



Оригинальная статья / Original article

УДК 553.98

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2686-9993-2019-42-4-487-494>

Природный резервуар как геологическое тело для хранения запасов гелия

© Л.А. Рапацкая^a, М.Е. Тонких^b

^{a,b}Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме: В связи с началом эксплуатации крупных нефтегазоносных гелийсодержащих месторождений на юге Сибирской платформы возникает проблема долгосрочного хранения гелия. Некоторыми исследователями с этой целью предлагается использование надежных подземных хранилищ. Таким естественным хранилищем для закачки и сохранения запасов гелия могут служить природные резервуары – геологические тела, представляющие собой ассоциацию горных пород, в которой могут содержаться и циркулировать флюиды. Поэтому особо важное значение приобретает наличие соленосных отложений в природных резервуарах, способных удерживать гелий в течение длительного времени. Для определения палеофациальных условий накопления соленосных флюидоупоров были использованы фондовые и опубликованные материалы по бурению и геофизическим исследованиям месторождений Восточной Сибири. В статье изложены результаты исследований, характеризующие литологический состав, мощности и условия формирования покрышек как региональных флюидоупоров в природных резервуарах на юге Сибирской платформы. Таким региональным флюидоупором могут служить отложения усольской свиты нижнего кембрия, входящей в венд-кембрийский нефтегазоносный комплекс.

Ключевые слова: гелий, флюидоупор, подземное хранилище, Сибирская платформа

Информация о статье: Дата поступления 6 ноября 2019 г.; дата принятия к печати 5 декабря 2019 г.; дата онлайн-размещения 30 декабря 2019 г.

Для цитирования: Рапацкая Л.А., Тонких М.Е. Природный резервуар как геологическое тело для хранения запасов гелия. *Науки о Земле и недропользование*. 2019. Т. 42. № 4. С. 487–494. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2019-42-4-487-494>

Geological reservoir as a natural storage facility for helium reserves

© Larisa A. Rapatskaya^a, Marina E. Tonkikh^b

^{a,b}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract: With the start of the large helium-rich petroleum deposits exploitation in the Siberian platform south, a problem of long-term helium storage arises. Some researchers propose to use reliable underground storage facilities for this purpose. Geological bodies such as rock associations can be used as natural reservoirs for injecting and storing the helium reserves. The saliferous sediments within the natural reservoirs are of particular importance due to their capacity to keep helium for a long time. To determine the paleofacial conditions for the accumulation of the saliferous impermeable layers, the archive and published data on drilling and geophysical studies of the Eastern Siberia fields have been used. The article presents the research results on the cap rocks' lithological composition and thickness, as well as on the conditions of their formation as areal impermeable beds within the natural reservoirs of the Siberian platform south. The Lower Cambrian deposits of the Usolie suite, a part of the Vendian-Cambrian oil-and-gas complex, can be considered as an areal impermeable bed of this kind.

Keywords: helium, impermeable bed, underground storage, Siberian platform

Information about the article: Received November 6, 2019; accepted for publication December 5, 2019; available online December 30, 2019.

For citation: Rapatskaya LA, Tonkikh ME. Geological reservoir as a natural storage facility for helium reserves. *Earth sciences and subsoil use*. 2019;42(4):487–494. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2019-42-4-487-494>



Введение

В настоящее время основные мировые ресурсы и запасы гелия сосредоточены в Соединенных Штатах Америки, Алжире, России и Катаре. Степень концентрации гелия на месторождениях Восточной Сибири и Республики Саха (Якутия) дает России значительные преимущества перед другими странами на мировом рынке этого ценного ресурса. Однако для поддержания долгосрочных экономических интересов необходимы технологии аккумулирования больших объемов гелия в Восточной Сибири.

