 332. № 4. С. 192–208.

13. Новиков Д.А., Дульцев Ф.Ф., Сухорукова А.Ф., Максимова А.А., Черных А.В., Деркачев А.С. Радионуклиды в природных водах Новосибирской городской агломерации // Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами: материалы IV Всерос. науч. конф. с междунар. уч. Улан-Удэ, 2020. С. 134–138.

14. Новиков Д.А., Вакуленко Л.Г., Сухорукова А.Ф. Геохимия системы вода – порода проявления слаборадоновых вод «Инские источники» (юг Западной Сибири) // Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами: материалы IV Всерос. науч. конф. с междунар. уч. Улан-Удэ, 2020. С. 88–92.

15. Дергунов А.Б. Структуры зоны сочленения Горного Алтая и Западного Саяна. М.: Наука, 1967. 227 с.

16. Craig H. Isotopic variations in meteoric waters // Science. 1961. Vol. 133. Iss. 3465. P. 1702–1703. <https://doi.org/10.1126/science.133.3465.1702>

17. Chafouq D., Mandour A.E., Elgettafi M., Himi M., Chouikri I., Casas A. Hydrochemical and isotopic characterization of groundwater in the Ghis-Nekor plain (northern Morocco) // Journal of African Earth Sciences. 2018. Vol. 139. P. 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2017.11.007>

18. Newman C.P., Poulson S.R., Hanna B. Regional isotopic investigation of evaporation and water-rock interaction in mine pit lakes in Nevada, USA // Journal of Geochemical Exploration. 2020. Vol. 210. P. 106445. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2019.106445>

19. Ферронский В.И., Поляков В.А. Изотопия гидросферы Земли. М.: Научный мир, 2009. 632 с.

20. Zhang J., Quay P.D., Wilbur D.O. Carbon isotope fractionation during gas-water exchange and dissolution of CO₂ // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1995. Vol. 59. Iss. 1. P. 107–114.

References

- Posokhov EV, Tolstikhin NI. *Mineral waters (medical, industrial, power)*. Leningrad: Nedra; 1977. 240 p. (In Russ.)
- Verigo EK, Gusev VK, Bykova VV. Zaeltsovskoe deposit of radon waters. In: Selyatitskii GA (ed.). *Novye dannye po geologii i poleznyim iskopаемым Zapadnoi Sibiri = New data on geology and minerals of Western Siberia*. Iss. 14. Tomsk: Tomsk University; 1979. p.47–51. (In Russ.)
- Novikov DA, Sukhorukova AF, Korneeva TV. Hydrogeology and hydrogeochemistry of the Zaeltsovsko-Mochishchensky zone of radon waters in the southern West Siberia. *Geodinamika i tektonofizika = Geodynamics & Tectonophysics*. 2018;9(4):1255–1274. (In Russ.) <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-4-0394>
- Novikov DA, Korneeva TV. Microelements in radon waters of the Zaeltsovsky field (the southern part of West Siberia). *Journal of Physics: Conference Series*. 2019;1172:012096. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1172/1/012096>
- Novikov DA, Dultsev FF, Chernykh A.V. Role of water-rock interactions in the formation of the composition of radon waters of the Zaeltsovsky field (the southern part of West Siberia). *Journal of Physics: Conference Series*.



2020;1451:012007. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1451/1/012007>

6. Novikov DA, Dultsev FF, Kamenova-Totzeva R, Korneeva TV. Hydrogeological conditions and hydrogeochemistry of radon waters in the Zaeltsovsky-Mochishche zone of Novosibirsk, Russia. *Environmental Earth Sciences*. 2021;80:216. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09486-w>

7. Korneeva TV, Novikov DA. Migration Forms of chemical elements in radon waters of the Gorvodolechentsa field, Novosibirsk. *Trudy Fersmanovskoi nauchnoi sessii Geologicheskogo instituta Kol'skogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*. 2020;17:287–291. (In Russ.) <https://doi.org/10.31241/FNS.2020.17.054>

8. Bulatov AA, Kopylova YG, Dzhabarova NK, Rychkova KM, Arakchaa KD, Khvashchevskaia AA, et al. New information about a composition of the radon waters (Shivelig's deposit). *Kurortnaya baza i prirodnye lechebno-ozdorovitel'nye mestnosti Tuvy i sopredel'nykh regionov*. 2013;1:154–161. (In Russ.)

9. Mineeva LA, Arakchaa KD, Kyzyl OM. The physico-chemical characteristics of mineral waters of Shumak and Choigan. *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle = Bulletin of Irkutsk State University. Earth Sciences*. 2016;17:115–134. (In Russ.)

10. Eliseev VA. Radon- and nitrogen-containing thermal waters of the Altai region. *Voprosy kurortologii, fizioterapii i lechebnoi fizicheskoi kul'tury*. 2010;5:38–40. (In Russ.)

11. Novikov DA, Kopylova YuG, Vakulenko LG, Sukhorukova AF, Pyrayev AN, et al. Isotope geochemical features of occurrence of low-radon waters "Inskie springs" (South-Western Siberia). *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2021;332(3):135–145. (In Russ.)

12. Novikov DA, Sukhorukova AF, Korneeva TV, Kamenova-Totzeva RM, Maksimova AA, Derkachev AS, et al. Hydrogeology and hydrogeochemistry of the "Kamenskoe" field of radon-rich waters (Novosibirsk). *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2021;332(4):192–208. (In Russ.)

13. Novikov DA, Dul'tsev FF, Sukhorukova AF, Maksimova AA, Chernykh AV, Derkachev AS. Radionuclides in natural waters of the Novosibirsk urban agglomeration. In: *Geologicheskaya evolyutsiya vzaimodeistviya vody s gornymi porodami: materialy IV Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii s mezdunarodnym uchastiem = Geological evolution of water and rocks interaction: materials of 4th All-Russian scientific conference with international participation*. Ulan-Ude; 2020. p.134–138. (In Russ.)

14. Novikov DA, Vakulenko LG, Sukhorukova AF. Geochemistry of the water-rock system of Inskiye springs weakly radon water manifestation (south of West Siberia). In: *Geologicheskaya evolyutsiya vzaimodeistviya vody s gornymi porodami: materialy IV Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii s mezdunarodnym uchastiem = Geological evolution of water and rocks interaction: materials of 4th All-Russian scientific conference with international participation*. Ulan-Ude; 2020. p.88–92. (In Russ.)

15. Dergunov AB. *Structures of the zone of conjugation between mountain Altai and West-Sayan*. Moscow: Nauka; 1967. 227 p. (In Russ.)

