



ГЕОФИЗИКА

Научная статья

УДК 550.03

EDN: QOGIZV

DOI: 10.21285/2686-9993-2024-47-4-368-380



Газовые гидраты в Арктике: возможности и перспективы изучения электромагнитными методами

© Н.В. Мисюркеева^{a✉}, И.В. Буддо^b, И.А. Шелохов^c,
А.С. Смирнов^d, А.А. Нежданов^e

^{a-c}Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

^bИркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

^dНаучный центр изучения Арктики, Салехард, Россия

^eЗападно-Сибирский научно-исследовательский институт геологии и геофизики, Тюмень, Россия

Резюме. Месторождения нетрадиционных углеводородов – резервный источник восполнения сырьевой базы России. Существенная часть нетрадиционного газа связана с газовыми гидратами, поиск и разведка которых на сегодняшний день остается сложной задачей для геологов. Технология извлечения еще не разработана, и поисковые критерии неясны для многих объектов. Многолетняя мерзлота Западной Сибири играет ключевую роль в существовании газовых гидратов, создавая условия для их образования и обеспечивая стабильность. Геофизические исследования методом малоглубинного зондирования становлением поля в ближней зоне совместно с анализом гидрогеологического и криогенного строения, а также результатами бурения и лабораторных экспериментов способствуют изучению мерзлоты и газогидратообразования. Целью исследования являлась оценка возможностей и перспектив изучения газовых гидратов с помощью наземной электроразведки в зоне вечной мерзлоты Арктики. Рассмотрены физико-геологические характеристики скоплений газовых гидратов, их проявление в результатах геофизических исследований. Приведены примеры проявления газовых гидратов в песчанистых отложениях тибейсалинской свиты на основе материалов электроразведки методом малоглубинного зондирования становлением поля в ближней зоне. Интервалы возможного наличия газовых гидратов характеризуются повышенными значениями удельного электрического сопротивления до 30 Ом·м. Намечены дальнейшие пути применения геофизических исследований с целью картирования газовых гидратов в условиях Арктики.

Ключевые слова: газовые гидраты, нетрадиционные ресурсы углеводородов, мерзлота, криолитозона, нестационарные электромагнитные зондирования, Арктика

Финансирование: Работа выполнена в рамках темы № 1023110300018-4-1.5.4 Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в молодежной лаборатории комплексных исследований Арктики Института земной коры СО РАН (г. Иркутск) с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Геодинамика и геохронология» Института земной коры СО РАН.

Для цитирования: Мисюркеева Н.В., Буддо И.В., Шелохов И.А., Смирнов А.С., Нежданов А.А. Газовые гидраты в Арктике: возможности и перспективы изучения электромагнитными методами // Науки о Земле и недропользование. 2024. Т. 47. № 4. С. 368–380. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-4-368-380>. EDN: QOGIZV.

GEOPHYSICS

Original article

Arctic gas hydrates: possibilities and prospects of studying by electromagnetic methods

© Natalya V. Misyrkееva^{a✉}, Igor V. Buddo^b, Ivan A. Shelokhov^c,
Alexander S. Smirnov^d, Aleksey A. Nezhdanov^e

^{a-c}Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russia

^bIrkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

^dArctic Research Center, Salekhard, Russia

^eWest Siberian Research Institute of Geology and Geophysics, Tyumen, Russia

Abstract. Deposits of unconventional hydrocarbons are reserve sources of replenishment of the raw material base of Russia. A significant part of unconventional gas is associated with gas hydrates, the search and exploration of which

© Мисюркеева Н.В., Буддо И.В., Шелохов И.А., Смирнов А.С., Нежданов А.А., 2024



today remains a complex task for geologists. The extraction technology has not been developed yet, and the search criteria are still unclear for many objects. Western Siberia permafrost plays the key role in the existence of gas hydrates, creating conditions for their formation and ensuring their stability. Geophysical studies using the shallow near-field transient electromagnetic sounding method together with the analysis of the hydrogeological and cryogenic structure, as well as the results of drilling and laboratory experiments contribute to the study of permafrost and gas hydrate formation. The purpose of the study is to assess the possibilities and prospects for studying gas hydrates using surface electrical exploration in the Arctic permafrost zone. The paper considers the physical and geological characteristics of gas hydrate accumulations and their manifestation in geophysical study results. Examples of gas hydrate manifestation in sandy deposits of the Tibeyalsinskaya formation are given based on the materials of electrical exploration using the method of shallow near-field transient electromagnetic sounding. The intervals of possible presence of gas hydrates are characterized by increased values of specific electrical resistance up to 30 Ohm·m. The application prospects of using geophysical studies for gas hydrates mapping in Arctic are outlined.

Keywords: gas hydrates, unconventional hydrocarbon resources, permafrost, cryolithozone, transient electromagnetic sounding, Arctic

Funding: The research was carried out under the topic no. 1023110300018-4-1.5.4 of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation in the Youth Laboratory of Integrated Arctic Research of the Institute of the Earth's Crust SB RAS (Irkutsk) using the equipment of the Resource Sharing Center "Geodynamics and Geochronology" of the Institute of the Earth's Crust SB RAS.

For citation: Misurkееva N.V., Buddo I.V., Shelokhov I.A., Smirnov A.S., Nezhdanov A.A. Arctic gas hydrates: possibilities and prospects of studying by electromagnetic methods. *Earth sciences and subsoil use*. 2024;47(4):368-380. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-4-368-380>. EDN: QOGIZV.

Введение

Нетрадиционными считаются углеводороды, залегающие в сложных геологических условиях и требующие применения инновационных методов разведки, добычи, переработки и транспортировки. Эти ресурсы включают низкопроницаемые коллекторы, сланцевый газ, газ из угольных пластов, глубоких горизонтов, а также газовые гидраты [1].

Несмотря на лидирующие позиции России в мировой добыче углеводородов, открытые на сегодняшний день нефтегазовые месторождения активно разрабатываются уже длительное время, многие из них относятся к категории зрелых либо истощенных. Представляется, что освоение месторождений нетрадиционных ресурсов углеводородного сырья, в том числе газовых гидратов, на которые приходится значительная их часть, может решить проблему снижения ресурсного потенциала топливно-энергетического комплекса.

Газовые гидраты представляют собой твердые кристаллические вещества, с виду напоминающие лед или снег. Кристаллическая структура состоит из молекул воды с молекулами метана внутри, объем которых может достигать до 160–180 см³ на 1 см³ гидрата.

Для образования и устойчивого (стабильного) существования гидратов необходимы низкие температуры и высокое давление, по-

этому они часто встречаются в зонах вечной мерзлоты или глубоководного шельфа (глубина более 400–500 м).