Подземная технология хранения впервые нашла решение в Соединенных Штатах Америки во второй половине XX века. С 1973 г. газогелиевое месторождение Клиффсайд стало использоваться исключительно как объект для хранения и продажи гелиевого концентрата¹. В России такая технология хранения была применена в 1979 г. в Оренбургской области. Здесь для хранения гелиевого концентрата использовались подземные выработки в пластах каменной соли [1].

Уникальные по масштабам и условиям локализации соляные флюидоупоры усольской свиты могут решить проблему аккумуляции гелиевого концентрата в Восточной Сибири [2–4].

Анализ структурно-литологических особенностей состава природных резервуаров как геологических тел, изучение палеофациальных условий накопления соленосных флюидоупоров позволяют

рассматривать их в качестве объектов хранения гелиевого концентрата.

Материалы и методы исследования

В данной статье приведены результаты научно-исследовательской работы по определению структурно-литологических особенностей состава природных резервуаров как геологических тел на месторождениях Ангаро-Ленской нефтегазоносной провинции в пределах Байkitской, Катангской и Непско-Ботуобинской нефтегазоносных областей. Для определения палеофациальных условий накопления соленосных флюидоупоров были использованы фондовые и опубликованные материалы по бурению и геофизическим исследованиям Юрубчено-Тохомского, Чаяндинского нефтегазоконденсатных, Ковыктинского газоконденсатного и других месторождений.

Результаты исследования и их анализ

Гелий широко используется в высокотехнологичных производствах: авиации, космонавтики, медицине, металлургии и в целом ряде других сфер промышленного и научного производства [5]. Эксперты консалтинговой компании Ernst & Young, проводившие в 2012 г. исследование перспектив добычи и производства гелия в России, пришли к однозначному выводу: развитие технологий будет сопровождаться ростом спроса на этот инертный газ [6]. По их оценкам, к 2030 г. он, в зависимости от ряда факторов, может достичь 200–330 млн м³ (рис. 1).

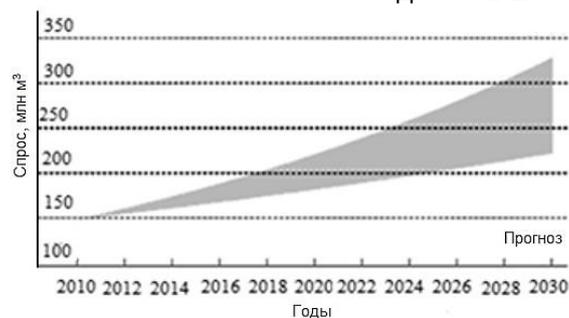


Рис. 1. Мировой спрос на гелий
Fig. 1. World demand for helium

¹ Hamak J.E., Gage B.D. Helium resources of the United States, 1991. Information Circular 9342 / U.S. Department of the Interior, Bureau of Mines. 1993. 18 p.



Восточно-Сибирские регионы газодобычи расположены в Красноярском крае, Иркутской области и юго-западной части Республики Саха (Якутия). На сегодняшний день здесь открыто 31 месторождение, содержащее гелий в различных концентрациях. Общие разведанные запасы гелия и его содержание на разных месторождениях приведены в таблице.

Из приведенных данных видно, что запасы одного Ковыктинского месторождения по гелию многократно превышают спрос не только на российском, но и на мировом рынке. В связи с этим стоит острая необходимость по отработке технологий хранения гелия. Одним из методов сохранения излишков газа является закачка его под землю в естественные хранилища – природные резервуары.

Под термином «природный резервуар» понимается «геологическое тело или система, представляющая собой ассоциацию горных пород, ограниченную практически непроницаемыми породами, в которой могут содержаться и циркулировать флюиды». Непроницаемые породы – флюидоупоры – обеспечивают сохранность нефтяных и газовых залежей и природное состояние пластовой гетерофазной углеводородной системы: пластовое давление на уровне газонефтяного, газоводяного, водонефтяного

контактов, давление начала конденсации и др. [7].