16. Craig H. Isotopic variations in meteoric waters. *Science*. 1961;133(3465):1702–1703. <https://doi.org/10.1126/science.133.3465.1702>

17. Chafouq D, Mandour AE, Elgettafi M, Himi M, Chouikri I, Casas A. Hydrochemical and isotopic characterization of groundwater in the Ghis-Nekor plain (northern Morocco). *Journal of African Earth Sciences*. 2018;139:1–13. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2017.11.007>

18. Newman CP, Poulson SR, Hanna B. Regional isotopic investigation of evaporation and water-rock interaction in mine pit lakes in Nevada, USA. *Journal of Geochemical Exploration*. 2020;210:106445. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2019.106445>

19. Ferronskii VI, Polyakov VA. *Isotopy of the Earth's hydrosphere*. Moscow: Nauchnyi mir; 2009. 632 p. (In Russ.)

20. Zhang J, Quay PD, Wilbur DO. Carbon isotope fractionation during gas-water exchange and dissolution of CO₂. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1995;59(1):107–114.

Сведения об авторах / Information about the authors



Хващевская Альбина Анатольевна,
кандидат геолого-минералогических наук,
заведующая Проблемной научно-исследовательской
лабораторией гидрохимии,
Инженерная школа природных ресурсов,
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
634050, г. Томск, просп. Ленина, 30, Россия,
e-mail: garibova@yandex.ru

Albina A. Khvashchevskaia,
Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Head of the Fundamental Research Laboratory of Hydrogeochemistry,
Engineering School of Natural Resources,
National Research Tomsk Polytechnic University,
30 Lenin Ave., Tomsk 634050, Russia,
e-mail: garibova@yandex.ru



Копылова Юлия Григорьевна,
кандидат геолого-минералогических наук,
главный инженер Проблемной научно-исследовательской
Лаборатории гидрохимии,
Инженерная школа природных ресурсов,
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
634050, г. Томск, просп. Ленина, 30, Россия,
e-mail: unpc_voda@mail.ru

Yulia G. Kopylova,
Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Chief Engineer of the Fundamental Research Laboratory of Hydrogeochemistry,
Engineering School of Natural Resources,
National Research Tomsk Polytechnic University,
30 Lenin Ave., Tomsk 634050, Russia,
e-mail: unpc_voda@mail.ru



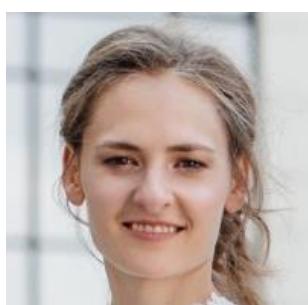
Новиков Дмитрий Анатольевич,
кандидат геолого-минералогических наук, доцент,
заведующий Лабораторией гидрохимии осадочных бассейнов Сибири,
Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3/6, Россия,
✉ e-mail: NovikovDA@ipgg.sbras.ru

Dmitry A. Novikov,
Cand. Sci. (Geol. & Mineral.), Associate Professor,
Head of the Laboratory of Hydrogeology of Siberian Sedimentary Basins,
Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics,
Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,
3/6 Academician Koptyug Ave., Novosibirsk 630090, Russia,
✉ e-mail: NovikovDA@ipgg.sbras.ru



Пыряев Александр Николаевич,
кандидат геолого-минералогических наук,
научный сотрудник Лаборатории изотопно-аналитической геохимии,
Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия,
e-mail: pyrayev@gmail.com

Aleksandr N. Pyrayev,
Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Researcher of the Laboratory of Isotope-Analytical Geochemistry,
V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy,
Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,
3 Academician Koptyug Ave., Novosibirsk 630090, Russia,
e-mail: pyrayev@gmail.com



Максимова Анастасия Алексеевна,
инженер Лаборатории гидрохимии осадочных бассейнов Сибири,
Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3/6, Россия,
e-mail: rock.nastaya64@gmail.com

Anastasia A. Maksimova,
Engineer of the Laboratory of Hydrogeology of Siberian Sedimentary Basins,
Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics,
Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,
3/6 Academician Koptyug Ave., Novosibirsk 630090, Russia,
e-mail: rock.nastaya64@gmail.com



Деркачев Антон Сергеевич,
инженер Лаборатории гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири,
Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коptyuga, 3/6, Россия,
e-mail: a.derkachev@g.nsu.ru

Anton S. Derkachev,
Engineer of the Laboratory of Hydrogeology of Siberian Sedimentary Basins,
Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics,
Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,
3/6 Academician Koptyug Ave., Novosibirsk 630090, Russia,
e-mail: a.derkachev@g.nsu.ru



Редин Анатолий Александрович,
главный гидрогеолог,
АО «Курорт Белокуриха»,
659900, г. Белокуриха, ул. Мясникова, 2, Россия,
e-mail: anatoliy-redin@yandex.ru

Anatoly A. Redin,
Chief Hydrogeologist,
Belokurikha Resort JSC,
2 Myasnikov St., Belokurikha 659900, Russia,
e-mail: anatoliy-redin@yandex.ru

Заявленный вклад авторов / Contribution of the authors

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.
The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.*

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 04.03.2021; одобрена после рецензирования 08.04.2021; принята к публикации 12.05.2021.

The article was submitted 04.03.2021; approved after reviewing 08.04.2021; accepted for publication 12.05.2021.



Оригинальная статья / Original article

УДК 551.349

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-2-184-190>

Анализ влияния криолитозоны на водообменные процессы

© В.В. Шепелёв^a^aИнститут мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск, Россия

Резюме: В статье акцентируется внимание на важности изучения водообменной роли криолитозоны, занимающей в настоящее время четверть суши Земли и распространяющейся в некоторых районах до глубины 1,5 км, а также оценке влияния мерзлоты на формирование ресурсов и режима поверхностных и подземных вод. Прежде всего, водообменная функция криолитозоны связана с процессами промерзания водонасыщенных и протаивания льдонасыщенных горных пород. Автором рассматриваются раздельно водообменная роль деятельного слоя и воздействие многолетней динамики криолитозоны на направленность и масштабы водообмена. Водообменная функция деятельного слоя обусловлена сезонными фазовыми переходами подземных вод из жидкого состояния в твердое и обратно. Так, объем воды, образуемой от таяния подземного льда, аккумулированного в зимний период в деятельном слое, составляет $4 \cdot 10^{12} \text{ м}^3$. В связи с этим в гидрологическом (климатическом) цикле круговорота природных вод нами предлагается отдельно выделять криогидрогенное звено, связанное с сезонными переходами подземных вод из жидкого состояния в твердое и обратно в деятельном слое криолитозоны. Безусловно, еще более масштабна водообменная функция криолитозоны, связанная с многолетней динамикой ее развития под воздействием периодических крупных колебаний климата. Так, за период голоценового климатического оптимума было переведено в жидкую фазу около $4.5 \cdot 10^{15} \text{ м}^3$ подземного льда. Интенсивность поступления воды, образуемой от таяния этого количества льда, в поверхностные и подземные районы ее аккумуляции составляла в среднем около 820 км^3 в год. Учитывая данное обстоятельство, автором предлагается выделять отдельно криолитогенное звено в геологическом цикле круговорота природных вод.