По оценкам специалистов ООО «Газпром ВНИИГАЗ», ресурсы газогидратов в России составляют 800–1100 трлн м³, основная их часть сосредоточена на арктическом шельфе Западной и Восточной Сибири [2, 3]. На сегодняшний день в мире обнаружено более 200 месторождений газовых гидратов [4].

Площадь распространения возможного гидратообразования на территории России и в прилегающих шельфах арктических морей составляет более 4 млн км² (по оценке ООО «Газпром ВНИИГАЗ») [4]. Глубина залегания газовых гидратов варьирует от 200 до 1000 м¹.

Длительное охлаждение разреза арктических регионов с образованием многолетнемерзлых пород (ММП) способствовало формированию необходимых условий для гидратообразования. Однако если при этом нет определенных термобарических условий, достаточного количества газа, воды, хороших пород-коллекторов, активной системы тектонических нарушений, клатраты газа не образуются [5].

Эпохи промерзания, свойства и температура ММП, термобарические, геохимические и геологические условия в пределах формиру-

¹ Газогидраты: технологии добычи и перспективы разработки. Информационная справка // Аналитический центр при правительстве Российской Федерации. Режим доступа: <https://ac.gov.ru/files/publication/a/1437.pdf> (дата обращения: 15.05.2024).



ющей криолитозоны способствовали многообразию условий залегания газовых гидратов, которые могут находиться как под мерзлыми толщами при низких положительных, так и внутри мерзлых толщ при отрицательных температурах [6, 7]. На рис. 1 схематично представлены этапы эволюции криосферы и формирования ММП центральной части Ямало-Ненецкого автономного округа в четвертичный период.

Газовые гидраты могут образовываться как из биогенного, так и из катагенетического (глубинного) газов. Одним из генезисов их возникновения считается вероятность перехода традиционных залежей углеводородов в газогидратные нетрадиционные при условии,

что на момент промерзания они попали в зону стабильности газовых гидратов либо при промерзании часть газа из традиционных залежей отжималась в локальные ловушки и за счет последующего промерзания и высоких давлений переходила в клатратное состояние [6, 7].

По данным, представленным А.Е. Воробьевым и др.², мощность газогидратных залежей определяется общей газогенерационной обстановкой, мощностью ММП и газовой залежи до промерзания. С позиции геологоразведки поиск и разведка залежей газовых гидратов до сих пор является сложной и нетривиальной задачей. Даже если появляется технология извлечения, поисковые критерии для всех подобных объектов до сих пор не ясны.

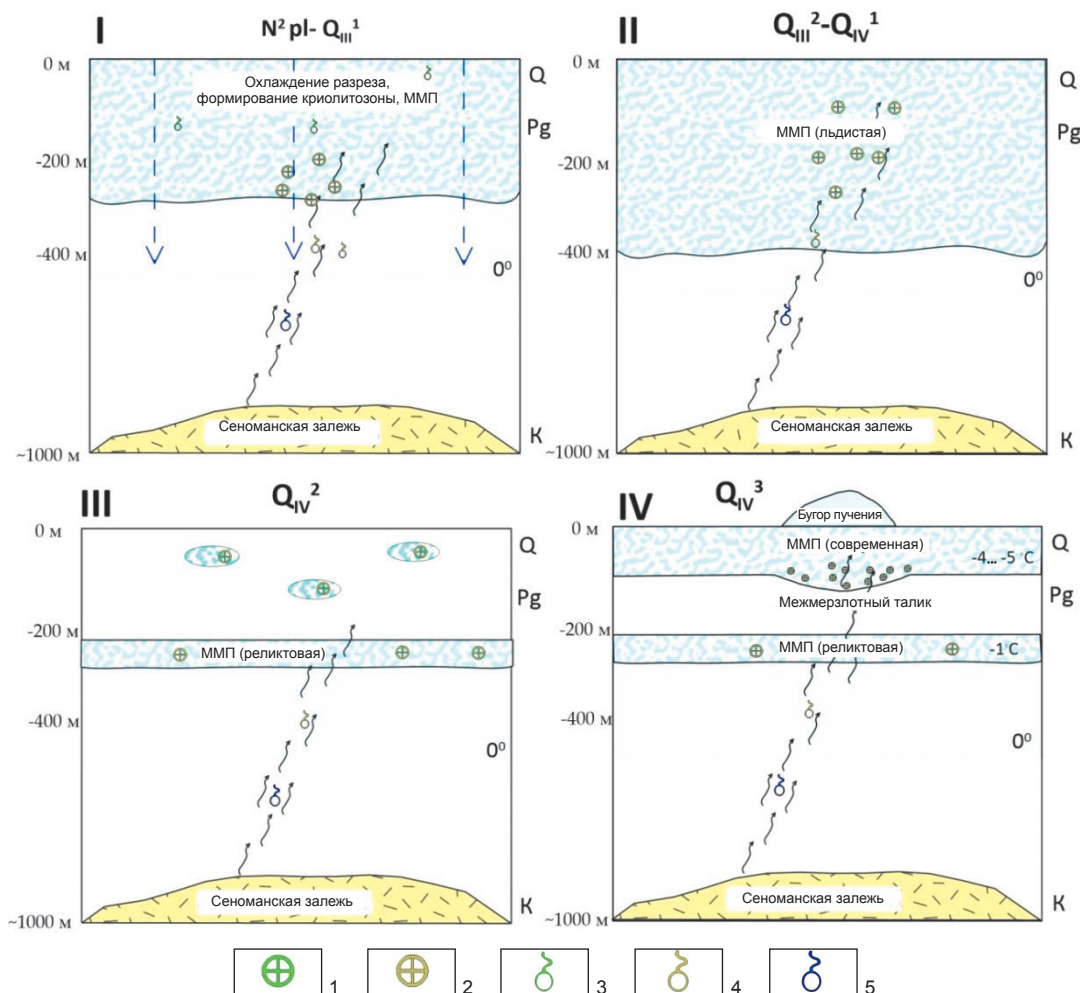


Рис. 1. История развития вечной мерзлоты на севере Западной Сибири [7]:

1–2 – газогидраты: 1 – биогенные, 2 – катагенные;

3–4 – свободный газ: 3 – биогенный, 4 – катагенный; 5 – флюиды

Fig. 1. History of permafrost development in the north of Western Siberia [7]:

1–2 – gas hydrates: 1 – biogenic, 2 – catagenic;

3–4 – free gas: 3 – biogenic, 4 – catagenic; 5 – fluids

² Воробьев А.Е., Малюков В.П. Газовые гидраты. Технологии воздействия на нетрадиционные углеводороды: учеб. пособие для студентов. М.: Изд-во РУДН, 2009. 292 с. EDN: UOLKXB.



