



Научная статья

УДК 550.8

<https://elibrary.ru/obdobc><https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-2-160-181>

Изучение криогидрогеологических условий с помощью электромагнитных исследований методом малоглубинных зондирований становлением поля в ближней зоне на примере западной части Якутского артезианского бассейна

А.А. Оцимик^{а,в}, И.В. Буддо^б^аООО «СИГМА-ГЕО», г. Иркутск, Россия^{а,б}Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия^{а,б}Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме. Сложность разведки, оценки запасов и эксплуатации месторождений подземных вод на территории Республики Саха (Якутия) (Россия) определяется разнообразием условий распространения и мощности многолетнемерзлых пород, а также строением отложений, вмещающих водоносные коллекторы. Актуальность представленного исследования связана с необходимостью научно обоснованного прогноза и поиска источников технического водоснабжения для их использования при бурении нефтяных скважин и обеспечения системы поддержания пластового давления. В статье изложены результаты обобщения материалов малоглубинных зондирований становлением поля в ближней зоне, проведенных на территории Республики Саха (Якутия) в период 2016–2022 гг. Описана методика исследований, освещены предпосылки определения в геоэлектрическом разрезе многолетнемерзлых пород, а также особенности их морфологии на территориях, расположенных вдоль западной границы Якутского артезианского бассейна, с привлечением материалов бурения 75 гидрогеологических скважин. Отмечена неравномерная геотермическая изученность района. Прослежено сокращение глубины залегания подошвы многолетнемерзлых пород с северо-востока на юго-запад от 400 до 150 м. На территории Среднеботуобинского месторождения закартировано прерывистое распространение мерзлых толщ, выявлены таликовые зоны с разной водообильностью, ряд выявленных объектов водоснабжения эксплуатируется. Картографические материалы, полученные в ходе проведенных исследований, позволили существенно детализировать строение криогидрогеологических систем ряда месторождений нефти и газа Республики Саха (Якутия). Результаты проведенных исследований имеют научно-практическое значение при прогнозе участков осложнений в ходе бурения скважин, связанных с проходкой многолетнемерзлых пород (разрушения стенок скважины, прихваты бурового инструмента, газопрооявления), а также при определении участков развития межмерзлотных и подмерзлотных водоносных коллекторов и минимизации рисков бурения гидрогеологических скважин с неудовлетворительным результатом.

Ключевые слова: мерзлота, криолитозона, термометрия, температура, талики, водоснабжение, криогидрогеологические системы, малоглубинные зондирования становлением поля в ближней зоне, удельное электрическое сопротивление, Якутия

Благодарности: Авторы выражают глубокую благодарность кандидату технических наук Ю.А. Агафонову за всестороннюю поддержку научных начинаний, доктору геолого-минералогических наук А.Г. Вахромееву за внимание и консультационную помощь при подготовке статьи. Большой объем аналитических работ выполнен специалистами ООО «СИГМА-ГЕО» И.В. Акуловой, З.Я. Масаевой, кандидатом геолого-минералогических наук И.А. Шелуховым. Всем названным лицам авторы искренне признательны.

Для цитирования: Оцимик А.А., Буддо И.В. Изучение криогидрогеологических условий с помощью электромагнитных исследований методом малоглубинных зондирований становлением поля в ближней зоне на примере западной части Якутского артезианского бассейна // Науки о Земле и недропользование. 2023. Т. 46. № 2. С. 160–181. <https://elibrary.ru/obdobc>, <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-2-160-181>.



Original article

Cryohydrogeological settings appraisal by shallow near-field TEM sounding: a case study of the western part of the Yakut artesian basin

Anastasia A. Otsimik^{a*}, Igor V. Buddo^b

^aSIGMA-GEO LLC, Irkutsk, Russia

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

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

Abstract. The complexity of exploration, reserve estimation and development of groundwater fields in the Republic of Sakha (Yakutia) (Russia) is due to the variety of location conditions and thickness of permafrost rocks, as well as the structure of sediments containing aquifers. The relevance of the study is determined by the necessity to give a scientifically based prediction and search for the sources of technical water supply to be used in oil well drilling and provision of a reservoir pressure maintenance system. The article presents the analysis results of the materials of shallow near-field transient electromagnetic soundings carried out on the territory of the Republic of Sakha (Yakutia) in the period from 2016 to 2022. Description is given to the research methodology, conditions for determining the permafrost rocks in the geoelectric section, their morphological features in the territories located along the western border of the Yakut artesian basin with the involvement of drilling materials from 75 hydrogeological wells. The sparse geothermal knowledge of the area is noted. It was traced that the depth of the permafrost base decreases from northeast to southwest from 400 to 150 m. Within the Middle Botuoba field, discontinuous distribution of frozen strata has been mapped, talik zones with different water abundance have been identified, and a number of identified water supply facilities are operated. Cartographic materials obtained in the course of the research allowed to specify significantly the structure of cryohydrogeological systems of a number of oil and gas fields in the Republic of Sakha (Yakutia). The research results are of scientific and practical importance when predicting the areas with complicated well drilling associated with permafrost drilling (destruction of well walls, drilling tool sticking, gas shows), as well as when determining the location areas of interpermafrost and subpermafrost aquifers and minimizing the risks of drilling dry hydrogeological wells.

Keywords: permafrost, cryolithozone, thermal logging, temperature, taliks, water supply, cryohydrogeological systems, shallow near-field transient electromagnetic soundings, specific electrical resistivity, Yakutia

Acknowledgements: The authors express the profound gratitude to Yu.A. Agafonov, Ph.D. for the all-round support of scientific initiatives, A.G. Vakhromeev, Dr. Sci. (Geol. & Mineral.) for attention and consulting assistance during the preparation of the article. A great amount of analytical work was carried out by the geoscientists of SIGMA-GEO LLC I.V. Akulova, Z.Ya. Masaeva, I.A. Shelokhov, Cand. Sci. (Geol. & Mineral.). The authors are sincerely grateful to all these persons.

For citation: Otsimik A.A., Buddo I.V. Cryohydrogeological settings appraisal by shallow near-field TEM sounding: a case study of the western part of the Yakut artesian basin. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2023;46(2):160-181. (In Russ.). <https://elibrary.ru/obdobc>, <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-2-160-181>.

Введение

На территории Республики Саха (Якутия) (Россия) широко распространена толща многолетнемерзлых пород, в районе исследования глубина залегания подошвы многолетнемерзлых пород составляет от 100 до 400 м. Мерзлота имеет различные условия распространения, мощность и динамику, что обуславливает специфичность формирования и режима подземных вод, а также различную глубину их залегания [1–4].

Зачастую на месторождениях углеводородов замеры температуры горных пород в верхней части разреза ограничиваются единичными скважинами. В то же время информация о глубине залегания и внутреннем стро-

ении многолетнемерзлых пород позволяет прогнозировать условия бурения и обнаруживать водообильные зоны, месторождения подземных вод, которые могли бы использоваться для технических целей или обеспечения системы поддержания пластового давления. Для решения данных задач предлагается применение технологии электромагнитных исследований методом малоглубинных зондирований становлением поля в ближней зоне (мЗСБ), которые позволяют изучать и уточнять морфологию многолетнемерзлых пород в межскважинном пространстве.

В административном плане территории, изученные методом мЗСБ, сосредоточены преимущественно в пределах Мирнинского



улуса Республики Саха (Якутия). В структурно-тектоническом отношении¹ изученные площади относятся к Мирнинскому структурному мысу и области его сочленения с Непским сводом – структурам I порядка, осложняющим строение надпорядковой структуры – Непско-Ботуобинской антеклизы².