Ключевые слова: криолитозона, мерзлота, водообменный цикл, подземные воды, поверхностные воды, круговорот природных вод

Благодарности: Исследование выполнено при частичной поддержке РФФИ (проекты № 18-05-60036 и № 20-05-00670).

Для цитирования: Шепелёв В.В. Анализ влияния криолитозоны на водообменные процессы. *Науки о Земле и недропользование*. 2021. Т. 44. № 2. С. 184–190. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-2-184-190>

Analysis of permafrost effect on water exchange processes

© Viktor V. Shepelev^a^aMelnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russia

Abstract: The article focuses on the importance of studying the water exchange role of the permafrost, which currently occupies a quarter of the Earth's land and is 1.5 km deep in some regions, as well as assessing the permafrost impact on the formation of surface and ground water resources and regime. First of all, the permafrost water exchange function is associated with the freezing of water-saturated rocks and thawing of ice-saturated ones. The author gives individual consideration to the water exchange role of the active layer and the effect of the permafrost long-term dynamics on water exchange direction and scale. The water exchange function of the active layer appears due to the seasonal phase transitions of groundwater from a liquid to a solid state and back. Thus, the volume of water formed by the thawing of underground ice accumulated in the active layer in winter has been estimated about $4 \cdot 10^{12} \text{ m}^3$. In this regard, it is proposed to give cryohydrogenic part associated with the seasonal transitions of groundwater from the liquid to solid state and back in the active layer of the cryolithozone independent consideration within the hydrological (climatic) cycle of the natural water circulation. It is most certain that the permafrost water exchange function is more significant being associated with long-term permafrost development dynamics under the influence of periodic dramatic climate fluctuations. Thus, during the Holocene climatic optimum about $4.5 \cdot 10^{15} \text{ m}^3$ of underground ice was converted to the liquid phase. The intensity of water formed from the melting of this amount of ice inflowing its surface and underground reservoirs has been estimated about 820 km^3 per year. This fact considered, the author proposes to consider the cryolithogenic part separately in the geological cycle of the natural water cycle.

Keywords: cryolithozone, permafrost, water exchange cycle, groundwater, surface water, natural water cycle

Acknowledgements: The research was carried out with the partial support of the Russian Foundation for Basic Research (projects no. 18-05-60036 and no. 20-05-00670).

For citation: Shepelev VV. Analysis of permafrost effect on water exchange processes. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2021;44(2):184–190. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-2-184-190>



Введение

В криолитозоне, занимающей в настоящее время четверть суши Земли и распространяющейся в некоторых районах до глубины 1,5 км и более, содержится по ориентировочным расчетам около 400 тыс. км³ подземного льда. Однако криолитозона является не только весьма масштабным по размерам хранилищем льда, но и очень динамичной открытой диссипативной системой. Основная особенность криолитозоны заключается в фазовых переходах воды, которые во многом обусловливают сложность ее строения, высокую динамичность и специфичность развития различных процессов криогенеза. В данной системе происходят фазовые переходы воды из жидкого состояния в твердое (процессы льдообразования или промерзания), из твердого – в жидкое (процессы протаивания), из газообразного – в твердое (процессы десублимации или аблации), из твердого – в газообразное (процессы сублимации), из жидкого – в газообразное (процессы испарения), а также из газообразного состояния в жидкое (процессы конденсации).

Материалы и методы исследования

В представленном исследовании автором проведен анализ влияния криолитозоны на водообменные процессы. Анализ выполнен на основе имеющихся опубликованных данных. При этом учитывались главным образом результаты комплексных стационарных наблюдений, когда изучались как особенности режима различных типов подземных вод криолитозоны, так и геокриологические, метеорологические, гидрологические и другие условия их формирования, распространения и разгрузки.

Результаты исследования и их обсуждение

Водообменная функция криолитозоны связана прежде всего с фазовыми переходами воды из жидкого состояния в твердое и обратно, то есть с процессами промерзания водонасыщенных и протаивания льдонасыщенных горных пород. Ежегодно в верхней ее части происходит сезонный переход подземных

льдов в жидкую фазу и обратно в огромных количественных масштабах [1–3]. Суммарный объем воды, образуемой от таяния подземного льда, аккумулируемого в зимний период в деятельном слое криолитозоны, составляет около $4 \cdot 10^{12}$ м³, что в 3,3 раза превышает единовременный объем воды всех рек нашей планеты [4]. Значительная часть образуемой при этом влаги поступает на формирование различных видов надмерзлотных вод, которые расходуются на транспирацию и подземное питание рек и озер криолитозоны. Величина надмерзлотного стока в области распространения многолетнемерзлых пород по нашим расчетам равна $19 \cdot 10^9$ м³/сут. или 220 тыс. м³/с.

Таким образом, водообменная функция самого верхнего слоя криолитозоны, обусловленная сезонными фазовыми переходами воды из жидкого состояния в твердое и обратно, весьма значительна. Именно по этой причине правомерно выделять в гидрологическом (климатическом) цикле круговорот природных вод отдельно криогидрогенное звено, связанное с сезонными переходами подземных вод, формируемых в деятельном слое криолитозоны, из жидкого состояния в твердое и обратно.

Своебразна и, безусловно, более масштабна водообменная функция криолитозоны, связанная с многолетней динамикой ее развития под воздействием периодических крупных колебаний климата. Мощность и площадь распространения многолетнемерзлых пород значительно увеличиваются в периоды похолоданий климата (криохроны) и уменьшаются в периоды последующих потеплений (термохроны). В Западной и Восточной Сибири, например, только за последние 800 тыс. лет выделяют около 20 подобных пульсаций криолитозоны (криоциклов) продолжительностью от 2 до 40 тыс. лет и более [5–7].

Последнее крупное похолодание климата произошло в сартанский криохрон (37–11 тыс. лет назад), который называют главным климатическим минимумом плейстоцена [8–10]. Пик этого похолодания был около 18 тыс. лет назад, когда многолетнемерзлые породы занимали около 110 млн км² суши Земли, охватывая практически всю Европу, большую



часть территорий Азиатского континента и Северной Америки. После этого началась общая тенденция на потепление, максимум которой пришелся на время около 7–6 тыс. лет назад (голоценовый климатический оптимум). В период этого термохона южная граница распространения криолитозоны сместилась в северном направлении на 1300–1500 м, сформировались значительные по площади надмерзлотные водоносные таликовые зоны мощностью до 150–300 м.