Крайне важное значение в процессе онтогенеза и сохранения углеводородов имеет характер генетических типов природных резервуаров, которым присущ определенный набор литогенетических комплексов пород. В объеме рифей-венд-кембрийского осадочного бассейна юга Сибирской платформы О.В. Постниковой выделено несколько уровней развития природных резервуаров, распределение которых по латерали и вертикали, генетический тип, а также особенности строения обуславливаются принадлежностью к определенным геодинамическим и палеогеографическим зонам палеобассейнов [8].

Особый интерес для наших исследований с выделением структурных и литологических особенностей представляет венд-кембрийский резервуар с региональным флюидоупором – усольской свитой. Известно, что основные продуктивные горизонты на месторождениях углеводородов Сибирской платформы приурочены к нефтегазоносным комплексам рифей-венда и венд-кембрия [9, 10]. Состав пород усольской (аналог – юрегинская) свиты, наличие в ней мощных соляных толщ определяет ее экранирующие свойства и позволяет ей служить самым

Главнейшие газогелиевые месторождения Восточной Сибири на 2009 г. The most important gas-helium deposits in Eastern Siberia (2009)

Месторождение, его тип	Запасы гелия, млрд м ³		Основной химический состав газа, %			
	ABC ₁	C ₂	He	CH ₄	Т.у.*	N ₂
Красноярский край						
Собинское НГК	0,8	0,1	0,576	67,5	6,4	25,26
Юрубчено-Тохомское НГК	0,3	0,5	0,183	83	8,4	7,8
Иркутская область						
Дулисьминское НГК	0,18	0,04	0,26	84,1	6,8	6,8
Ковыктинское ГК	3,88	1,2	0,276	92,3	5,7	1,5
Республика Саха (Якутия)						
Верхневилючанское НГ	0,18	0,1	0,13	84,5	7,5	7,46
Среднеботуобинское НГК	0,75	0,04	0,67	83,8	6,9	8
Чаяндинское НГК	1,85	5,3	0,63	85,6	6,4	8,2

Примечание: Т.у. – технические условия.

Note: Т.у. – technical specifications.



надежным флюидоупором, который обеспечивает сохранность запасов гелия. Каменная соль характеризуется малой пористостью, пластичностью, высокой плотностью, низкой гидравлической проводимостью, а также низким коэффициентом диффузии гелия [11]. В изображенных на рис. 2. схематизированных разрезах усольской (юрегинской) свиты, входящей в состав солевого (галогенно-карбонатного) комплекса осадочного чехла Сибирской платформы, на отдельных месторождениях углеводородов отражены особенности состава и мощности отложений.

Усольская свита и ее аналоги распространены почти на всей территории юга Сибирской платформы. Мощность ее на месторождениях варьирует от 160 до 1000 м, что объясняется соляной тектоникой и пластичностью солей, способных формировать соляные кепроки.

Среди литотипов усольской свиты наиболее широко распространены каменная соль, обломочные доломиты, тонкослойчатые породы смешанного алеврит-ангидрит-глинисто-доломитового состава. К второстепенным литотипам относятся тонкокристаллические известняки и доломиты без признаков обломоч-

ного строения (эвапоритовые карбонатные породы), интракластовые брекчии взламывания, линзовидные скопления битой ракушки, тонкокристаллические и мелкообломочные ангидриты, строматолитовые известняки и доломиты, редкие силициты. Типичными межсолевыми отложениями являются тонко-, мелкообломочные доломиты и известняки, по распространенности в общем объеме приближающиеся к солям [12, 13].