В данной работе рассматриваются участки детальных криогидрогеологических исследований, которые располагаются в пределах локальных положительных структур: Маччобинской, Мирнинской, Иктехской, и Среднеботуобинской. Территории исследований объединяет длительная история тектонического развития. Крупным элементом, оказавшим влияние на современный облик района, является Вилуйско-Мархинская зона разломов, пересекающая Мирнинский структурный мыс в субмеридиональном направлении.

Объектом криогидрогеологических исследований методом мЗСБ послужили отложения верхней части геологического разреза, залегающие в интервале от дневной поверхности до глубин не менее 500 м. Данный интервал включает в себя породы чарской свиты, ичерской, метегерской, бордонской и джуктинской свит кембрия. На дневной поверхности обнажаются породы нижнего ордовика и нижней юры, в речных поймах распространены четвертичные образования (рис. 1).

Территория Якутии известна своими суровыми геокриологическими условиями. Это связано с низким радиационно-тепловым режимом горных пород и особенностями природной обстановки – географическим положением.

Изученные территории относятся к Лено-Анабарской геокриологической провинции, главной особенностью которой является глубокое залегание подошвы зоны отрицательных температур – криолитозоны [5]. В вертикальном разрезе криолитозона делится на ряд слоев (рис. 2). Верхний слой мощностью от нескольких сантиметров до 3–4 м носит название сезонно-талого. Он полностью промерзает зимой и оттаивает летом. Ниже слоя сезонного протаивания залегает постоянно

мерзлый грунт, то есть собственно вечная мерзлота. Примерно до глубины 15–20 м температура мерзлых горных пород меняется в течение года. Это слой годовых теплооборотов. Температура на его подошве характеризует тепловое состояние всей мерзлой и промерзающей толщи. Ниже расположена зона постоянных постепенно повышающихся температур вплоть до ее перехода в нулевую отметку. На определенном интервале глубин возможно и понижение температур, что свидетельствует о более суровых климатических условиях в прошлом [6].

Согласно карте распространения вечной мерзлоты на территории России А.В. Павлова, Г.В. Малковой, исследуемый район располагается на границе зон сплошного и прерывистого распространения многолетнемерзлых пород с температурами пород на подошве слоя годовых теплооборотов от -1 до -3 °C (рис. 3, а). В свою очередь, согласно схеме гидрогеологического районирования по Б.В. Боровицкому, территории исследования относятся к области распространения весьма мощной мерзлой зоны от 100–150 м на юго-западе Мирнинского структурного мыса в зоне его сочленения с Непским сводом до 200–250 м в пределах Маччобинского поднятия (рис. 3, б).

Согласно классификации С.В. Алексеева, территории относятся к Вилуй-Ботуобинской криогидрогеологической системе, расположенной на юге Якутской кимберлитовой (алмазоносной) провинции в пределах Ботуобинской седловины, разделяющей Тунгусскую и Вилуйскую синеклизы [2].

Криогидрогеологические системы представляют собой совокупность взаимосвязанных водоносных, водоупорных или воздушно-сухих горных пород, образующих целостную структуру и претерпевших существенные изменения под влиянием циклических процессов криогенеза [2]. Для них характерны уменьшение гидравлической емкости, наличие криогенных водоупоров, вод сезонно-талого слоя, вод таликов и таликовых зон, над-, меж-, внутри- и подмерзлотных подземных вод, особый режим их питания и разгрузки, специфика

¹ Тектоническая карта нефтегазоносных провинций Сибирской платформы. М-б 1:3500000 / под ред. В.С. Старосельцева. Новосибирск: СНИИГГиМС, 2018.

² Ulmishek G.F. Petroleum geology and resources of the Nepa-Botuoba High, Angara-Lena Terrace, and Cis-Patom Foredeep, southeastern Siberian Craton, Russia: report // Bulletin 2201-C. Washington, 2001. 16 p.

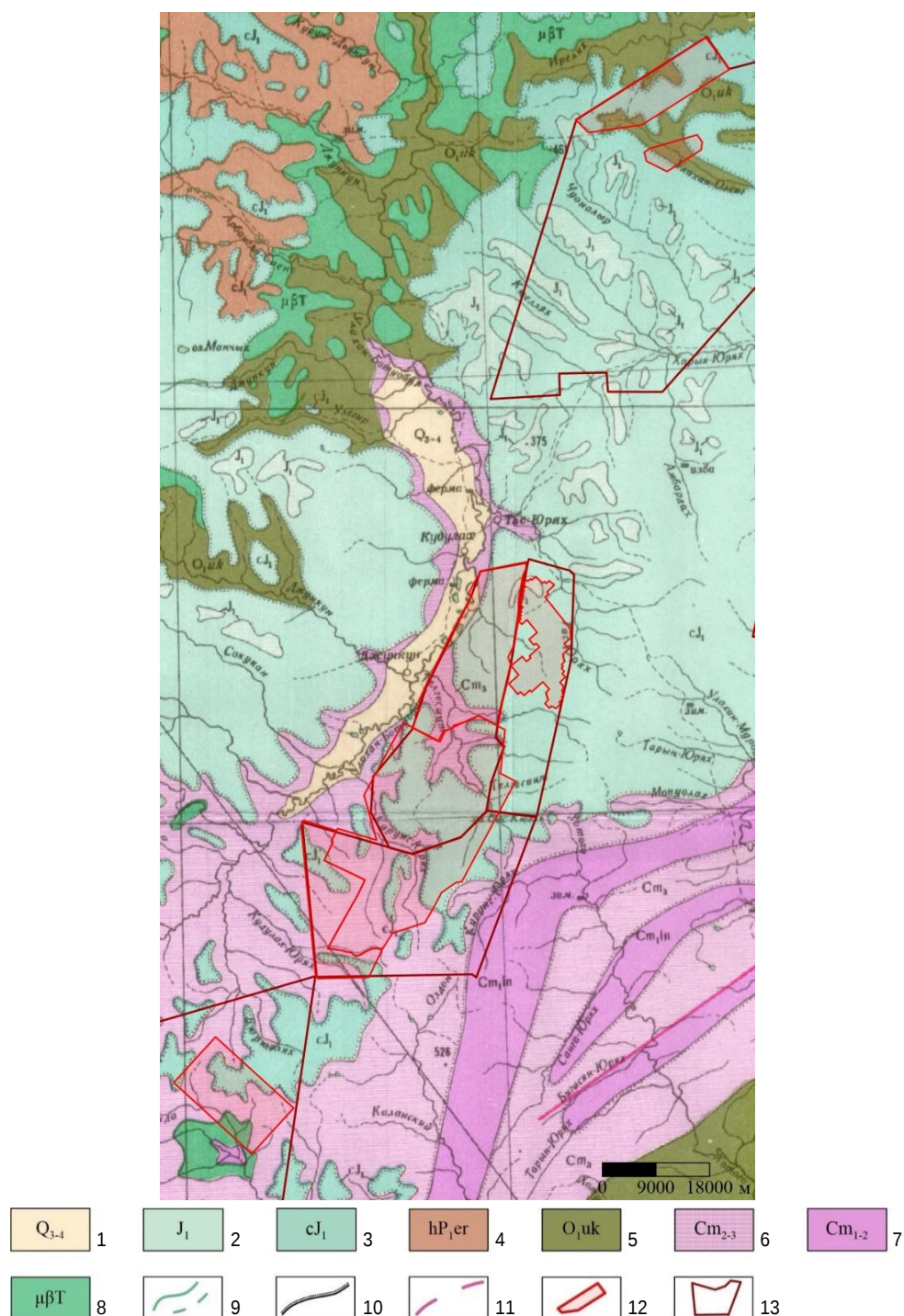


Рис. 1. Геологическая карта района исследований³:

1 – верхний и современный отделы четвертичной системы: аллювий пойм и надпойменных террас, пески, галечники, суглинки; 2 – морская свита нижнего отдела юрской системы: песчаники, глинистые сланцы, линзы известняков; 3 – нижняя континентальная свита нижнего отдела юрской системы: песчаники, пески, линзы и прослои конгломератов; 4 – ереминская свита нижнего отдела пермской системы; 5 – устькутская свита нижнего отдела ордовикской системы: доломиты, известняки, известковистые песчаники; 6 – джуктинская и бордонская свиты среднего – верхнего отдела кембрийской системы: мергели, глины, известковистые песчаники; 7 – метежерская и ичерская свиты нижнего – среднего отдела кембрийской системы: известняки, доломиты; 8 – пластовые и штокообразные интрузии траппов; 9 – линейные и кольцевые дайки траппов; 10 – контуры несогласно залегающих толщ; 11 – линии тектонических нарушений; 12 – участки детальных криогидрогеологических исследований методом малоглубинных зондирований становлением поля в ближней зоне; 13 – лицензионные участки

³ Геологическая карта. М-б 1:1000000. Лист Р-49 / сост. С.Ф. Павлов; ред. М.М. Одинцов. Иркутск, 1956.



Fig. 1. Geological map of the area under investigation³:

1 – upper and modern sections of the Quaternary System: alluvium of floodplains and terraces above floodplains, sands, pebbles, loams; 2 – marine formation of the lower part of the Jurassic System: sandstones, clay shales, limestone lenses; 3 – lower continental formation of the lower part of the Jurassic System: sandstones, sands, lenses and layers of conglomerates; 4 – Eremian Formation of the lower part of the Permian System; 5 – Ustkut Formation of the lower part of the Ordovician System: dolomites, limestones, calcareous sandstones; 6 – Dzhukhtinskaya and Bordonskaya Formations of the middle-upper section of the Cambrian System: marls, clays, calcareous sandstones; 7 – Metegerskaya and Icherskaya Formations of the lower-middle section of the Cambrian system: limestones, dolomites; 8 – sheet and stock-like intrusions of traps; 9 – linear and ring dikes of traps; 10 – contours of unconformably occurring strata; 11 – lines of tectonic faults; 12 – areas of detailed cryohydrogeological studies using the shallow near-field TEM method; 13 – license areas

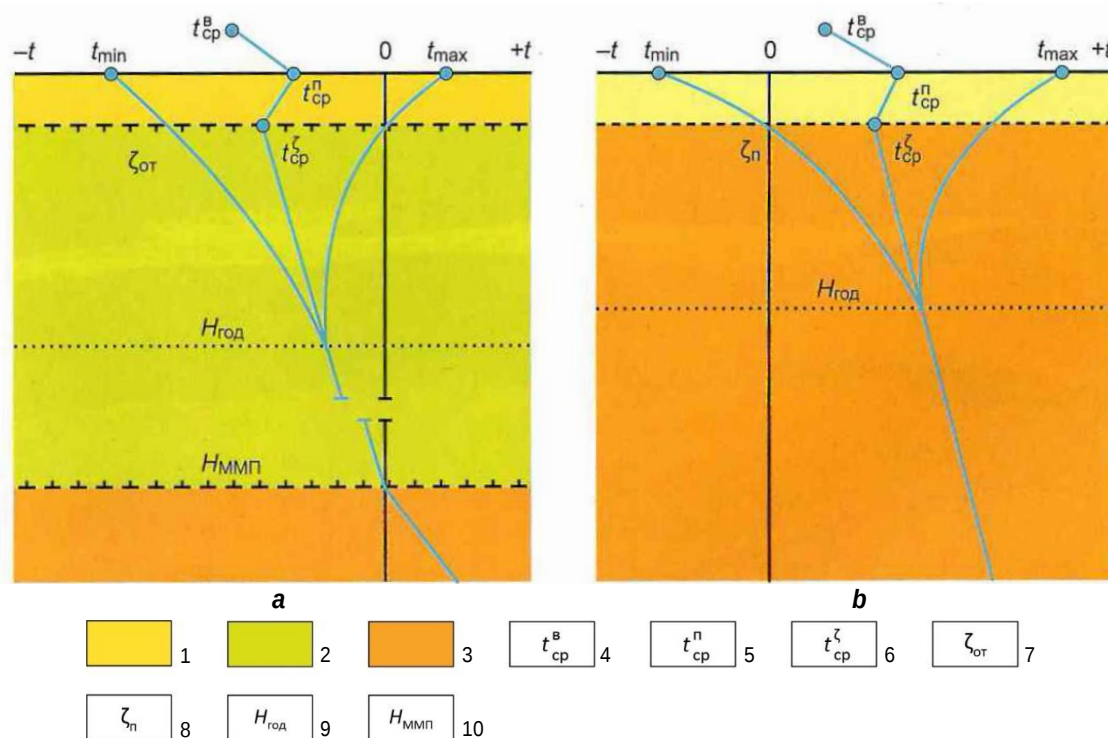


Рис. 2. Распределение температуры горных пород в области многолетнего (а) и сезонного (б) промерзания [1]:

1 – слой сезонного оттаивания (промерзания); 2 – постоянно мерзлый грунт – собственно вечная мерзлота; 3 – зона постоянных постепенно повышающихся температур; 4–6 – средние годовые температуры: 4 – воздуха, 5 – на поверхности покровов, 6 – на подошве слоя сезонного оттаивания (промерзания); 7–9 – глубина: 7 – сезонного оттаивания, 8 – сезонного промерзания, 9 – слоя годовых теплооборотов; 10 – мощность многолетнемерзлых горных пород

Fig. 2. Rock temperature distribution in the area of perennial (a) and seasonal (b) freezing [1]:

1 – layer of seasonal thawing (freezing); 2 – permanently frozen ground – permafrost; 3 – zone of constant, gradually increasing temperatures; 4–6 – average annual temperatures: 4 – air, 5 – on cover surface, 6 – at the bottom of the seasonal thawing (freezing) layer; 7–9 – depth of: 7 – seasonal thawing, 8 – seasonal freezing, 9 – layer of annual heat exchanges; 10 – thickness of permafrost rocks

химического состава, массо- и энергообмена, локализация подземного стока, частичное и полное прекращение водообмена. На протяжении всех холодных этапов развития Земли в пределах криогидрогеологических систем подземные воды и мерзлые горные породы находятся в тесной взаимосвязи и непрерывном взаимодействии.