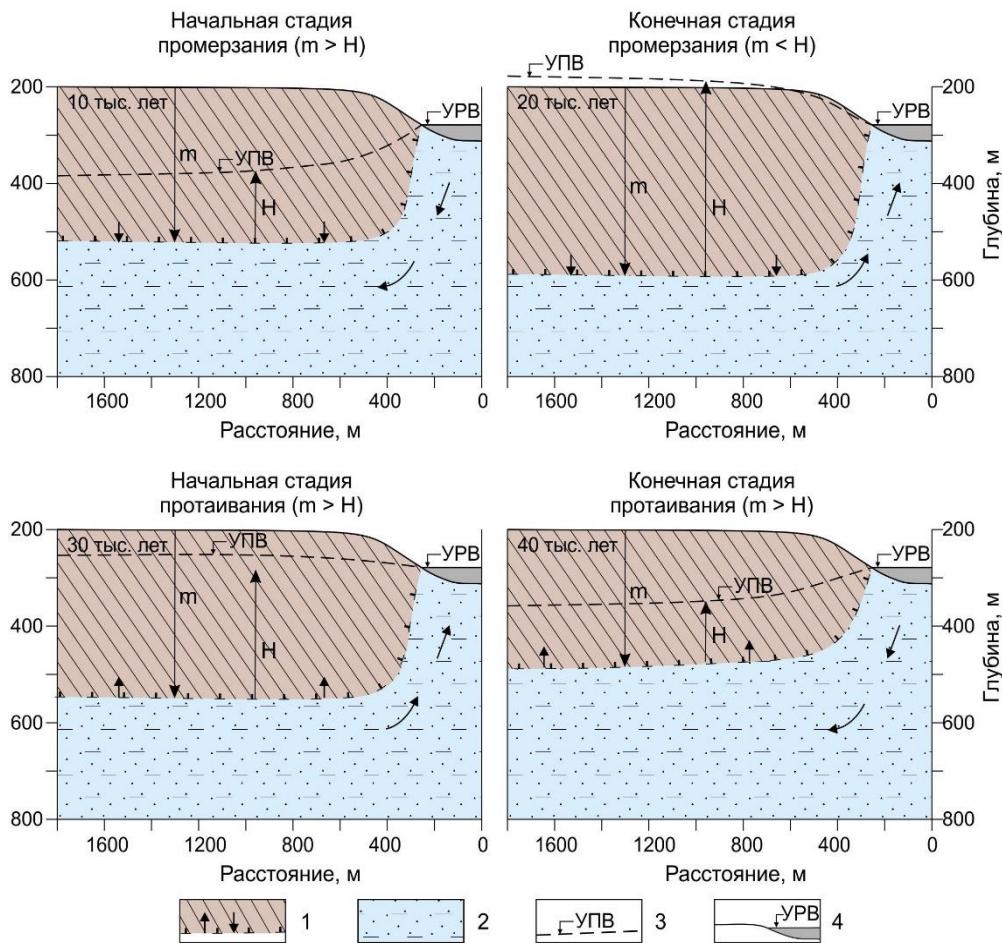
Ориентировочный расчет показывает, что за период голоценового термохона было переведено в жидкую фазу около $4,5 \cdot 10^{15} \text{ м}^3$ подземного льда. Интенсивность поступления воды, образуемой от таяния этого количества льда, в поверхностные и подземные пути ее стока и аккумуляции составляла в среднем порядка 820 км^3 в год. Это сопоставимо с интенсивностью водообмена в таких звеньях геологического цикла круговорота природных вод, как литогенное, метаморфогенное и магматогенное. Учитывая данное обстоятельство, автором ранее предлагалось выделять отдельно криолитогенное звено в геологическом цикле круговорота природных вод [4, 11].

Весьма специфичен водообмен подмерзлотных вод с поверхностными водами при масштабных изменениях климата. В периоды похолоданий промерзание водоносных горных пород вызывает отжатие определенной части подземных вод от фронта межфазовой границы, поскольку объем образующегося в горных породах льда примерно на 9 % больше жидкой фазы воды. Под воздействием подобного так называемого кристаллизационно-компрессионного эффекта значительно повышается гидростатическое давление в промерзающих водоносных горизонтах, что вызывает рост пьезометрических уровней подмерзлотных вод. Амплитуда повышения гидростатического давления в подмерзлотной зоне в периоды похолоданий климата, как показало моделирование, может достигать 32–34 МПа [12]. Это, в свою очередь, способствует значительному увеличению величины разгрузки подмерзлотных вод по сквозным таликам, существующим под крупными реками и озерами в криолитозоне (рисунок).

В продолжительные периоды потепления климата происходит смещение фазовой границы (мерзлые породы – подземные воды) вверх по разрезу, что сопровождается понижением гидростатического давления в подмерзлотной зоне (кристаллизационно-вакуумный эффект). Под воздействием этого эффекта формируются значительные по величине депрессии пьезометрического уровня в подмерзлотных водоносных горизонтах и комплексах, что интенсифицирует как горизонтальную фильтрацию подземных вод, так и их инфильтрационное питание за счет поверхностных вод по сквозным таликовым зонам. Величина инфильтрационного питания подмерзлотных вод по сквозным таликам в периоды потепления климата может достигать 40–60 м^3 на 1 км^2 площади таликовой зоны [12].

Таким образом, в продолжительные периоды похолоданий климата происходит не только перевод огромных объемов подземных вод в твердую фазу, но и истощение ресурсов подмерзлотных водоносных горизонтов за счет повышения величины их разгрузки по сквозным таликовым зонам под воздействием кристаллизационно-компрессионного эффекта. В длительные же периоды потепления климата происходит восполнение запасов и ресурсов подмерзлотных вод за счет как таяния подземного льда, так и повышения их инфильтрационного питания по сквозным таликовым зонам. Именно подобная активная водообменная роль последних сохраняет их от промерзания даже в период значительных по амплитуде и продолжительных по времени похолоданий климата. При этом изменяется гидрогеологическая роль сквозных таликовых зон. В длительные периоды похолодания климата они являются водовыделяющими для подмерзлотных водоносных горизонтов, а в длительные периоды потепления климата – водопоглощающими для поверхностных водоемов.

Высокая водообменная функция криолитозоны, безусловно, связана с тем, что периодические фазовые переходы подземных вод в твердую фазу и обратно увеличивают трещиноватость и эффективную пористость горных пород, повышая тем самым их фильтрационные свойства. Особенно интенсивно



Динамика мерзлотно-гидрологической обстановки вблизи сквозного подруслового талика в разные климатические периоды:

1 – многолетнемерзлые породы и направленность смещения их фазовых границ;
2 – водоносные породы; 3 – пьезометрический уровень подземных вод; 4 – уровень воды в реке
 H – величина гидростатического напора подмерзлотных вод; m – мощность многолетнемерзлых пород (минимальная мощность – в момент времени 0 и 40 тыс. лет, максимальная – в период 20 тыс. лет)
УПВ – уровень подземных вод; УРВ – уровень речных вод

Dynamics of the permafrost-hydrogeological situation near the through underflow talik in different climatic periods:

1 – permafrost rocks and displacement direction of their phase boundaries; 2 – aquifers;
3 – piezometric level of groundwater; 4 – water level in the river

H – value of the subpermafrost water hydrostatic head; m – permafrost rock thickness
(minimum thickness – at the time points of 0 and 40 thousand years,
maximum thickness – in the period of 20 thousand years)

УПВ – groundwater level; УРВ – river level

криогенная деструкция горных пород протекает в верхних слоях разреза криолитозоны, где имеют место сезонные переходы жидкой фазы воды в твердую и обратно. При этом широкое развитие морозобойной трещиноватости горных пород способствует формированию своеобразного полигонально-локализованного типа питания и стока надмерзлотных вод деятельного слоя, что значительно усиливает условия их водообмена с поверхностными водами [13, 14].