Однообразный состав и большая амплитуда в изменении мощностей вполне объяснимы положением Сибирской платформы в позднем протерозое – раннем палеозое. Необходимо отметить присутствие редких генетических типов осадков, исключительно важных для восстановления характера осадконакопления – интракластового, брекчий взламывания, слабоуплотненных взмученных илов, маломощных прослоев строматолитовых известняков и доломитов. Такой состав и особенности отложений свидетельствуют о сравнительно мелководном характере и господстве штормовой седиментации в осадочном бассейне с преобладанием сульфатно-карбонатной эвапоритовой седиментации. Подобные отложения, как правило, относят к

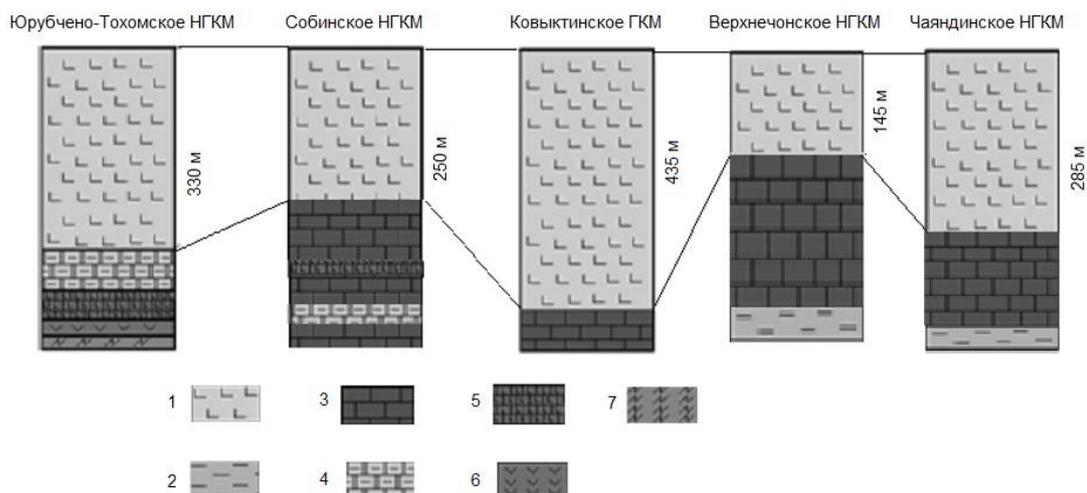


Рис. 2. Схематизированные разрезы усольской (юрегинской) свиты нижнего кембрия на месторождениях нефти и газа юга Сибирской платформы:

1 – соли; 2 – известняки; 3 – доломиты; 4 – доломиты глинистые; 5 – доломиты ангидритистые; 6 – долериты; 7 – доломиты со стилолитовыми швами

Fig. 2. Schematized sections of the Usolie (Yuregin) suite of the Lower Cambrian within the oil-and-gas fields of the Siberian platform south:

1 – salts; 2 – limestones; 3 – dolomites; 4 – clayey dolomites; 5 – anhydrite dolomites; 6 – dolerites; 7 – dolomites with stylolite sutures



турбидитам, порожденным штормами, соответствующим литоральным и супралиторальным фациям [14].

Приведенные данные подтверждаются палеогеографическим положением Сибирской платформы в позднепротерозойское время. Особенности строения и литологического состава разрезов нефтегазоносных структур находят вполне закономерные объяснения, если принять во внимание палеогеографическое положение платформы, установленное с использованием данных палеомагнитных исследований В.Э. Павлова [15]. В первые периоды своего существования Сибирская платформа почти целиком располагалась в зоне низких широт и лишь ее северный (в современных координатах) край был открыт к югу от экватора, то есть в начале своего дрейфа платформа была развернута почти на 180° относительно ее современного положения и сохраняла эту ориентировку (с небольшими вращениями по и против часовой стрелки) вплоть до середины второй половины мезопротерозоя.