При бурении в арктических регионах часто отмечаются газопроявления из толщи вечной мерзлоты (Тазовский и Гыданский полуострова, полуостров Ямал). Выбросы могут как быть низкодебитными, так и достигать промышленных масштабов. Выбросы газа связаны с разложением газовых гидратов, так как при бурении возникают резкое падение давления и растепление вблизи ствола скважины, что приводит к серьезным осложнениям и авариям на скважине.

Целью исследования являлась оценка возможностей и перспектив изучения газовых гидратов наземными электроразведочными исследованиями в зоне вечной мерзлоты Арктики. ММП Западной Сибири – один из ключевых факторов существования газогидратов. Во-первых, в совокупности с другими факторами они создают необходимые условия для гидратообразования, а во-вторых, представляют собой «покрышку», которая не позволяет углеводородам рассеиваться в атмосфере и обеспечивает условия для формирования зон стабильности газогидратов.

Очевидно, что изучение ММП является одним из важных факторов в сложной системе газогидратообразования для понимания не только генезиса формирования, но и условий и форм залегания, а также освоения газовых гидратов.

Материалы и методы исследования

На сегодняшний день основным методом поиска гидратоносных залежей является сейсморазведка, которая позволяет довольно точно картировать верхнюю и нижнюю границы гидратонасыщенных пород, а также концентрацию в них гидрата [8]. Кроме того, изучаются очаги разгрузки газа придонными профилографами. Для картирования газовых плюмов в воде используют эхолотирование.

При исследовании разгрузки газа в толщу воды используется СТД-профилирование с датчиком метана, проводятся измерения теплового потока, сейсмоакустическое профилирование для картирования очагов разгрузки газа и границы BSR (*англ.*: bottom simulating reflector – кажущаяся отражающая граница дна на сейсмических записях). Отбираются

пробы и проводятся лабораторные исследования газовых гидратов (тепловые свойства, химический анализ воды и газа и др.) [8].

Благодаря физическим свойствам гидратонасыщенных пород их можно обнаруживать по таким признакам, как высокая акустическая проводимость, низкая плотность и аномально низкая теплопроводность, пониженные водо- и газопроницаемость. Однако такому важному свойству, как электросопротивление, уделяется совсем мало внимания. В основном изучением электрического сопротивления газовых гидратов занимаются в лабораторных условиях и по результатам электрического каротажа сопротивления, полевые же наблюдения сводятся к минимуму.

Известны немногочисленные исследования электромагнитным методом CSEM (*англ.*: controlled source electromagnetic method), по результатам которых газовые гидраты фиксируются в виде аномалий повышенного сопротивления [9]. Отмечается, что гидратосодержащие морские осадки характеризуются высоким удельным электрическим сопротивлением (УЭС), сопоставимым со льдом. Газовые гидраты в морских отложениях меняют их нормальные физические свойства и могут увеличивать сопротивление пород в 2–5 и более раз [9]. Большинство известных исследований проведены в морских условиях, оценка сопротивления производилась относительно морских придонных осадков, глин и минерализованной воды³.

В большей части российской Арктики газовые гидраты залегают в зоне вечной мерзлоты, сложенной породами различного состава и солености (это предопределяет важность понимания физических свойств пород, в которых они залегают или образуются).

Физические свойства гидратов очень близки к свойствам чистого льда. Если скорости волн сжатия и сдвига (P и S) в гидрате метана могут достигать 3600 и 1900 м/с соответственно, а его плотность составляет 0,912 г/см³, то соответствующие значения для льда составляют 3890 и 1970 м/с и 0,916 г/см³ [10].

Таким образом, свойства пород, содержащих в поровом пространстве газовые гидраты, схожи с отложениями с включениями льда. Основное различие состоит в том,

³ Lee M.W., Collett T.S. A method of shaly sand correction for estimating gas hydrate saturations using downhole electrical resistivity log data: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2006-5121. Reston, 2006 // USGS Publications Warehouse. Режим доступа: https://pubs.usgs.gov/sir/2006/5121/pdf/sir5121_508.pdf (дата обращения: 15.05.2024).



что отложения с содержанием газовых гидратов более жесткие, гидрат может воспламеняться, существовать при температурах выше 32 °F (0 °C), а для его образования и поддержания стабильности необходимо высокое поровое давление [11].

Поскольку мнения большинства исследователей сводятся к тому, что газовые гидраты контрастны по сопротивлению с вмещающей средой, актуальным становится вопрос выбора эффективного метода электроразведки для их изучения. Учитывая условия формирования газовых гидратов в зоне ММП арктических регионов, таким может быть метод зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ), основанный на изучении процесса становления поля, которое возбуждается в земле при изменении тока в источнике [12]. Данный метод чувствителен к смене сопротивления, литологии и насыщения.

В условиях многолетнемерзлого разреза определяющее влияние на сопротивление оказывает переход воды из жидкой в твердую фазу, то есть лед, который является практически изолятором. Однако необходимо понимать, что промерзает не весь объем воды, насыщающей разрез, остается капиллярная влага, вымораживаются соли (при условии высокой минерализации), что также оказывает влияние на сопротивление.

Учитывая, что льдонасыщенные мерзлые породы (за счет льда) и газогидратные отложения (за счет льда и газа) обладают высоким сопротивлением, метод ЗСБ позволяет картировать подобные объекты на фоне преимущественно глинистого мезо-кайнозойского осадочного чехла, отличающегося низким сопротивлением. Существенным преимуществом является отсутствие заземления, что позволяет работать в различных природных условиях. Кроме того, данный метод обладает низкой чувствительностью к анизотропии разреза и приповерхностным неоднородностям.

Еще одним плюсом являются высокая глубинность и локальность исследований методом ЗСБ. В условиях мерзлого разреза Арктики использование малоглубинной модификации метода ЗСБ (мЗСБ) с установками небольших размеров (длина стороны генераторной петли – 100 м) и током до 30 А в источнике позволяет достигать глубинности 500 м [13]. Кроме того, ЗСБ характеризуется наивысшей вертикальной разрешающей способностью [13].

Как и для большинства методов электроразведки на постоянном токе, высокоомные слои (ММП и др.) для ЗСБ не являются экранами в силу горизонтальной поляризации поля. Данная особенность позволяет с помощью указанного метода картировать и мощный слой ММП, и высокоомные интервалы возможного наличия газовых гидратов, а также более глубоко изучать залегающие горизонты.

Целевым объектом проведенного исследования являлась верхняя часть разреза (до глубины 500 м) нефтегазового месторождения в северной части полуострова Ямал.

В орогидрографическом отношении район представляет собой низменную слегка холмистую тундровую равнину, для которой характерны обильная заозеренность и заболоченность (30 %). Абсолютные отметки высот изменяются от 0–10 до 50 м.