В средних и нижних частях разреза криолитозоны также отмечается развитие криогенной деструкции горных пород, что приводит к возникновению зон их вторичной трещиноватости (криогенной дезинтеграции). Периодическая пульсация нижней границы многолетнемерзлой толщи и плановых размеров сквозных таликов вызывает формирование на контакте талых и мерзлых горных пород сильнообводненных зон, способствующих усилению водообмена в гидрологических структурах



криолитозоны и улучшению взаимосвязи подмерзлотных вод с поверхностными водами [15–20].

Заключение

В данной работе ориентированно оценена водообменная роль только процессов промерзания водонасыщенных и протаивания льдонасыщенных горных пород криолитозоны. Однако определенную водообменную функцию выполняют и другие фазовые переходы воды, протекающие в условиях криолитозоны. Имеющиеся результаты исследований свидетельствуют о том, что такие фазовые переходы воды, как процессы десублимации (абляции), испарения и конденсации

протекают в условиях криолитозоны достаточно интенсивно. Так, по данным водобалансовых наблюдений, проведенных в Центральной Якутии, в деятельном слое, сложенном разнозернистым песком, в зимний период может аккумулироваться в виде десублимационного льда около 40–60 мм влаги [4]. В подмерзлотной зоне процессы десублимационного льдообразования возможны в тех случаях, когда уровень безнапорных подземных вод залегает ниже подошвы многолетнемерзлой толщи. Подобные условия встречаются в некоторых высокогорных гидрогеологических массивах и адиомассивах криолитозоны. Это указывает на необходимость и важность дальнейшего более углубленного изучения водообменной роли криолитозоны.

Список литературы

1. Алексеев В.Р. Вода и лед в криосфере Земли // Фундаментальные проблемы изучения и использования воды и водных ресурсов: материалы Междунар. науч. конф. Иркутск: Изд-во ИГ СО РАН, 2005. С. 4–7.
2. Втюрин Б.И. Подземные льды СССР. М.: Наука, 1975. 215 с.
3. Котляков В.М. Избранные сочинения. В 6 кн. Кн. 5. В мире снега и льда. М.: Наука, 2002. 384 с.
4. Шепелёв В.В. Надмерзлотные воды криолитозоны. Новосибирск: Гео, 2011. 169 с.
5. Фотиев С.М. Современные представления об эволюции криогенной области Западной и Восточной Сибири в плейстоцене и голоцене (Сообщение 1) // Криосфера Земли. 2005. Т. IX. № 2. С. 3–22.
6. Зубаков В.А. Глобальные климатические события плейстоцена. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 280 с.
7. Шполянская Н.А. Климатические ритмы и динамика криолитозоны (анализ эволюции в прошлом и прогноз изменений в будущем) // Криосфера Земли. 2001. Т. V. № 1. С. 3–14.
8. Дучков А.Д., Балобаев В.Т. Эволюция теплового и фазового состояния криолитозоны Сибири // Глобальные изменения природной среды / гл. ред. Н.Л. Добречев, В.И. Коваленко. Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2001. С. 77–104.
9. Борзенкова И.И. История оледенения Арктического бассейна: взгляд из прошлого для оценки возможных изменений в будущем // Лёд и снег. 2016. Т. 56. № 2. С. 221–234.
10. Шполянская Н.А. Плейстоцен-голоценовая история развития криолитозоны Российской Арктики «глазами» подземных льдов. Москва – Ижевск: Изд-во Института компьютерных исследований, 2015. 344 с.
11. Шепелёв В.В. О схеме круговорота природных вод // Доклады IV Всерос. гидрологического съезда. Секция 3. Ч. II. М.: Метеоагентство Росгидромета, 2008. С. 72–76.
12. Балобаев В.Т. Гидродинамические процессы формирования подмерзлотных вод // Подземные воды Центральной Якутии и перспективы их использования / отв. ред. Н.П. Анисимова. Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2003. С. 51–67.
13. Алексеев С.В. Криогидрогеологические системы Якутской алмазоносной провинции. Новосибирск: Гео, 2009. 319 с.
14. Фотиев С.М. Криогенный метаморфизм пород и подземных вод (условия и результаты). Новосибирск: Гео, 2009. 279 с.
15. Шепелёв В.В. К понятию о криолитосфере Земли. Якутск: Изд-во ИМЗ СО РАН, 1997. 72 с.
16. Алексеев С.В. Криогенез подземных вод и горных пород (на примере Далдыно-Алакитского района Западной Якутии). Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. 119 с.
17. Шепелёв В.В., Бойцов А.В., Оберман Н.Г., Петченко М.Ф., Анисимова Н.П., Какунов Н.Б. [и др.]. Мониторинг подземных вод криолитозоны. Якутск: Изд-во ИМЗ СО РАН, 2002. 172 с.
18. Анисимова Н.П., Павлова Н.А. Гидрогеохимические исследования криолитозоны Центральной Якутии. Новосибирск: Гео, 2014. 189 с.
19. Shepelev V.V. Research in the relationship between freezing rock layers and groundwater in cold regions // Heilongjiang Water Resources. 2016. Vol. 2. Iss. 1. P. 10–18.
20. Алексеева Л.П., Алексеев С.В. Геохимия подземных льдов, соленых вод и рассолов Западной Якутии. Новосибирск: Гео, 2019. 214 с.