Модель кривой магнитных полюсов В.Э. Павлова позволила определить широтное положение Сибирской платформы и ее ориентацию относительно меридиана на протяжении почти двух миллиардов лет, то есть от времени ее образования около 1,9 млрд лет назад до позднего кайнозоя. «Почти все это время она находилась в тропических и субэкваториальных широтах, периодически смещаясь то в южное, то в северное полушарие. Ближе к концу мезопротерозоя ~1100 млн лет платформа испытала значительное перемещение к северу, и ее самый южный (в современных координатах) край оказался в области умеренных широт $\sim 50\text{--}55^\circ$ северного полушария»). Установленные данные о положении Сибирской платформы подтверждаются и характером распределения водорослево-археоциатовых биогермов (строматолитов) в морских соленых бассейнах в зоне низких широт, что отмечено их широким присутствием в разрезах нефтега-

зоносных структур на юге Сибирской платформы в отложениях рифея и венд-кембрия [16]. Палеотемпературы в осадочных бассейнах достигали $25\text{--}56^\circ\text{C}$, что свойственно районам современного эвапоритообразования – бассейнам с повышенной соленостью, находящимся в областях с жарким климатом. Подтверждением этому служат отложения раннекембрийских эвапоритов, сложенные мощными толщами солей, гипсов и доломитов, причем солей так много, что они используются в промышленных целях (Усольское, Тыретское, Троицкое и Канарайское месторождения).

Обсуждение результатов

Восточно-Сибирский венд-кембрийский бассейн вмещает $1,5\text{--}2,5$ млн м^3 солей и является одним из четырех крупнейших соленосных бассейнов-супергигантов [17]. Самым крупным временным максимумом количественного распределения солей является V–Є₂, что находит отражение в площадном распространении этого бассейна и суммарных толщинах пластов каменной соли усольской свиты и ее аналогов. Благоприятные условия, для регионального формирования природных резервуаров – будущих хранилищ – в геологическом прошлом были созданы самой природой. Теперь же необходимо использовать результаты геолого-геофизических исследований для установления герметичности резервуаров, выдержанности по мощности пласта и площади простираения структуры, установить наличие тектонических нарушений в разрезе.

Заключение

Создание подземных хранилищ гелиевого концентрата является одной из важнейших задач освоения месторождений Восточной Сибири. Природные резервуары венд-кембрийского нефтегазоносного комплекса с мощным соленосным флюидоупором – усольской свитой, имеющей региональное распространение на юге Сибирской платформы, стали аккумуляторами для богатейших запасов углеводородов Восточной Сибири. Бла-



годаря своим уникальным структурно-литологическим особенностям, благоприятным палеофациальным условиям фор-

мирования эти геологические тела перспективны и как объекты для хранения запасов гелия.

Библиографический список

1. Хан С.А., Игошин А.И., Теплов М.К., Жиленко Е.А., Бабаян М.А., Пантелеев Д.В. [и др.]. Опыт подземного хранения газообразного гелиевого концентрата на Оренбургском гелиевом заводе // Газовая промышленность. 2012. № 5 (684). С. 28–31.

2. Бондарев В.Л., Чугунов А.В., Саркисова М.А., Бондарев Е.В. Перспективы хранения природного газа, обогащенного гелием, в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке // Вести газовой науки. 2015. № 3 (23) С. 63–67.

3. Коротков С.Б., Франчук А.А., Семёнова Е.В. Галогенные флюидоупоры Ковыктинского кластера газодобычи Иркутской области // Вести газовой науки. 2017. № 3 (31) С. 298–307.

4. Франчук А.А., Коротков С.Б., Семёнова Е.В. Геолого-геофизические характеристики солесодержащих флюидоупоров Сибирской платформы // Вести газовой науки. 2017. № 3 (31). С. 162–171.

5. Leachman W.D. Helium // Bureau of Mines: minerals yearbook. New York, 1989. P. 503–508.

6. Якуцени В.П. Сырьевая база гелия: состояние, перспективы освоения и использования // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2001. № 2. С. 10–22.

7. Фукс А.Б. Состав и свойства пластовых углеводородных систем южной части Лено-Тунгусской нефтегазоносной провинции в зависимости от термобарических условий // Геология нефти и газа. 1998. № 3. С. 35–38.