Гидрографическая сеть представлена реками, впадающими в Карское море, такими как Хордыяха, Таваяха, Яходыяха и др. Короткое и прохладное лето, плоский рельеф, наличие вечномерзлых грунтов и высокая влажность воздуха обуславливают прогрессирующее заболачивание территории и обилие застойных озер.

Территория относится к восточной части Ямальской геокриологической области в районе развития многолетней мерзлоты переменной мощности. Глубина кровли ММП изменяется от 0,5 до 1,5 м, а в долинах рек погружается до 5 м и ниже. Подошва залегает на глубине порядка 250–300 м. Верхняя часть наиболее льдистая, с глубиной этот показатель убывает.

Толща мерзлоты по строению неоднородна и включает различного размера линзы и пласты льда толщиной от 0,5 до 30,0 м, линзы криопэгов, газовые и газогидратные скопления, талики преимущественно гидрогенного типа. Под озерами встречаются сквозные талики. Толща ММП рыхлых осадочных пород кайнозойских отложений Ямальской геокриологической области, сцементированных при промерзании льдом или охлажденных, засоленна на всю глубину и содержит гравийные, песчаные, пылеватые, глинистые и коллоидно-дисперсные частицы.

По данным предшествующих исследований (1970–1980 гг.), подошва ММП залегает на глубине от 250 до 300 м. Известно, что подошва многолетнемерзлых толщ фиксиру-



ется по наиболее глубокому залеганию эвидентных (видимых) или латентных (скрытых) ледяных включений. В пределах Ямальской геокриологической области ММП достаточно заметно засолены, поэтому при температуре выше $-1,8...-2,0$ °C они не замерзают, то есть не происходит льдовыделения. Ниже подошвы ММП фиксируется толща пород с отрицательной температурой без включений льда. В целом глубина криолитозоны по нулевой изотерме на востоке Ямальской геокриологической области находится на глубине около 500 м.

Газопроявления из многолетнемерзлых толщ являются важной спецификой Ямальской геокриологической области. Большинство наиболее известных из них приурочено к морским суглинистым отложениям салехардской свиты, другие связаны с супесчано-суглинистыми морскими отложениями казанцевской свиты.

Большинство выбросов газа приурочено к участкам пониженного засоления. Однако ниже данных проявлений отмечается увеличение общей засоленности.

На востоке Ямальской геокриологической области зафиксирован пока единичный случай слабого газопроявления из толщи салехардских суглинков с прослоями песков и включениями слаборазложившейся органики в интервале глубин от 70 до 95 м. Газопроявление сопровождалось барботацией глинистого раствора при бурении параметрической мерзлотной скважины.

В геологическом строении до глубины 500 м принимают участие четвертичные, палеогеновые и верхнемеловые отложения. Отложения верхнего мела представлены ганькинской свитой (маастрихт), которая сложена морскими серыми и зеленовато-серыми глинами со слабым зеленоватым оттенком, слабоалевритистыми, известковистыми, слюдистыми, в нижней части опоковидными. Встречаются пиритизированные водоросли и остатки гастропод. Мощность свиты составляет более 200 м.

Отложения палеоценового и эоценового отделов палеогеновой системы представлены тибейсалинской, серовской, ирбитской и тавдинской свитами.

1. Тибейсалинская свита (мощностью около 100 м) в нижней части сложена глинами, в том числе опоковидными, в верхней – песками, каолинизированными слоями.

2. Серовская свита (мощностью около 20 м) представлена опоковидными глинами с прослоями опок и диатомитовых глин.

3. Ирбитская свита сложена диатомитами и глинами с фауной радиолярий и диатомей. В верхней части – слоями монтмориллонитовых глин. Мощность свиты на Малыгинской площади составляет около 100 м.

4. Тавдинская свита (мощностью около 80 м) в нижней части представлена алевритистыми глинами с прослоями глауконитового песка, в верхней – преимущественно серыми песками.

Четвертичные отложения с разрывом залегают на палеогеновых отложениях и представлены песками, глинами, торфом суммарной мощностью до 140 м. По генезису это преимущественно отложения пойм, надпойменных террас и болот.

В соответствии с тектонической картой мезозойско-кайнозойского ортоплатформенного чехла Западно-Сибирской геосинеклизы участок расположен в пределах Ямало-Гыданской синеклизы и приурочен к Северо-Ямальскому мегавалу.

Месторождение является многопластовым. Здесь открыты промышленные залежи газа и газоконденсата в 30 пластах в диапазоне от сеномана до средней юры включительно. Непосредственно на территории месторождения пробурено более 50 скважин глубокого бурения, из них только в 8 имеется каротаж сопротивления на верхнюю часть разреза, в редком случае описана стратиграфия до глубины 500 м.

Результаты исследования и их обсуждение

Электроразведочные исследования мЗСБ для изучения вечной мерзлоты ведутся на территории Ямало-Ненецкого автономного округа уже более шести лет. На сегодняшний день установлено, что мерзлота характеризуется высокой степенью неоднородности за счет наличия в ней таликов, криопэгов, газовых гидратов и других особенностей, влияющих на ее строение и геоэлектрические характеристики [14, 15]. Проведенные работы позволили изучить строение криолитозоны округа до глубины 500 м, что дало возможность использовать полученные результаты для составления карт регионального распространения вечной мерзлоты и мониторинга опасных геологических процессов.



В последние годы остро стоит вопрос изучения газовых гидратов в вечной мерзлоте. В данном контексте геофизические исследования являются важным инструментом для изучения, оценки возникновения и распределения указанных ресурсов. На сегодняшний день проведены многочисленные исследования газовых гидратов в районах вечной мерзлоты, особое внимание уделено их геологическому происхождению, ресурсному потенциалу, влиянию на климат и окружающую среду, а также методам эксплуатации.

Развитие геофизических исследований газовых гидратов, в том числе электроразведочных и связанных с ними по данной тематике, является важной задачей, которой следует уделять первостепенное внимание. Рассмотрев последние исследования, можно уверенно заявить о том, что газовые гидраты выделяются по электрическим методам повышенными УЭС.

На основе анализа электроразведочных материалов, полученных авторами в северной части полуострова Ямал, было выявлено, что толща ММП на геоэлектрических разрезах картируется по высоким значениям сопротивления до 500–600 Ом·м. Высокие значения сопротивления свидетельствуют о включениях льда в отложениях четвертичной и палеогеновой систем.

Мощность льдонасыщенной мерзлой толщи, неоднородной по геоэлектрическому строению (что также характеризует ее неоднородное геологическое и криогидрологическое строение), составляет в среднем 250 м. Трансформации внутри толщи ММП могут быть связаны с изменением градиента температуры, льдистости, развитием таликов и криопэгов, газовых гидратов, характерных для северной части Ямала, а также другими криогенными литологическими факторами.