References

1. Alekseev VR. Water and ice in the Earth's cryosphere. In: *Fundamental'nye problemy izucheniya i ispol'zovaniya vody i vodnykh resursov: materialy Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii = Fundamental problems of water and water resources study and use: Proceedings of the international scientific conference*. Irkutsk: V.B. Sochava Institute of Geography, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2005. p.4–7. (In Russ.)
2. Vtyurin BI. *Underground ice of the USSR*. Moscow: Nauka; 1975. 215 p. (In Russ.)
3. Kotlyakov VM. Selected works. In 6 books. Book 5. *In the world of snow and ice*. Moscow: Nauka; 2002. 384 p. (In Russ.)
4. Shepelev VV. *Suprapermafrost waters in the cryolithozone*. Novosibirsk: Geo; 2011. 169 p. (In Russ.)
5. Fotiev SM. Modern conceptions of the evolution of cryogenic area of West and East Siberia in Pleistocene and Holocene (Report 1). *Kriosfera Zemli = Earth's Cryosphere*. 2005;9(2):3–22. (In Russ.)
6. Zubakov VA. *Global climate events of the Pleistocene*. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1986. 280 p. (In Russ.)
7. Shpolyanskaya NA. Climatic cycles and dynamics of the cryolithozone (analysis of the evolution in the past and prediction of changes in the future). *Kriosfera Zemli = Earth's Cryosphere*. 2001;5(1):3–14. (In Russ.)
8. Duchkov AD, Balobaev VT. Evolution of thermal and phase state of Siberian permafrost. In: Dobretsov NL, Kovalenko VI (eds.). *Global'nye izmeneniya prirodnoi sredy = Global changes of environment*. Novosibirsk: Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Geo; 2001. p.77–104. (In Russ.)
9. Borzenkova II. History of sea ice in the Arctic basin: lessons from the past for future. *Led i sneg = Ice and Snow*. 2016;56(2):221–234. (In Russ.)
10. Shpolyanskaya NA. *Pleistocene-Holocene history of cryolithozone development in the Russian Arctic "through the eyes" of underground ice*. Moskva – Izhevsk: Institute of Computer Sciences; 2015. 344 p. (In Russ.)
11. Shepelev VV. On circulation pattern of natural water. In: *Doklady IV Vserossiiskogo gidrologicheskogo s"ezda = Reports of the 4th All-Russian Hydrological Congress*. Section 3. Part 2. Moscow: Meteo Agency of the Russian Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring; 2008. p.72–76. (In Russ.)
12. Balobaev VT. Hydrodynamic processes of superpermafrost water formation. In: Anisimova NP (ed.). *Podzemnye vody Tsentral'nogo Yakutii i perspektivny ikh ispol'zovaniya = Groundwaters in Central Yakutia and prospects of their use*. Novosibirsk: Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Geo; 2003. p.51–67. (In Russ.)
13. Alekseev SV. *Cryohydrogeological systems of the Yakutian diamond-bearing province*. Novosibirsk: Geo; 2009. 319 p. (In Russ.)
14. Fotiev SM. *Cryogenic metamorphism of rocks and underground waters (conditions and results)*. Novosibirsk: Geo; 2009. 279 p. (In Russ.)
15. Shepelev VV. *To the concept of the Earth's cryolithosphere*. Yakutsk: Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 1997. 72 p. (In Russ.)
16. Alekseev SV. *The cryogenesis of groundwaters and rocks (an example of the Daldyn-Alakit region of Western Yakutia)*. Novosibirsk: Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2000. 119 p. (In Russ.)
17. Shepelev VV, Boitsov AV, Oberman NG, Petchenko MF, Anisimova NP, Kakunov NB, et al. *Permafrost groundwater monitoring*. Yakutsk: Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2002. 172 p. (In Russ.)
18. Anisimova NP, Pavlova NA. *Hydrogeochemical studies of permafrost in Central Yakutia*. Novosibirsk: Geo; 2014. 189 p. (In Russ.)
19. Shepelev VV. Research in the relationship between freezing rock layers and groundwater in cold regions. *Heilongjiang Water Resources*. 2016;2(1):10–18.
20. Alekseeva LP, Alekseev SV. *Geochemistry of ground ice, saline water and brines in Western Yakutia*. Novosibirsk: Geo; 2019. 214 p. (In Russ.)

Сведения об авторе / Information about the author



Шепелёв Виктор Васильевич,

доктор геолого-минералогических наук, профессор,
академик Академии наук Республики Саха (Якутия),
главный научный сотрудник Лаборатории подземных вод и геохимии криолитозоны,
Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН,
677010, г. Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Россия,

✉ e-mail: sheply@mpi.ysn.ru
ORCID: 0000-0003-3434-6969

Viktor V. Shepelev,

Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Professor,
Academician of the Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia),
Chief Researcher of the Laboratory of Permafrost Groundwater and Geochemistry,
Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
36 Merzlotnaya St., Yakutsk 677010, Russia,

✉ e-mail: sheply@mpi.ysn.ru
ORCID: 0000-0003-3434-6969

**Заявленный вклад автора / Contribution of the author**

Автор выполнил исследовательскую работу, на основании полученных результатов провел обобщение, подготовил рукопись к печати.

The author performed the research, made a generalization on the basis of the results obtained and prepared the copyright for publication.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.
The author declares no conflicts of interests.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.
The final manuscript has been read and approved by the author.

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 05.03.2021; одобрена после рецензирования 09.04.2021; принята к публикации 13.05.2021.

The article was submitted 05.03.2021; approved after reviewing 09.04.2021; accepted for publication 13.05.2021.



Уважаемые авторы!

Требования к оформлению научных статей, изложенные ниже, разработаны редакцией журнала для того, чтобы помочь Вам предоставить все необходимые для публикации сведения и избежать наиболее распространенных ошибок.

1. Научный журнал «Науки о Земле и недропользование» принимает к публикации научные материалы в виде статей по следующим тематикам:

- геологическое строение месторождений полезных ископаемых;
- тектоника месторождений, рудных узлов, районов;
- минералогия и геохимия месторождений полезных ископаемых;
- генетические проблемы формирования месторождений полезных ископаемых и других геологических объектов;
- минерагения (металлогения): рудные зоны, районы, пояса, металлогенические карты;
- методы и методики поисков и разведки месторождений полезных ископаемых;
- экономическая оценка месторождений полезных ископаемых, правовые основы недропользования;
- физико-геологические модели месторождений полезных ископаемых;
- геоинформационные технологии в науках о Земле;
- технология и техника горно-буровых работ;
- технология и техника разработки месторождений полезных ископаемых;
- технология обогащения и переработки минерального сырья;
- геммология и технология художественной обработки минералов и горных пород;
- гидрогеология и инженерная геология;
- безопасность жизнедеятельности в горно-геологической отрасли;
- геоэкология.

2. Приоритетными для публикации являются статьи в области междисциплинарных и мультидисциплинарных исследований, а также результаты работ с использованием цифровых технологий.

3. Статьи принимаются на русском, английском, китайском и монгольском языках от авторов, работающих в российских и иностранных вузах, академических и отраслевых научно-исследовательских институтах, а также производственных горно-геологических организаций.

4. Статья сопровождается:

- электронными версиями всех документов (скан), в том числе:
авторского заявления, заполненного и подписанного всеми соавторами статьи;
авторского договора;
акта экспертного заключения о возможности открытой публикации материалов;
сведений обо всех авторах на русском и английском языках с указанием названия вуза, организации, учреждения, должности и структурного подразделения, наличия ученой степени, ученого звания, почтового и электронного адресов каждого автора статьи;
- цветными портретными фотографиями авторов на светлом фоне (деловой стиль) в хорошем качестве в формате *.JPEG;

– по желанию автора в статье могут быть указаны его профили в системах цитирования и другие сведения (профили в РИНЦ, ORCID, Scopus, в других системах цитирования, можно предоставить ссылку на личную страницу в Интернете, включая страницы в социальных сетях).

Обращаем Ваше внимание, что вся перечисленная выше информация публикуется в журнале в открытом доступе!