8. Постникова О.В., Фомичева Л.Н., Соловьева Л.В., Пошибаев В.В., Коновальцева Е.С. Природные резервуары рифей-венд-кембрийского осадочного бассейна юга Сибирской платформы: особенности строения и закономерности размещения // Геология нефти и газа. 2010. № 6. С. 54–64.

9. Моисеев С.А., Фомин А.М., Топешко В.А., Белова Е.В., Гордеева А.О., Константинова Л.Н. [и др.]. Литолого-фациальное районирование

венд-нижнекембрийских отложений южных и центральных районов Сибирской платформы // Гео-Сибирь. 2007. Т. 6. С. 104–106.

10. Рапацкая Л.А., Вахромеев А.Г. Рифиды Сино-Сибирской платформы и их нефтегазоносность: монография. Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2018. 271 с.

11. Хан С.А., Скворцова З.Н., Траскин В.Ю., Никитин М.И., Породенко Е.В., Зубов Д.Н. [и др.]. Изучение диффузии гелия в каменной соли // Газовая промышленность. 2011. № 4 (658). С. 20–23.

12. Folk R.L., Pittman J.S. Length-slow chalcidony: a new testament for vanished evaporites // Journal of Sedimentary Petrology. 1971. Vol. 41. P. 1045–1058.

13. Bouma A.H. Sedimentology of some flysch deposits. A graphic approach to facies interpretation. Amsterdam – New York: Elsevier, 1962. 168 p.

14. Сараев С.В. Литолого-фациальная характеристика усольской свиты (нижний кембрий) и ее возрастных аналогов предъенисейского осадочного бассейна Западной Сибири // Геология и геофизика. 2015. Т. 56. № 6. С. 1173–1188. <https://doi.org/10.15372/GiG20150608>

15. Павлов В.Э., Шацилло А.В., Петров П.Ю. Палеомагнетизм верхнерифейских отложений Туруханского и Оленекского поднятий и Удинского Присяянья и дрейф Сибирской платформы в неопротерозое // Физика Земли. 2015. № 5. С. 107–139.

16. Розанов А.Ю. Палеогеография и палеобиогеография раннего кембрия // Вестник Академии наук СССР. 1985. № 11. С. 80–90.

17. Беленицкая Г.А. Природные соляно-нафтидные узлы – глобальные центры надежд и угроз (на примере бассейна Мексиканского залива) // Пространство и время. 2012. № 3 (9). С. 193–207.

References

1. Khan SA, Igoshin AI, Teplov MK, Zhilenko EA, Babayan MA, Panteliev DV, et al. Underground storage of helium gas concentrate: Orenburg helium plant practice. *Gazovaya promyshlennost' = Gas Industry*. 2012;S(684):28–31. (In Russ.)

2. Bondarev VL, Chugunov AV, Sarkisova MA, Bondarev EV. Prospects for the storage of natural helium-enriched gas in Eastern Siberia and the Far East. *Vesti Gazovoy Nauki*. 2015;3(23):63–67. (In Russ.)

3. Korotkov SB, Franchuk AA, Semenova YeV. Halogen fluid traps at the Kovykta gas production cluster of Irkutsk Region. *Vesti Gazovoy Nauki*. 2017;3(31):298–307. (In Russ.)

4. Franchuk AA, Korotkov SB, Semenova YeV. Geological-geophysical characteristics of the salt-bearing fluid traps at Siberian Platform. *Vesti Gazovoy Nauki*. 2017;3(31):162–171. (In Russ.)

5. Leachman WD. Helium. *Bureau of Mines*. New York; 1989. p.503–508.



6. Yakutseni VP. Helium raw-material base: state, prospects for development and use. *Mineral'nye resursy Rossii. Ekonomika i upravlenie* = Mineral Resources of Russia. Economics and Management. 2001;2:10–22. (In Russ.)