На фоне общего относительно высокого сопротивления (500–600 Ом·м) в толще ММП отмечаются локальные аномалии как пониженного, так и повышенного сопротивления.

Низкоомные аномалии (5–20 Ом·м) связаны с развитием таликов различного типа, а зоны с аномально высоким сопротивлением (200–800 Ом·м) – с участками повышенной льдистости. С глубины 250 м сопротивление вниз по разрезу понижается до 3 Ом·м. Здесь залегают преимущественно морозные породы без включений льда, которые, однако, также имеют низкую температуру.

Таким образом, по контрастной смене значений сопротивления с глубиной от 500–600 до 5–20 Ом·м картируется контакт между льдонасыщенными и нельдистыми породами в толще засоленных грунтов, то есть определена глубина положения подошвы яруса мерзлых пород криогенной толщи.

Благодаря проведенному анализу каротажа сопротивления в скважинах глубокого бурения на участке работ, можно отметить, что для интервала от 0 до 150–200 м характерно высокое сопротивление (100–250 Ом·м). В нем залегают четвертичные отложения (Q), представленные многолетнемерзлыми терригенными породами. Ствол одной из скважин в данном интервале разбит глубокими кавернами (>700 мм), которые формируются в зонах ММП за счет вытаивания льда (рис. 2).

Данные каротажа и литологии в скважинах подтверждают распространение в интервале до 250 м ММП. Ниже по разрезу сопротивление пород по данным каротажа понижается до 5–10 Ом·м. В скважине на данной глубине залегают палеогеновые отложения тибейсалинской свиты (Pgtbs), литологически выраженные чередованием глин и алевролитов, которые подстилаются терригенными отложениями ганькинской свиты (K₂gn), представленными чередованием глин, песчаников и алевролитов.

В Западной Сибири предположительные залежи газовых гидратов в интервале тибейсалинской свиты обнаружены на Бованенковском, Ямбургском, Заполярном и Мессояхском месторождениях. Причем возможно наличие как стабильных газовых гидратов, так и свободного газа. На территории Ямбургского нефтегазоконденсатного месторождения газопроявления из зоны стабильности газовых гидратов сосредоточены в интервале глубин 400–550 м и приурочены к континентальной подсвите тибейсалинской свиты [16].

Что характерно, по данным как мЗСБ, так и каротажа, в интервале залегания тибейсалинской свиты отмечаются локальные участки повышения сопротивления. Авторы полагают, что подобные аномалии могут быть связаны с газовыми гидратами. Повышенные УЭС – один из основных петрофизических признаков коллекторов, содержащих природные скопления газовых гидратов⁴.

⁴ Ильин А.В. Газогидраты севера Тюменской области как новый объект изучения геофизическими методами: дис. ... канд. геол.-минерал. наук: 25.00.10. Екатеринбург, 2012. 107 с.

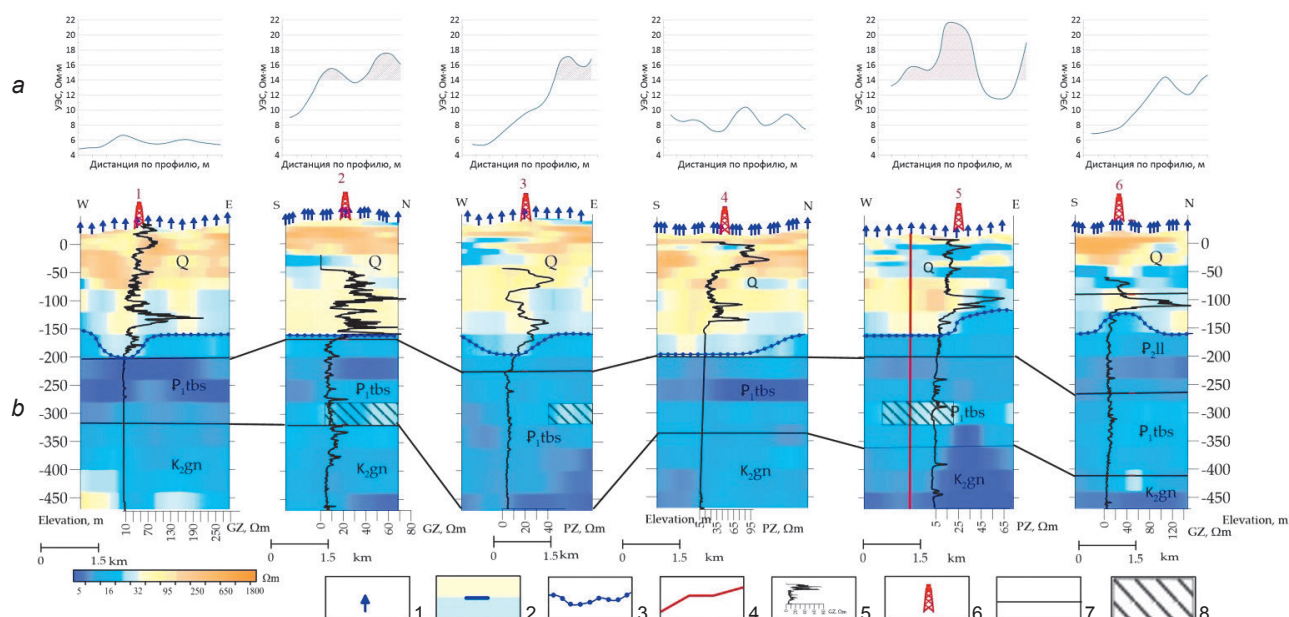


Рис. 2. Корреляционный геоэлектрический профиль через скважины:

a – графики удельного электрического сопротивления в интервале предполагаемого залегания

газовых гидратов в тибейсалинской свите; *b* – геоэлектрические разрезы через скважины

1 – пункты малоглубинного зондирования становлением поля в ближней зоне;

2 – геоэлектрические горизонты и их сопротивление, Ом·м; 3 – предполагаемая граница льдистой многолетнемерзлой породы; 4 – тектонические нарушения; 5 – каротаж сопротивления, Ом·м;

6 – скважины глубокого бурения; 7 – стратиграфические границы;

8 – зоны предполагаемого залегания газовых гидратов в тибейсалинской свите

Fig. 2. Correlation geoelectric profile through wells:

a – resistivity graphs in the interval of supposed gas hydrate occurrence

in the Tibetsalinskaya formation; *b* – geoelectric sections through wells

1 – points of shallow near-field transient electromagnetic sounding;

2 – geoelectric horizons and their resistivity, Ohm·m; 3 – supposed boundary of icy permafrost;

4 – tectonic faults; 5 – resistivity logging, Ohm·m; 6 – deep drilling wells; 7 – stratigraphic boundaries;

8 – zones of supposed gas hydrate occurrence in the Tibetsalinskaya Formation

По данным, представленным И.Г. Низаевой с соавторами [17], методы определения УЭС также являются одними из наиболее информативных для выделения скоплений газовых гидратов. Помимо этого, в стандартный комплекс геофизических исследований скважин для их картирования входят термометрия, кавернометрия, метод самопроизвольной поляризации, гамма-каротаж и газовый каротаж. Отрицательная аномалия потенциала собственной поляризации, низкие показания гамма-каротажа, отрицательная температура по термограмме, средние газовые показания, а также повышенные показания УЭС по каротажу сопротивления могут указывать на наличие газовых гидратов [17].