В 2009 г. С.В. Алексеевым впервые предложены принципы систематизации и класси-

фикации криогидрогеологических систем. В своем труде «Криогидрогеологические системы Якутской алмазоносной провинции» [2] автор на основе многолетних (1981–2007 гг.) теоретических, полевых и экспериментальных исследований помимо выполнения многих других задач уточнил и детально охарактеризовал геологический, геокриологический и гидрогеологический разрезы основных криогидрогеологических систем Якутской алмазо-

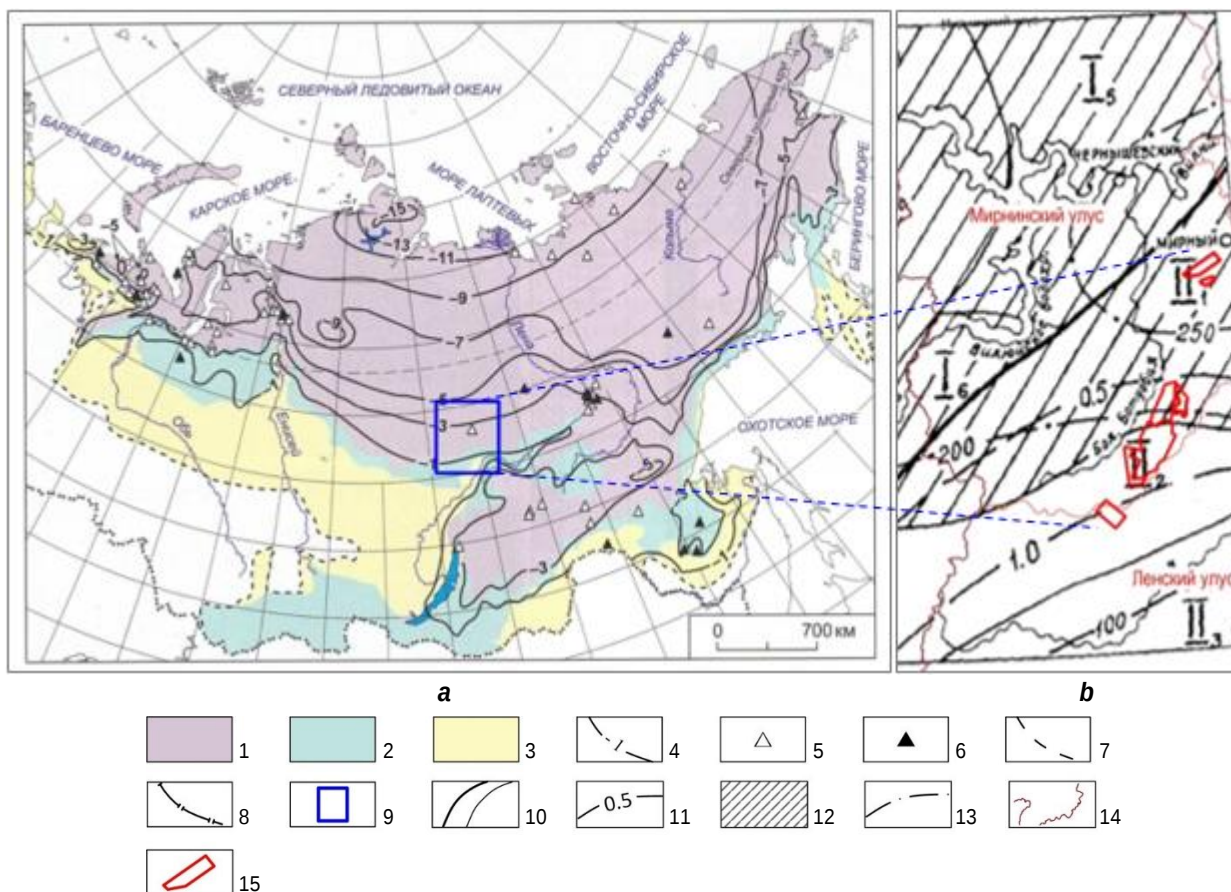


Рис. 3. Карта распространения вечной мерзлоты на территории России⁴ (а) и фрагмент схемы гидрогеологического районирования⁵ (б):

1–3 – типы вечной мерзлоты по степени прерывистости и площади распространения: 1 – сплошная (более 95 %), 2 – прерывистая (50–95 %), 3 – островная (менее 50 %); 4 – температура многолетнемерзлых пород на подошве слоя годовых теплооборотов на глубине 15–20 м, °С; 5, 6 – пункты мониторинговых наблюдений за состоянием криолитозоны: 5 – закрытые, 6 – действующие; 7 – южная граница распространения вечной мерзлоты; 8 – государственная граница Российской Федерации; 9 – район исследований; 10 – границы гидрогеологических площадей; 11 – модули подземного стока; 12 – область распространения сплошной толщи многолетнемерзлых пород; 13 – изолинии мощности многолетнемерзлых пород, м; 14 – административные границы; 15 – контуры детальных полевых исследований методом малоглубинных зондирований становлением поля в ближней зоне

Fig. 3. Map of permafrost distribution in Russia⁴ (a) and a fragment of the hydrogeological zoning scheme⁵ (b):

1–3 – types of permafrost according to the discontinuity degree and distribution area: 1 – continuous (more than 95 %), 2 – discontinuous (50–95 %), 3 – island (less than 50 %); 4 – temperature of permafrost at the bottom of the layer of annual heat transfers at the depth of 15 – 20 m, °C; 5, 6 – points of monitoring observations of the permafrost state: 5 – closed, 6 – operating; 7 – southern border of permafrost distribution; 8 – state border of the Russian Federation; 9 – study area; 10 – boundaries of hydrogeological areas; 11 – underground runoff modules; 12 – distribution area of continuous permafrost; 13 – isolines of permafrost thickness, m; 14 – administrative borders; 15 – contours of detailed field surveys by the shallow near-field TEM soundings

носной провинции, определил важнейшие этапы позднекайнозойской эволюции Анабарской, Оленек-Мархинской и Вилъю-Ботубинской криогидрогеологических систем в связи с динамикой климата, оледенениями и дегляци-

ацией, регрессиями и трансгрессиями моря. В ходе проведенного исследования был сделан вывод о том, что Вилъю-Ботубинская криогидрогеологическая система (как и Оленек-Мархинская) претерпевает техногенез горно-

⁴ Павлов А.В., Малкова Г.В. Современные изменения климата на севере России. Альбом мелкомасштабных карт. Новосибирск: Гео, 2005. 54 с.

⁵ Геологическая карта СССР. М-б 1:200000. Серия Верхне-Вилъюская. Лист Р-49-ХVIII / сост. Н.В. Кинд, М.П. Метелкина, В.В. Юдина; ред. А.А. Арсеньев. Объяснительная записка. М., 1990.



добывающего типа шахтного и карьерного подтипов, что приводит к серьезным нарушениям состояния и свойств горных пород, в том числе возникновению сложнопостроенного и напряженного температурного поля с большими значениями градиентов температуры, образованию мощных техногенных таликов, активизации опасных экзогенных геологических процессов [2].

Первые сведения о естественном температурном поле горных пород и мощности криолитозоны в пределах Вилуй-Ботуобинской криогидрогеологической системы получены в конце 1950-х гг. сотрудниками Института мерзлотоведения СО АН СССР (ныне Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН) [7–9]. По результатам геотермических наблюдений в скважинах установлено, что наиболее низкую ($-3,5^{\circ}\text{C}$) температуру горные породы имеют в днище лога Хабардина. По направлению к водоразделам она повышается. Восточнее трубки «Мир» температура пород составляет $-2,3\ldots-2,5^{\circ}\text{C}$, а западнее она повышается до $-1\ldots-1,5^{\circ}\text{C}$.