7. Fuks AB. Composition and properties of bedded hydrocarbon systems according to thermobaric conditions: the south of the Lena-Tunguska oil-and-gas province. *Oil and Gas Geology*. 1998;3:35–38. (In Russ.)

8. Postnikova OV, Fomicheva LN, Solovieva LV, Poshibayev VV, Konovaltseva ES. Natural reservoirs of Riphean-Vendian-Cambrian sedimentary basin of south of Siberian platform: features of structure and distribution regularities. *Oil and Gas Geology*. 2010;6:54–64. (In Russ.)

9. Moiseev CA, Fomin AM, Topeshko BA, Belova EB, Gordeeva AO, Konstantinova LN, et al. Lithologic-facial zoning of the Vendian-and-Lower Cambrian sediments of the southern and central areas of the Siberian platform. *Geo-Sibir'*. 2007;6:104–106. (In Russ.)

10. Rapatskaya LA, Vakhromeev AG. *Ripheids of the Siberian platform and their oil-and-gas content*. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University; 2018. 271 p. (In Russ.)

11. Khan SA, Skvortsova ZN, Traskin VYu, Nikitin MI, Porodenko EV, Zubov DN, et al. Helium

diffusion in rock salt. *Gazovaya promyshlennost'* = Gas Industry. 2011;4(658):20–23. (In Russ.)

12. Folk RL, Pittman JS. Length-slow chalcidony: a new testament for vanished evaporites. *Journal of Sedimentary Petrology*. 1971;41:1045–1058.

13. Bouma AH. *Sedimentology of some flysch deposits. A graphic approach to facies interpretation*. Amsterdam – New York: Elsevier; 1962. 168 p.

14. Saraev SV. Lithofacies characteristic of the Usolie formation (Lower Cambrian) and its age analogs of the Pre-Yenisey sedimentary basin of Western Siberia. *Geologiya i Geofizika*. 2015;56(6):1173–1188. (In Russ.)
<https://doi.org/10.15372/GiG20150608>

15. Pavlov VE, Shatsillo AV, Petrov PYu. Paleomagnetism of the Upper Riphean deposits of the Turukhansk and Olenek uplifts and the Uda Sayan region, and the drift of the Siberian platform in the Neoproterozoic. *Fizika Zemli*. 2015;5:107–139. (In Russ.)

16. Rozanov AYu. Paleogeography and paleobiogeography of the Early Cambrian. *Vestnik Akademii nauk SSSR*. 1985;11:80–90. (In Russ.)

17. Belenitskaya GA. Natural saline-naphthides clusters as global centers of expectations and hazards: case study of the gulf of Mexico basin. *Space and Time*. 2012;3(9):193–207. (In Russ.)

Критерии авторства / Authorship criteria

Рапацкая Л.А., Тонких М.Е. написали статью, имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

Larisa A. Rapatskaya, Marina E. Tonkikh are the authors of the article, hold equal copyright and bear equal responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов / Responsibility for plagiarism

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

All authors have read and approved the final version of this manuscript.

Сведения об авторах / Information about the authors



Рапацкая Лариса Александровна,

кандидат геолого-минералогических наук, доцент,
профессор кафедры геологии, геофизики и геоинформационных систем,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: raplarisa@yandex.ru

Larisa A. Rapatskaya,

Cand. Sci. (Geol. & Mineral.), Docent,
Professor, Department of Geology, Geophysics and Geoinformation Systems,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
e-mail: raplarisa@yandex.ru

**Тонких Марина Евгеньевна,**

кандидат геолого-минералогических наук, доцент,
доцент кафедры геологии, геофизики и геоинформационных систем,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,

✉ e-mail: mtonkikh@mail.ru

Marina E. Tonkikh,

Cand. Sci. (Geol. & Mineral.), Docent,
Associate Professor, Department of Geology, Geophysics
and Geoinformation Systems,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,

✉ e-mail: mtonkikh@mail.ru