По данным других исследований, особое внимание в выделении газовых гидратов отводится анализу УЭС, а именно его повышенным показаниям в интервале залегания газовых гидратов [18].

Таким образом, повышенные УЭС (по данным мЗСБ и каротажа) в интервале тибейса-

линской свиты на качественном уровне могут говорить о наличии залежи газовых гидратов. Состав свиты указывает на возможность формирования в ее пределах хороших коллекторов. Перекрывающая (преимущественно глинистая) ирбитская свита может являться крышкой, а большая часть тибейсалинской свиты, по мнению В.С. Якушева, находится в зоне стабильности газовых гидратов [16].

Необходимо понимать, что на фактические значения удельного сопротивления могут влиять многие факторы, поэтому необходимо оценивать характеристики распределения гидрата не только по удельному сопротивлению, но и с привлечением других методов каротажа, а также при возможности сейсморазведки. Кроме того, при интерпретации геофизических данных необходимо учитывать многочисленные факторы: литологические особенности, геокриологические условия разреза, положение зон метастабильности и стабильности газовых гидратов, наличие залежей свободного



газа в более глубоких горизонтах и тектонических нарушениях, наличие путей миграции газа из нижележащих горизонтов. Полученные в ходе исследования наблюдения позволяют наметить дальнейшие пути для геофизических исследований с целью картирования газовых гидратов.

Заключение

Геофизические исследования методом мЗСБ при совместном анализе с особенностями гидрогеологического и криогенного строения, результатами бурения и лабораторных экспериментов помогут внести значительный вклад в изучение мерзлоты и газогидратообразования. При поисках и разведке месторождений газовых гидратов важным представляется применение комплекса геофизических методов сейсморазведки, георадара, электро-томографии и ЗСБ.

Подобная методика показала высокую эффективность на полигоне вблизи Салехарда (полуостров Ямал), где в ходе комплексных полевых исследований были получены геолого-геофизические модели разреза для раз-

личных глубин – от самых верхних горизонтов (первые метры) до более 500–700 м, изучено внутреннее строение ММП, выявлены ослабленные зоны (разломы) [19, 20].

Комплексирование геофизических методов сейсмо- и электроразведки позволяет сформировать физико-геологическую модель интервала криолитозоны, освещающую как упругие свойства среды (продольные и поперечные скорости), так и УЭС, характеризующие и возможное наличие залежей газовых гидратов, и структурно-тектоническое строение территории исследования.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что применение комплекса методов полевой геофизики (сейсморазведки, георадара, электротомографии и ЗСБ), бурение скважин с отбором керна, обязательным комплексом геофизических, гидродинамических, лабораторных исследований, а также комплексной геолого-геофизической интерпретацией полученных данных имеют большое значение для изучения и понимания физико-геологической модели строения газовых гидратов в арктических регионах России.

Список источников

1. Щёлокова Д.В. Нетрадиционные углеводороды как источник неисчерпаемости топливно-энергетических ресурсов // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2016. № 1. С. 120–126. EDN: VZYTJVJ.
2. Дмитриевский А.Н. Нетрадиционные ресурсы нефти и газа России: проблемы и перспективы освоения // Георесурсы, геоэнергетика, геополитика. 2014. № 2. С. 1. EDN: THNLIB.
3. Бессель В.В. Нетрадиционные углеводородные ресурсы – альтернатива или миф? // Neftegaz.RU. 2013. № 9. Режим доступа: <https://magazine.neftgaz.ru/articles/aktualno/620919-netraditsionnye-uglevodorodnye-resursy-alternativa-ili-mif/> (дата обращения: 15.05.2024).
4. Воробьев К.А., Пяткова М.Е., Щерба В.А. Перспективы освоения месторождений газовых гидратов на территории Российской Федерации // География: развитие науки и образования: сб. статей по материалам Междунар. науч.-практ. конф. СПб.: Изд-во РГПУ им. А.И. Герцена, 2022. С. 174–180. EDN: SVIZRG.
5. Друщиц В.А., Садчикова Т.А., Сколотнева Т.С. Гидраты газа на суше и шельфе Арктики и изменение природной среды в квартере // Бюллетень комиссии по изучению четвертичного периода. 2011. № 71. С. 124–134.
6. Чувилин Е.М., Давлетшина Д.А., Лупачик М.В. Гидратообразование в мерзлых и оттаивающих метанонасыщенных породах // Криосфера Земли. 2019. Т. 23. № 2. С. 50–61. [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2019-2\(50-61\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2019-2(50-61)). EDN: YUWSSY.
7. Buddo I., Misyrkeeva N., Shelokhov I., Chuvilin E., Chernikh A., Smirnov A. Imaging Arctic permafrost: modeling for choice of geophysical methods // Geosciences. 2022. Vol. 12. Iss. 10. P. 389. <https://doi.org/10.3390/geosciences12100389>.
8. Матвеева Т.В. Методика и этапность изучения потенциально гидратоносных акваторий и залежей газовых гидратов // Недропользование XXI век. 2014. № 3. С. 74–79. EDN: SXVEML.
9. Schwalenberg K., Rippe D., Koch S., Scholl C. Marine-controlled source electromagnetic study of methane seeps and gas hydrates at Opouawe Bank, Hikurangi Margin, New Zealand // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2017. Vol. 122. Iss. 5. P. 3334–3350. <https://doi.org/10.1002/2016JB013702>.
10. Gabitto J. F., Tsouri C. Physical properties of gas hydrates: a review // Journal of Thermodynamics. 2010. P. 271291. <https://doi.org/10.1155/2010/271291>.
11. Dvorkin J., Nur A. Seismic amplitudes from gas hydrates // E&P. 2007. P. 1–2. Режим доступа: https://netl.doe.gov/sites/default/files/netl-file/NT42663_EPPaper_2007.pdf (дата обращения: 15.05.2024).
12. Кауфман А.А., Морозова Г.М. Теоретические основы метода зондирования становлением поля в ближней зоне: монография. Новосибирск: Наука, 1970. 124 с.
13. Поспеев А.В., Буддо И.В., Агафонов Ю.А., Шарлов М.В., Компаниец С.В., Токарева О.В. [и др.]. Современная практическая электроразведка: монография. Новосибирск: Гео, 2018. 231 с. <https://doi.org/10.21782/B978-5-9909584-1-8>. EDN: VTWOGC.