5. Статьи принимаются ответственным секретарем в электронном виде в формате Microsoft Word для Windows по электронной почте nzn@istu.edu. Шрифт – Times New Roman, размер шрифта – 12 (строки через 1 интервал), перенос слов – автоматический. Параметры страницы:



отступы сверху и снизу – 2,5 см, слева и справа – 2 см, абзацный отступ – 0,6 см, ориентация страницы – книжная.

6. Объем текста – от 10000 знаков, включая пробелы, иллюстрационный материал – до 6 рисунков.

7. Статьи должны быть структурированы и выполнены по международному стандарту IMRAD. Структура статьи: индекс УДК, название статьи, фамилия, имя, отчество авторов, название учреждения, где выполнена работа, аннотация и ключевые слова на языке оригинала (русском / китайском / монгольском) и английском языках, введение, цель исследования, материал и методы исследования, результаты исследования и их обсуждение, выводы или заключение, библиографический список и references, критерии авторства, конфликт интересов и сведения об авторах (вся информация предоставляется одним файлом, названным следующим образом: *Фамилия первого автора – Первые три-четыре слова названия.doc*).

8. Рекомендуемая длина названия статьи – до 100 знаков с пробелами. Название статьи должно быть лишено сокращений, аббревиатур, описывать содержание статьи точно и конкретно, при этом оно должно быть достаточно длинным, чтобы однозначно выразить главную идею статьи, и коротким настолько, чтобы ни одно слово нельзя было выбросить без потери смысла.

9. Аннотация должна отражать основную идею статьи, поскольку для большинства читателей она является главным источником информации о представленном исследовании. Объем аннотации – 1500–2000 знаков, примерная структура: цель, методы, предмет, объект и результаты исследования, выводы. Не следует ссылаться на таблицы и / или рисунки, приведенные в основном в тексте статьи, а также использованную литературу, поскольку аннотации также публикуются отдельно от статьи. Не используйте в аннотации сокращения, аббревиатуры, а также формулы, так как аннотации в большинстве баз данных, начиная с РИНЦ, публикуются в формате, исключающем отображение формул.

Ключевые слова должны отражать суть исследования, способствовать работе поисковых систем, по количеству не превышать 10 единиц, словосочетания – не более 3 единиц.

10. Формулы в тексте должны быть набраны в специальном редакторе формул. Все экспликации элементов формул необходимо также выполнять в редакторе формул.

11. Таблицы должны содержать только необходимые данные и представлять собой обобщенные и статистически обработанные материалы с указанием обозначения переменных. Каждая таблица снабжается заголовком. Формат таблиц – книжный, направление шрифта – по горизонтали.

12. Графические материалы к статье (рисунки и фотографии) представляются в минимальном количестве (не более 6 единиц) и должны быть выполнены в соответствии с требованиями к геологической графике. Выбирается масштаб, пригодный для тиражирования, а размер – не более 170×245 мм. Графические материалы должны допускать перемещение в тексте и возможность изменения размеров. Каждый рисунок сопровождается надписями в содержательной части и подрисуночной подписью, в которой представляется объяснение всех его элементов. Названия рисунков и подрисуночные подписи должны быть максимально краткие, основная информация предоставляется в тексте.

13. Ссылки на литературные источники приводятся в квадратных скобках в порядке возрастания. Библиографический список формируется по мере упоминания источников в тексте. Рекомендуемое количество источников в библиографическом списке – не менее 20, из них не менее 5 ссылок на статьи из иностранных журналов. При этом самоцитирование автора не должно превышать 25 % от общего количества источников и полностью исключается самоцитирование журнала. Не допускаются ссылки на законы, государственные стандарты, положения, диссертации и авторефераты, учебники и учебные пособия, справочники, словари и энциклопедии, а также геологические карты. При необходимости обращения к этим источникам ссылку на них следует размещать в подстрочной сноске. Редакционная коллегия рекомендует в списке



литературы ссылаться на статьи из журналов, входящих в международные базы данных по глобальным индексам цитирования (Scopus, Web of Science и другие).

14. Список литературы составляется в двух вариантах. В библиографическом описании статьи необходимо указывать всех авторов. Первый вариант (библиографический список) оформляется на языке источника в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5 2008. Второй вариант (references) оформляется в виде транслитерации русского текста в латиницу с переводом на английский язык и служит для отслеживания цитируемости авторов. Примеры оформления источников в списках можно посмотреть на нашем сайте в разделе «Требования к статьям».

15. При подаче статьи авторами предоставляются на английском языке следующие элементы работы: название статьи, сведения об авторах, аннотация, ключевые слова, благодарности, названия таблиц и подрисуночные подписи, библиография.

16. Авторы статей должны придерживаться обязанностей, предусмотренных «Редакционной политикой журнала».

17. Редакция оставляет за собой право отклонять статьи, не отвечающие указанным требованиям. Поступающие в редакцию материалы возврату не подлежат.

18. Редакция оставляет за собой право на научное и литературное редактирование статей с последующим согласованием с авторами.

19. Представленные статьи проходят проверку на наличие заимствований.

20. Журнал выпускается с периодичностью 4 номера в год.

Внимание! Публикация статей является бесплатной.

Мы приглашаем Вас к участию в нашем проекте в качестве авторов, рекламодателей и читателей.

По вопросам публикации обращаться по адресу: 664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Иркутский национальный исследовательский технический университет, редколлегия, ауд. Е-317.

Главный редактор Лобацкая Раиса Моисеевна, тел.: +7 (3952) 405115, e-mail: lobatskaya@gmail.com

Заместитель главного редактора Аузина Лариса Ивановна, тел.: +7 (3952) 405108, e-mail: lauzina@mail.ru

Заместитель главного редактора Красноштанов Сергей Юрьевич, тел.: +7 (3952) 405101, e-mail: geo_info@istu.edu

Статьи следует направлять через личный кабинет на сайте www.nznj.ru или ответственному секретарю Храмовских Виталию Александровичу по электронной почте nzn@istu.edu; тел.: +7 (3952) 405069, адрес: 664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, ауд. Ж-04.



Образец оформления статьи

УДК 549.09

Минералого-технологические типы руд Томинского месторождения меди (Южный Урал)