Большой объем замеров температуры горных пород в неглубоких (50–200 м) скважинах выполнен сотрудниками кафедры мерзлотоведения Московского ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени государственного университета им. М.В. Ломоносова (ныне Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова) в начале 1960-х гг.: выявлены основные закономерности формирования и пространственной изменчивости теплового поля многолетней мерзлоты в долинах р. Вилуй, Большая и Малая Ботуобия (Улахан-и Оччугуй-Ботуобия), составлены геотемпературные карты различных масштабов. Сделан вывод о том, что при равномерной крутизне склона температура многолетнемерзлых пород изменяется последовательно, обуславливая формирование своеобразных геотемпературных зон. Температурный режим в долинах крупных рек широтного простираения отличается большей контрастностью геокриологических условий, чем при меридиональной ориентировке водных артерий [10].

Огромный вклад в изучение температурного поля горных пород Вилуйско-Ботуобинской криогидрогеологической системы внесли

исследования научного коллектива уже упомянутого выше Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН. Для выполнения геотермических измерений использовались скважины, пробуренные Ботуобинской геолого-разведочной экспедицией ПНО «Якуталмаз» в пределах кимберлитовых трубок «Мир», «Интернациональная», «Амакинская», «Таежная» и на расстоянии 20–50 км от них, а также ряд скважин, пройденных Среднеленской нефтегазразведочной экспедицией ПГО «Ленанефтегазгеология» на Мирнинской, Отулахской, Нелбинской, Среднеботуобинской, Слюдякарской, Юрегинской и других газонфтяных разведочных площадях [11]. В результате исследований было изучено температурное поле горных пород, что позволило уточнить и расширить представления о тепловом состоянии мерзлых толщ, геотермическом градиенте, теплопроводности горных пород, тепловом потоке и мощности криолитозоны в Вилуй-Ботуобинской криогидрогеологической системе [11–17].

В рамках работ по ведению мониторинга подземных вод на площади Мало-Ботуобинского алмазоносного района за 2007–2009 гг. Мирнинской геологоразведочной экспедицией АК «АЛРОСА» выполнялись наблюдения за температурным режимом. Цель прослеживания изменения температур по площади и во времени заключалась в выявлении взаимосвязи температурного поля с гидрогеологическими факторами. Замеры температуры проводились по 3 скважинам региональной режимной сети, 21 скважине системы обратной закачки рудника «Мир» и по 13 скважинам узла обратной закачки рудника «Интернациональный». Сделаны выводы о том, что границы залегания минимальной температуры не всегда постоянны, а изменяются во времени, что позволяет увязывать все изменения температурного поля с колебаниями температур на поверхности (в зависимости от среднемесячных и среднегодовых колебаний температур). Максимум отрицательной температуры и глубина его залегания связаны с расчлененностью рельефа. В долинах крупных рек отмечается самая низкая температура $-3,7\ldots-4,7^{\circ}\text{C}$, глубина залегания максимума – 60–80 м. На склонах и водоразделах макси-



мум отрицательной температуры составляет $-1...-2^{\circ}\text{C}$, глубина его залегания – 100–200 м, вниз по разрезу наблюдается постепенное увеличение температуры. Средняя величина геотермических градиентов по всему исследуемому разрезу составляет $0,35^{\circ}\text{C}$ на 100 м. Ниже нулевой изотермы с ростом глубины температура принимает положительные значения. Установлено, что глубина залегания многолетнемерзлых пород в районе колеблется от 164 до 490 м. Максимальная мощность пород с отрицательной температурой достигает 730–740 м и приурочена к трубкам «Мир» и «Интернациональная». Отмечена стабилизация в температурных замерах по скважинам опорной режимной сети и потепление на $0,2-0,9^{\circ}\text{C}$ по скважинам системы обратной закачки и узла обратной закачки, что связано с захоронением дренажных вод, смешанных шахтных вод и промстоков⁶.

Вопросы применения геофизических работ при поисках и разведке месторождений подземных вод были подробно освещены в 1982 г. И.М. Мельникановицким и др. в книге «Методика геофизических исследований при поисках и разведке месторождений пресных вод» [18], где особая роль была отведена исследованию месторождений в криолитозоне. Отрицательная температура, обуславливающая образование мерзлых пород, способствует существенному изменению их физических свойств. Практически это особенно заметно при проведении геоэлектрических, сейсмических и температурных исследований [18]. Авторами отмечалось широкое практическое применение методов электроразведки постоянным током – электропрофилирования, вертикальных электрических зондирования в различных модификациях. Методы электроразведки, использующие высокочастотные электромагнитные поля или неустановившиеся процессы становления электрического поля, в том числе частотного зондирования, вертикальных электрических зондирования с измерением вызванной поляризации и непосредственно зондирования становлением поля

в ближней зоне, только набирали популярность, особенно за рубежом – в Канаде и на Аляске⁷. Как отмечали авторы, практика подтверждает высокую эффективность этих методов, для которых ни слой сезонного протаивания, ни высокоомная толща многолетнемерзлых пород не являются помехой.

Материалы и методы исследования

На сегодняшний день метод мЗСБ зарекомендовал себя как эффективный способ изучения криогидрогеологических условий – многолетней мерзлоты и водоносных горизонтов в Арктической зоне России, в том числе на территории Республики Саха (Якутия). Данный метод основан на изучении электромагнитного поля, устанавливающегося в земной коре при резком изменении тока в источнике. Выключение тока в генераторной петле вызывает появление индукционных токов, распространяющихся от дневной поверхности на глубину. Становление поля представляет собой процесс затухания вихревых токов, который зависит от проводимости и геометрических параметров слоев. Затухающие вихревые токи создают вторичное магнитное поле, а его скорость изменения во времени измеряется с помощью приемных датчиков [19, 20].

Малоглубинные электроразведочные работы методом мЗСБ позволяют изучить геоэлектрическое строение разреза до глубин порядка 500 м, а затем на основе петрофизических закономерностей и данных бурения скважин увязать геоэлектрические горизонты с теми или иными геологическими, гидрогеологическими объектами и проследить их распространение по площади и в разрезе. Данная методика апробирована и применяется на северных, арктических территориях Западной и Восточной Сибири. Общий объем исследований на территории Восточной Сибири на сегодняшний день составляет 108059 физических наблюдений, из них на территории Республики Саха (Якутии) – 27282 физических наблюдений.

⁶ Власова Т.А. Отчет о результатах работ по ведению мониторинга подземных вод на площади Мало-Ботуобинского алмазоносного района и прилегающей территории за 2007 – 2009 гг. (режимная партия). Мирный, 2010. 165 с.

⁷ McNeill J.D. Application of transient electromagnetic techniques: technical note TN-7. Missasauga: Geonics Limited, 1980. 17 p.



Предпосылки криогидрогеологического картирования многолетнемерзлых пород и обнаружения обводненных таликов по данным малоглубинных зондирований становлением поля в ближней зоне. Возможность картирования многолетнемерзлых пород и прогнозирования водообильных таликовых зон по данным мЗСБ основана на высокой контрастности пород в мерзлом и талом состояниях [21]. При замерзании сопротивление горных пород существенно возрастает, так как свободная вода становится практически изолятором, а электропроводность определяется лишь связанной водой, которая замерзает при очень низких температурах (ниже -50°C).

Возрастание удельных электрических сопротивлений (УЭС) при замерзании пород различно: в несколько раз оно увеличивается у

глин, до 10 раз – у скальных пород, до 100 раз – у суглинков и супесей и до 1000 и более раз – у песков и грубообломочных пород (рис. 4).