14. Misurkееva N.V., Buddo I.V., Kraev G.N., Smirnov A.S., Nezhdanov A.A., Shelokhov I.A., et al. Periglacial landforms and fluid dynamics in the permafrost domain: a case from the Taz Peninsula, West Siberia // *Energies*. 2022. Vol. 15. Iss. 8. P. 2794. <https://doi.org/10.3390/en15082794>.
15. Misurkееva N., Buddo I., Shelokhov I., Smirnov A., Nezhdanov A., Agafonov Yu. Thickness and structure of permafrost oil and gas fields of the Yamal Peninsula: Evidence from Shallow Transient Electromagnetic (sTEM) Survey // *Water*. 2024. Vol. 16. Iss. 18. P. 2633. <https://doi.org/10.3390/w16182633>.
16. Якушев В.С., Перлова Е.В., Махонина Н.А., Чувилин Е.М., Козлова Е.В. Газовые гидраты в отложениях материков и островов // *Российский химический журнал*. 2003. Т. 47. № 3. С. 80–90. EDN: WBFUVB.
17. Низаева И.Г., Давлетова А.А., Валиуллин Р.А. Выделение гидратонасыщенных пластов методами ГИС в зонах многолетнемерзлых пород // *Вестник Академии наук Республики Башкортостан*. 2023. Т. 47. № 2. С. 43–51. https://doi.org/10.24412/1728-5283_2023_2_43_51. EDN: JZGVGD.
18. Chen Y., Li D., Liang D., Zhou X., Wu N. Relationship between gas hydrate saturation and resistivity in sediments of the South China Sea // *Acta Petrolei Sinica*. 2013. Vol. 34. Iss. 3. P. 507–512. <https://doi.org/10.7623/syxb201303012>.
19. Буддо И.В., Мисюркеева Н.В., Шелохов И.А., Шеин А.Н., Добрынина А.А., Смирнов А.С. [и др.]. Опыт комплексирования геофизических методов при изучении возможных проявлений флюидодинамических процессов в Арктике // *Газовые гидраты – энергия будущего (РГК I): материалы первой Российской газогидратной конференции* (п. Листвянка, 26–31 августа 2024 г.). Санкт-Петербург: Изд-во ВНИИОкеангеологии, 2024. С. 57–61. <https://doi.org/10.24412/cl-37274-2024-1-57-61>. EDN: MLGKIN.
20. Buddo I., Misurkееva N., Shelokhov I., Shein A., Sankov V., Rybchenko A., et al. Modeling of explosive pingo-like structures and fluid-dynamic processes in the Arctic permafrost: workflow based on integrated geophysical, geocryological, and analytical data // *Remote Sensing*. 2024. Vol. 16. Iss. 16. P. 2948. <https://doi.org/10.3390/rs16162948>.

References

1. Shchelokova D.V. Non-conventional hydrocarbons as a source of inexhaustible energy resources. *Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products*. 2016;1:120-126. (In Russ.). EDN: VZYTJVJ.
2. Dmitrievsky A.N. Mastering of the unconventional hydrocarbon resources of Russia. *Georesources, Geoenergy and Geopolitics*. 2014;2:1. (In Russ.). EDN: THNLIB.
3. Bessel' V.V. Unconventional hydrocarbon resources – an alternative or a myth? *Neftegaz.RU*. 2013;9. Available from: <https://magazine.neftgaz.ru/articles/aktualno/620919-netraditsionnye-uglevodorodnye-resursy-alternativa-ili-mif/> [Accessed 15th May 2024]. (In Russ.).
4. Vorobiev K.A., Pyatkova M.E., Shcherba V.A. Development prospects of gas hydrate deposits on the territory of the Russian Federation. *Geography: development of science and education: collected articles on the materials of the International scientific and practical conference*. St. Petersburg: Herzen University; 2022, p. 174-180. (In Russ.). EDN: SVIZRG.
5. Droushchits V.A., Sadchikova T.A., Skolotneva T.S. Gas hydrates on the Arctic land and offshore and natural environment changes in the Quaternary. *Bulletin of the Commission for Study of the Quaternary*. 2011;71:124-134. (In Russ.).
6. Chuvilin E.M., Davletshina D.A., Lupachik M.V. Hydrate formation in frozen and thawing methane-saturated sediments. *Kriosfera Zemli*. 2019;23(2):50-61. (In Russ.). [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2019-2\(50-61\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2019-2(50-61)). EDN: YUWSSY.
7. Buddo I., Misurkееva N., Shelokhov I., Chuvilin E., Chernikh A., Smirnov A. Imaging Arctic permafrost: modeling for choice of geophysical methods. *Geosciences*. 2022;12(10):389. <https://doi.org/10.3390/geosciences12100389>.
8. Matveeva M.T. Methodology and stage-by-stage approach for the exploration of potentially gas hydrate-bearing water areas and hydrate accumulations. *Nedropol'zovanie XXI vek*. 2014;3:74-79. (In Russ.). EDN: SXVEML.
9. Schwalenberg K., Rippe D., Koch S., Scholl C. Marine-controlled source electromagnetic study of methane seeps and gas hydrates at Opouawe Bank, Hikurangi Margin, New Zealand. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2017;122(5):3334-3350. <https://doi.org/10.1002/2016JB013702>.
10. Gabitto J. F., Tsouri C. Physical properties of gas hydrates: a review. *Journal of Thermodynamics*. 2010:271291. <https://doi.org/10.1155/2010/271291>.
11. Dvorkin J., Nur A. Seismic amplitudes from gas hydrates. *E&P*. 2007;1-2. Available from: https://netl.doe.gov/sites/default/files/netl-file/NT42663_EPPaper_2007.pdf [Accessed 15th May 2024].
12. Kaufman A.A., Morozova G.M. *Theoretical foundations of the method of transient electromagnetic sounding in the near zone*. Novosibirsk: Nauka; 1970, 124 p. (In Russ.).
13. Pospeev A.V., Buddo I.V., Agafonov Y.A., Sharlov M.V., Kompaniec S.V., Tokareva O.V., et al. *Modern applied electroprospecting*. Novosibirsk: Geo; 2018, 231 p. (In Russ.). <https://doi.org/10.21782/B978-5-9909584-1-8>. EDN: VTWOGC.
14. Misurkееva N.V., Buddo I.V., Kraev G.N., Smirnov A.S., Nezhdanov A.A., Shelokhov I.A., et al. Periglacial landforms and fluid dynamics in the permafrost domain: a case from the Taz Peninsula, West Siberia. *Energies*. 2022;15(8):2794. <https://doi.org/10.3390/en15082794>.
15. Misurkееva N., Buddo I., Shelokhov I., Smirnov A., Nezhdanov A., Agafonov Yu. Thickness and structure of permafrost oil and gas fields of the Yamal Peninsula: evidence from shallow transient electromagnetic (sTEM) survey. *Water*. 2024;16(18):2633. <https://doi.org/10.3390/w16182633>.