© Е.М. Курчевская^a, М.В. Яхно^b, А.Е. Сенченко^c

^{a,c}НИИПИ «Технологии обогащения минерального сырья», г. Иркутск, Россия

^bИркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме: Цель. Цель данного исследования заключается в изучении технологических типов руд Томинского месторождения меди, а также минерального состава вмещающих пород и руд каждого из трех типов, выявлении минералогических и структурно-текстурных особенностей руд, выявлении взаимосвязи изменения рудной минерализации и степени метаморфизма для каждого типа руд. **Методы.** Рудные тела Томинского медно-порфирового месторождения, залегающие в диоритах и кварцевых диоритах, представляют собой прожилковые и прожилково-вкрапленные скопления в зонах дробления. На месторождении широко развиты метасоматиты кварц-серicitовой формации. Изучение типов руд проводилось с использованием микроскопов. **Результаты.** В результате выделено три геолого-технологических типа руд в пределах Томинского месторождения. Первый тип представлен первичными сульфидными рудами, которые наблюдаются в среднем ниже глубины 50–55 м. По составу это хлорит-мусковит-кварцевые метасоматиты. Вмещающие породы представлены серицитизированными, хлоритизированными и карбонатизированными диоритами. В составе руд преобладают халькопирит и пирит. Практически вся медь содержится в халькопирите. Второй тип – это рудные зоны вторичного сульфидного обогащения. Этот тип сложен первичными и вторичными сульфидами меди. Все породы аргиллизированные и представлены метасоматитами различного состава. Все виды пород несут в себе рудную минерализацию. К третьему типу относятся окисленные руды, которые образуют зону окисления месторождения. Они делятся на три подтипа: глинистые, глинисто-щебнистые и щебнистые руды. Глинистые руды залегают в самых верхних частях коры выветривания, глинисто-щебнистые руды слагают центральную ее часть, а руды в щебнистых образованиях отмечены в нижних горизонтах. Представлено петрографическое описание каждого из типов. Выявлены минералогические и структурно-текстурные особенности руд. В результате изучения петрографического состава каждого типа руд установлена различная степень метаморфизма и вследствие этого – изменение рудной минерализации. **Выводы.** Прослеживается влияние метасоматических процессов, изменивших строение и минеральный состав руд. Для первого типа руды характерно наличие первичных пород – диоритов с насыщенной сульфидной вкрапленностью и с незначительными метасоматическими изменениями. В зоне вторичного обогащения породы претерпели интенсивное метасоматическое изменение. Породы этой зоны насыщены гидроксидами железа. Для зоны интенсивного выветривания характерны глинистые и хлоритизированные породы. Рудная минерализация представлена исключительно окисленными минералами. Сульфиды единичны. Различия в минеральном составе трех типов руд влияют на выбор способов переработки руды в пределах Томинского месторождения.

Ключевые слова: Томинское месторождение, медно-порфиральное оруденение, метаморфизм, технологические типы руд

Благодарности:

Mineralogical and technological types of Tominskoye deposit copper ores (Southern Ural)

© Elena M. Kurchevskaya^a, Marina V. Yakhno^b, Arkady Y. Senchenko^c

^{a,c}NIPI TOMS (Scientific Research and Design Institute “Technologies of Minerals Separation”), Irkutsk, Russia

^bIrkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract: Purpose. The purpose of the article is investigation of the technological types of Tominskoe copper deposit ores; examination of the mineral composition of the host rocks and ores of each of the three types; identification of mineralogical and structural-textural features of ores, research of the relationship of mineralization and metamorphism intensity alteration for each type of ore. **Methods.** Ore bodies of the Tominskoye porphyry copper deposit occurring in the diorites and quartz diorites are veinlet and porphyry-stringer clusters in crush zones. The deposit is characterized with the predominant metasomatic rocks of quartz-sericite formation. **Results.** Three geological and technological ore types are distinguished within the Tominskoye field. The first type is represented by primary sulfide ores, which occur on average lower than 50–55 m depth. By composition they are chlorite-muscovite-quartz metasomatic rocks. The host rocks are repre-



sented by sericitized, chloritized and carbonated diorites. Chalcopyrite and pyrite are predominant elements in ore composition. Chalcopyrite contains carbonated diorites. Chalcopyrite and pyrite are predominant elements in ore composition. Chalcopyrite contains almost all of the copper. The second type includes the ore zones of secondary sulfide concentration. This type is composed of primary and secondary copper sulfides. All the rocks are dirty argillaceous and are represented by metasomatic rocks of different composition. All types of rocks feature ore mineralization. The third type covers oxidized ores, which form the oxidation zone of the deposit. They are divided into three subtypes: clay, claydetrital and detrital ores. Clay ores occur in the uppermost parts of the crust of weathering. Clay-detrital ores compose its central part, while ores in detrital formations have been found in the lower horizons. Each of the type is given a petrographic description. Mineralogical and structural-textural features of ores are identified. The study of the petrographic composition of each type of ores showed a varying degree of metamorphism that resulted in changes in ore mineralization. **Conclusions.** The influence of metasomatic processes is indicated. The last have changed the structure and mineral composition of ores. The presence of primary rocks – diorites with saturated sulfide impregnation and insignificant metasomatic alterations is typical for the first type of ore. The rocks in the zone of secondary concentration have undergone intense metasomatic alteration. These rocks are saturated with iron hydroxides. The presence of clay and chloritized rocks characterize the zone of intense weathering. Ore mineralization is represented exclusively by oxidized minerals. Sulfides are rare. Variations in the mineral composition of the three types of ores influence the choice of ore processing methods at Tominskoye ore deposit.

Keywords: Tominskoye field, porphyry copper mineralization, metamorphism, technological ore types

Acknowledgements:

Далее идут **текст статьи** (в виде: введение, цель исследования, материалы и методы исследования, результаты исследования и их обсуждение, заключение), **список литературы** (references), **заявленный вклад авторов** (contribution of the authors) и **конфликт интересов** (conflict of interests).

Сведения об авторах / Information about the authors

Фото
автора

Курчевская Елена Михайловна,
старший научный сотрудник,
НИИПИ «Технологии обогащения минерального сырья»,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83а, Россия,
e-mail: kurchevskaya@tomsgroup.ru

Elena M. Kurchevskaya,
Senior Researcher,
Scientific Research and Design Institute “Technologies of Minerals Separation”,
83a Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
e-mail: kurchevskaya@tomsgroup.ru

Фото
автора

Яхно Марина Владиславовна,
старший преподаватель кафедры геологии и геохимии полезных ископаемых,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
✉ e-mail: ymar@istu.edu

Marina V. Yakhno,
Senior Lecturer of the Department of Geology and Geochemistry of Minerals,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
✉ e-mail: ymar@istu.edu

Фото
автора

Сенченко Аркадий Евгеньевич,
генеральный директор,
НИИПИ «Технологии обогащения минерального сырья»,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83а, Россия,
e-mail: senchenko@tomsgroup.ru

Arkady E. Senchenko,
CEO,
Scientific Research and Design Institute “Technologies of Minerals Separation”,
83a Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
e-mail: senchenko@tomsgroup.ru

НАУКИ О ЗЕМЛЕ И НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

12+

Научный журнал

Том 44 № 2 (75) 2021

Дизайнер А.А. Хохряков
Редактор Ф.А. Посысоева
Перевод на английский язык В.В. Батицкой
Компьютерная верстка Ф.А. Посысоевой

Издание распространяется бесплатно

Выход в свет 15.06.2021 г. Формат 60×90/8.
Бумага офсетная. Печать цифровая. Усл. печ. л. 13,75.
Тираж 500 экз. Зак. 99. Поз. плана 4н.

Отпечатано в типографии Издательства
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный
исследовательский технический университет»,
адрес типографии: 664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

Адрес редакции, учредителя и издателя:
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный
исследовательский технический университет»,
664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83