Многолетнемерзлые породы и породы сезонного промерзания сильно охлаждены и имеют повышенную льдистость, что определяет высокие значения электрического сопротивления и может служить индикатором для выявления многолетнемерзлых пород, проявляясь в числе прочего на результатах измерений в виде кратковременных процессов индукционно вызванной поляризации (ВПИ). Известно, что ВПИ может быть связана с разнообразными объектами: вкраплением в ионопроводящую среду электронно-проводящих минералов, системы пор разного диаметра с содержащимися в них водными растворами электролитов, «привязанными к стенкам пор

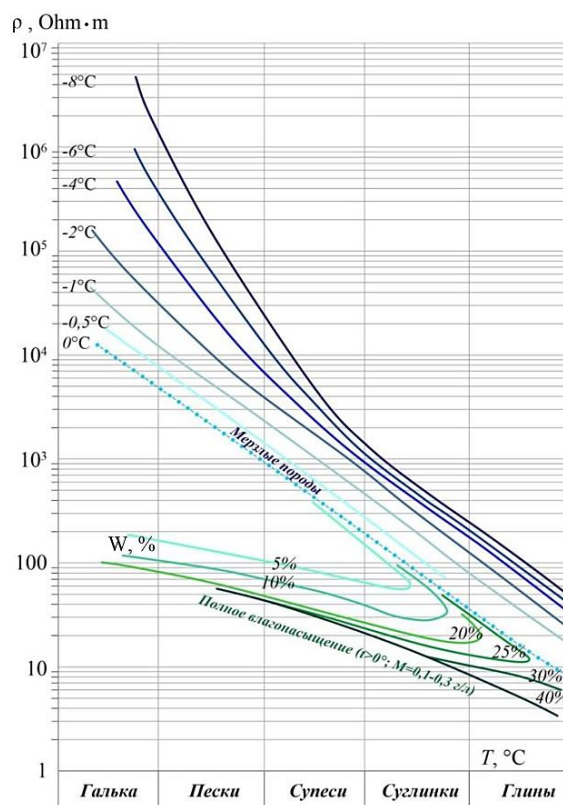


Рис. 4. Приближенная зависимость удельного электрического сопротивления многолетнемерзлых пород от состава и температуры, а также удельного электрического сопротивления талых пород от состава и влажности⁸:

ρ – удельное электрическое сопротивление, Ом·м; T – температура, $^{\circ}\text{C}$; W – влажность горных пород, %

Fig. 4. Approximate dependence of the permafrost rock specific electrical resistivity on rock composition and temperature, and dependence of the specific electrical resistivity of thawed rocks on rock composition and moisture content⁸:

ρ – specific electrical resistivity, Ohm·m; T – temperature, $^{\circ}\text{C}$; W – moisture content of rocks, %

⁸ Боголюбов А.Н., Боголюбова Н.П., Мозганова Е.Я. Рекомендации по комплексированию геофизических методов при мерзлотной съемке. М.: Стройиздат, 1987. 88 с.



и поверхности глинистых частиц двойными электрическими слоями, включениями льда» [22]. На территории Якутии ВПИ связывается с распространением многолетнемерзлых глин юрского и верхнепалеозойского возрастов [23].

Области развития талых пород на геоэлектрических разрезах, напротив, проявляются в виде различной конфигурации «врезов», относительных проводников электрического тока в первые десятки Ом·м в однородный массив мерзлых (высокоомных) пород. Так, по данным Т.Я. Карпенко 1976 г., песчаные отложения таликовых зон Центральной Якутии при температуре около 0 °С и пористости 35–42 % характеризуются сопротивлением, меняющимся от 70–80 до 20–25 Ом·м, при минерализации, варьирующей от 0,5 до 3 г/л [18]. Кроме того, талые породы сопровождаются пониженными показаниями или отсутствием эффектов ВПИ на кривых мЗСБ.

По данным мЗСБ, на изученных территориях многолетнемерзлые породы сопровождаются повышенными значениями сопротивления, образуют контрастную геоэлектрическую границу между мерзлыми породами с УЭС более 100–500 Ом·м и охлажденными терригенными образованиями верхоленской серии (джуктинской и бордонской свит) с УЭС 10–60 Ом·м (рис. 5).

По данным геофизических исследований глубоких разведочных скважин, фиксируемая толща сопровождается максимумами диаметра скважины и акустического каротажа. В приведенном ниже примере отмечается увеличение диаметра скважины до 300–450 мм (при номинальном диаметре 219 мм), а также максимумы показаний акустического каротажа до 400–500 мкс/м. В 1976–1977 гг. Б.В. Володько и А.М. Мусиным установлено, что при бурении мерзлых пород диаметр скважины резко меняется вследствие вытаивания льдистых образований, в то время как в талых породах он сохраняется сравнительно постоянным [18].

Нижележащие породы также могут относиться к зоне отрицательных температур, представляя собой ярус охлажденных пород, глубину залегания подошвы которого достоверно возможно определить лишь при проведении термометрии с соблюдением «выстой-

ки» скважины. По материалам термокаротажа известно, что в северной части Мирнинского структурного мыса толщина распространения зоны отрицательных температур составляет 500–600 м, наибольших значений 730–740 м она достигает в районе кимберлитовых трубок «Мир» и «Интернациональная».

Результаты детализации строения многолетнемерзлых пород на примере объектов детальных исследований в западной части Якутского артезианского бассейна. Картирование яруса многолетнемерзлых пород имеет практическое значение при прогнозировании условий бурения, поскольку льдистые породы могут приводить к осложнениям в виде разрушения стенок скважины, прихватов бурового инструмента, газопроявлений. Для изучения глубины залегания подошвы многолетнемерзлых пород использовались материалы бурения гидрогеологических скважин.

Большой объем данных по 37 скважинам имеется на севере и северо-востоке района исследований по результатам региональной оценки режима, динамики, ресурсов и баланса подземных вод на территории Западной Якутии, в том числе контроля за использованием и охраной подземных вод 1986–1990 гг. (ПГО «Якутскгеология»), а также мониторинговых исследований Мало-Ботуобинского алмазоносного района и прилегающей территории 2007–2009 гг. (АК «АПРОСА»).

Поскольку объектами исследований мЗСБ являются нефтегазоперспективные территории или действующие месторождения, важно заметить, что на сегодняшний день среди месторождений углеводородов наиболее изученным температурными исследованиями в скважинах является Среднеботуобинское нефтегазоконденсатное месторождение, на котором фонд скважин, охарактеризованных термометрией, составляет не менее 30, «выстойка» скважин составляет от трех суток. Такие данные позволяют получить приближенное представление о глубине залегания многолетнемерзлых пород, но не о естественной температуре, так как тепловой режим после бурения и испытания не стабилизирован.