16. Jakushev V.S., Perlova E.V., Mahonina N.A., Chuvilin E.M., Kozlova E.V. Gas hydrates in sediments of continents and islands. *Rossiiskii khimicheskii zhurnal*. 2003;47(3):80-90. (In Russ.). EDN: WBFUVB.
17. Nizaeva I.G., Davletova A.A., Valiullin R.A. Isolation of hydrate-saturated reservoirs by well logging methods in permafrost zones. *Herald of the Academy of Sciences of the Republic of Bashkortostan*. 2023;47(2):43-51. (In Russ.). https://doi.org/10.24412/1728-5283_2023_2_43_51. EDN: JZGVGD.
18. Chen Y., Li D., Liang D., Zhou X., Wu N. Relationship between gas hydrate saturation and resistivity in sediments of the South China Sea. *Acta Petrolei Sinica*. 2013;34(3):507-512. (In Chinese). <https://doi.org/10.7623/syxb201303012>.
19. Buddo I.V., Misyurkeeva N.V., Shelokhov I.A., Shein A.N., Dobrynina A.A., Smirnov A.S., et al. Geophysical methods integration for studying possible shows of fluidodynamic processes in the Arctic. In: *Gazovye gidraty – energija budushhego (RGK I): materialy pervoj Rossijskoj gazogidratnoj konferencii = Gas hydrates – the energy of the future (RGK I): Proceedings of the First Russian Gas Hydrate Conference*. 26–31 August 2024, Listvyanka. Saint-Petersburg: VNIIOkeangeologia; 2024, p. 57-61. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/cl-37274-2024-1-57-61>. EDN: MLGKIN.
20. Buddo I., Misyurkeeva N., Shelokhov I., Shein A., Sankov V., Rybchenko A., et al. Modeling of explosive pingo-like structures and fluid-dynamic processes in the Arctic permafrost: workflow based on integrated geophysical, geocryological, and analytical data. *Remote Sensing*. 2024;16(16):2948. <https://doi.org/10.3390/rs16162948>.

Информация об авторах / Information about the authors



Мисюркеева Наталья Викторовна,

кандидат геолого-минералогических наук,
младший научный сотрудник лаборатории комплексных исследований Арктики,
Институт земной коры СО РАН,
г. Иркутск, Россия,

✉ mnv@crust.irk.ru

<https://orcid.org/0000-0002-9953-4963>

Natalya V. Misyurkeeva,

Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Junior Researcher of the Laboratory of Integrated Arctic Research,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
Irkutsk, Russia,

✉ mnv@crust.irk.ru

<https://orcid.org/0000-0002-9953-4963>



Буддо Игорь Владимирович,

кандидат геолого-минералогических наук,
заведующий лабораторией комплексной геофизики,
лабораторией комплексных исследований Арктики,
Институт земной коры СО РАН,
г. Иркутск, Россия,

доцент кафедры прикладной геологии, геофизики и геоинформационных систем,
институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,

г. Иркутск, Россия,

biv@crust.irk.ru

<https://orcid.org/0000-0002-5204-9530>

Igor V. Buddo,

Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Head of the Laboratory of Integrated Geophysics,
Laboratory of Integrated Arctic Research,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
Irkutsk, Russia,

Associate Professor of the Department of Applied Geology,
Geophysics and Geoinformation Systems,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,

biv@crust.irk.ru

<https://orcid.org/0000-0002-5204-9530>



Шелохов Иван Антонович,

кандидат геолого-минералогических наук,
 младший научный сотрудник лаборатории комплексной геофизики,
 лаборатории комплексных исследований Арктики,
 Институт земной коры СО РАН,
 г. Иркутск, Россия,
 sia@crust.irk.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3523-4440>

Ivan A. Shelokhov,

Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
 Junior Researcher of the Laboratory of Integrated Geophysics,
 Laboratory of Integrated Arctic Research,
 Institute of the Earth's Crust SB RAS,
 Irkutsk, Russia,
 sia@crust.irk.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3523-4440>



Смирнов Александр Сергеевич,

кандидат геолого-минералогических наук, доцент,
 ведущий научный сотрудник,
 Научный центр изучения Арктики,
 г. Салехард, Россия,
 dasertx@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6837-199X>

Alexander S. Smirnov,

Cand. Sci. (Geol. & Mineral.), Associate Professor,
 Leading Researcher,
 Arctic Research Center,
 Salekhard, Russia,
 dasertx@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6837-199X>



Нежданов Алексей Алексеевич,

доктор геолого-минералогических наук,
 советник по геологии,
 Западно-Сибирский научно-исследовательский институт геологии и геофизики,
 г. Тюмень, Россия,
 nezhdanovaa@zsnigg.ru
<https://orcid.org/0000-0002-9453-7962>

Alexey A. Nezhdanov,

Dr. Sci. (Geol. & Mineral.),
 Advisor on Geology,
 West Siberian Research Institute of Geology and Geophysics,
 Tyumen, Russia,
 nezhdanovaa@zsnigg.ru
<https://orcid.org/0000-0002-9453-7962>

Вклад авторов / Contribution of the author

Н.В. Мисюркеева – разработка концепции, визуализация, написание черновика рукописи, написание рукописи – рецензирование и редактирование.

И.В. Буддо – административное руководство исследовательским проектом, разработка концепции.

И.А. Шелохов – валидация результатов, визуализация.

А.С. Смирнов – предоставление ресурсов, курирование данных, написание рукописи – рецензирование и редактирование.

А.А. Нежданов – научное руководство, курирование данных, написание рукописи – рецензирование и редактирование.

Natalya V. Misurkeeva – conceptualization, visualization, writing – original draft, writing – review & editing.

Igor V. Buddo – project administration, conceptualization.

Ivan A. Shelokhov – validation, visualization.

Alexander S. Smirnov – resources, data curation, writing – review & editing.

Alexey A. Nezhdanov – supervision, data curation, writing – review & editing.

**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 13.11.2024; одобрена после рецензирования 09.12.2024; принята к публикации 16.12.2024.

The article was submitted 13.11.2024; approved after reviewing 09.12.2024; accepted for publication 16.12.2024.