В области криолитозоны бурение с промывочными жидкостями ведет к значительному отеплению горных пород вокруг скважины –

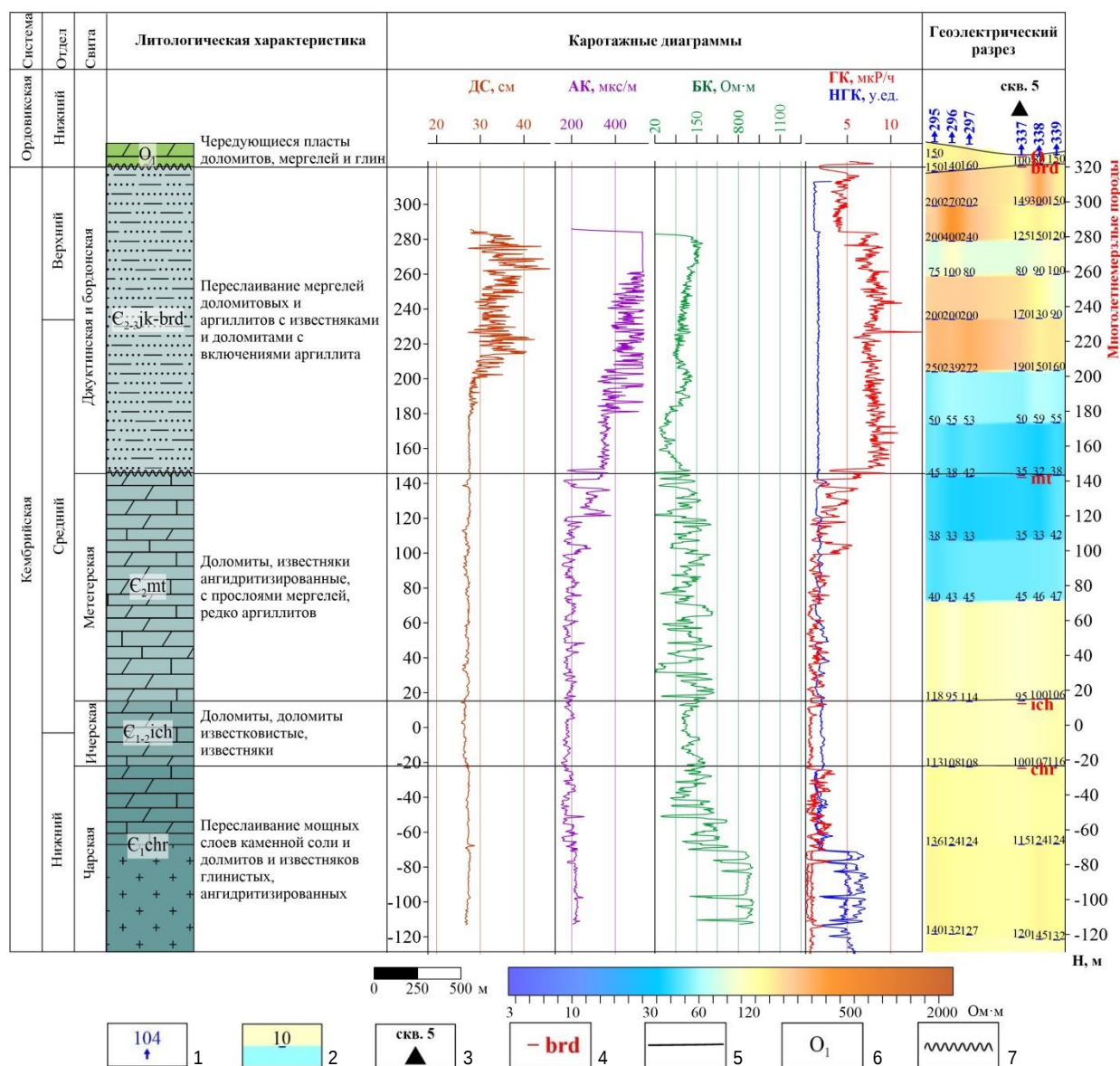


Рис. 5. Отображение многолетнемерзлых пород в геофизических полях по данным геофизических исследований скважин и малоуглубленных зондирований становлением поля в ближней зоне:

1 – пункты малоуглубинных зондирований становлением поля в ближней зоне; 2 – геоэлектрические слои и значения продольного сопротивления, Ом·м; 3 – скважина глубокого бурения; 4 – стратиграфические отбивки в скважине; 5 – границы стратиграфических комплексов; 6 – стратиграфические индексы; 7 – перерывы в осадконакоплении

Fig. 5. Permafrost rocks imaging in geophysical fields according to well logging and shallow near-field TEM sounding data:

1 – points of shallow near-field TEM sounding; 2 – geoelectric layers and values of longitudinal resistivity, Ohm·m;
3 – deep-hole well; 4 – stratigraphic toppings in the well; 5 – boundaries of stratigraphic complexes;
6 – stratigraphic indices; 7 – sedimentation breaks

настолько сильному, что на термограмме, снятой сразу после окончания бурения, мерзлая толща с отрицательными температурами не проявляется (рис. 6, кривая 1). В зависимости от длительности и характера бурения температура оказывается завышенной на 2–8 °С, а градиент – заниженным на 30–60 % по сравнению с их равновесными значениями. Про-

цесс восстановления нарушенного теплового режима мерзлых горных пород предполагает три основных этапа: понижение температуры до точки замерзания трещинно-поровой воды, промерзание оттаявших вокруг скважины пород, восстановление естественной отрицательной температуры мерзлых горных пород [24].

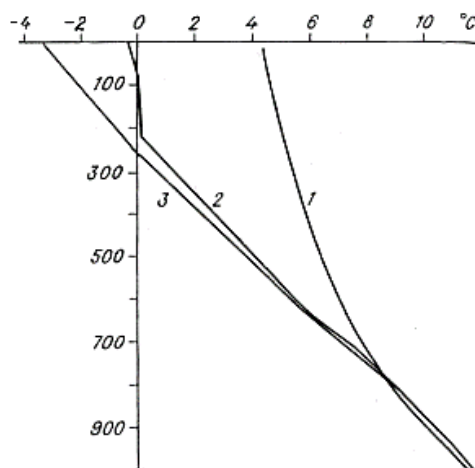


Рис. 6. Стадии восстановления температурного режима скважины после бурения [24]:

1 – сразу после окончания бурения; 2 – в период промерзания оттаявшего слоя;

3 – равновесное температурное состояние

Fig. 6. Stages of temperature regime restoration in the well after drilling [24]:

1 – immediately after the completion of drilling; 2 – during the freezing period of the thawed layer;

3 – equilibrium temperature state

Длительность первого этапа невелика (несколько дней), так как нарушенное тепловое поле резко нестационарно и быстро восстанавливается при прекращении действия теплового источника. Наиболее длительным является процесс промерзания пород вокруг скважины, требующий большого количества холода, поступающего из мерзлой толщи. Полная тепловая «выстойка» скважины наступает только после промерзания всего оттаявшего вокруг скважины слоя пород. Общее время восстановления нарушенного теплового равновесия зависит от скорости циркуляции и температуры бурового раствора, льдистости, температуры и тепловых свойств горных пород, времени бурения скважины. Согласно В.Т. Балобаеву и др., в среднем можно считать, что в мерзлой осадочной толще температура в скважине выстаивается в пять раз дольше времени ее бурения. Дольше всего восстанавливается температура вблизи нижней фазовой границы, так как в этой области запасы холода минимальны, а протаивание пород при бурении максимально [24].

Как отмечалось ранее, согласно данным мЗСБ, распространение мерзлых пород фиксируется по высоким значениям УЭС в сотни Ом·м и проявлению быстропотекающих процессов ВПИ. Полученная по данным мЗСБ информация о геоэлектрическом строении позволила отследить особенности строения криогидрогеологических систем, в том числе мно-

голетней мерзлоты, и размещения водоносных горизонтов в пределах локальных структур Мирнинского структурного мыса и прилегающих территорий.

В пределах Маччобинского локального поднятия на севере Мирнинского структурного мыса, согласно данным мЗСБ, фиксируется неоднородное строение высокоомной толщи, связанной с мерзлыми породами, которая состоит из двух, иногда трех слоев (рис. 7). Верхний слой характеризуется УЭС 100–350 Ом·м, охватывает нижнеюрские, нижнеордовикские отложения и верхние горизонты верхоленского комплекса (джуктинской и бордонской свит) среднего – верхнего кембрия. Глубина залегания подошвы верхнего слоя изменяется от 80 до 200 м. Внутри верхнего слоя встречаются маломощные линзы пород с пониженными значениями УЭС в первые десятки Ом·м. Линзы располагаются под речными долинами и свидетельствуют о наличии талых пород. Данные локальные объекты на территории бурением не изучены.

На отдельных участках верхний слой подстилается проводящим интервалом с УЭС 10–20 Ом·м и мощностью 20–50 м в бордонской свите. Пониженные значения УЭС в данном интервале могут быть связаны как с увеличением глинистой составляющей в составе пород, так и с присутствием в разрезе многолетнемерзлых пород минерализованных подземных вод отрицательной температуры. В ряде

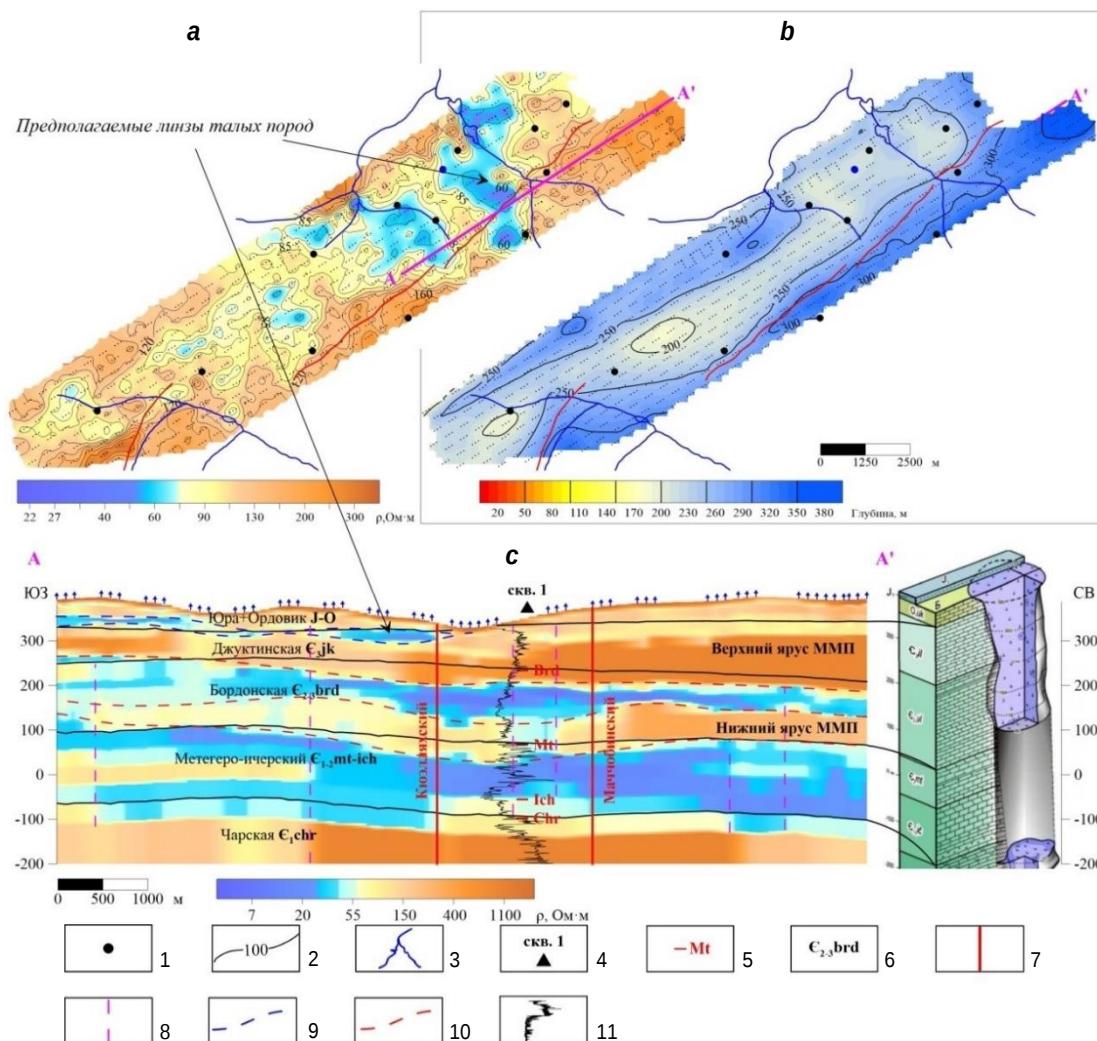


Рис. 7. Определение глубины залегания подошвы многолетнемерзлых пород на одном из объектов детальных исследований криогидрогеологического строения в южной части Вилуй-Ботубинской криогидрогеологической системы:

а – отображение зон развития талых пород среди юры, ордовика и верхнего кембрия на карте параметра удельного электрического сопротивления; б – результирующая карта глубины залегания подошвы многолетнемерзлых пород; с – отображение в разрезе верхней части осадочного чехла водоупорных и водопродводящих пород по данным малоглубинных зондирований становлением поля в ближней зоне: 1 – скважины глубокого бурения; 2 – изолинии продольного сопротивления, Ом·м / изогипсы подошвы многолетнемерзлых пород, м; 3 – гидросеть; 4 – скважина глубокого бурения; 5 – стратиграфические отбивки в скважинах; 6 – индексы стратиграфических подразделений; 7 – тектонические нарушения, известные по данным сейсморазведки; 8 – тектонические нарушения, предполагаемые по данным малоглубинных зондирований становлением поля в ближней зоне; 9 – границы горизонтов с пониженными значениями сопротивления по данным малоглубинных зондирований становлением поля в ближней зоне; 10 – границы слоев с повышенными значениями сопротивления, связанных с многолетнемерзлыми породами по данным малоглубинных зондирований становлением поля в ближней зоне; 11 – диаграмма бокового каротажа

Fig. 7. Determination of the permafrost base depth at one of the objects of detailed studies of the cryohydrogeological structure in the southern part of the Vilyui-Botuoba zone of the cryohydrogeological system:

а – display of thawed rock development zones among the Jurassic, Ordovician and Upper Cambrian on the map of the specific electrical resistance parameter; б – resulting map of the permafrost base depth; с – display in the section of the upper part of the sedimentary cover of water-resistant and water-conducting rocks according to the data of shallow near-field TEM soundings: 1 – deep-hole wells; 2 – isolines of longitudinal resistivity, Ohm·m / isohypses of the permafrost base, m; 3 – hydrogeological network; 4 – a deep-hole well; 5 – stratigraphic topplings in wells; 6 – indices of stratigraphic units; 7 – tectonic faults known from seismic survey data; 8 – tectonic faults, assumed according to the shallow near-field TEM sounding data; 9 – boundaries of the horizons with reduced resistivity values according to the shallow near-field TEM sounding data; 10 – boundaries of layers with increased resistance values associated with permafrost rocks according to the shallow near-field TEM sounding data; 11 – lateral logging diagram



скважин района среди пород среднего – верхнего кембрия вскрываются трещинно-пластовые напорные воды. Величина напоров составляет от 20 до 80 м, глубина залегания – от 82 до 209 м. Воды в них сульфатно-хлоридные натриевые, минерализация – 13–32 г/л.

Второй слой высокоомных пород картируется на глубинах 240–380 м и обладает мощностью 30–100 м, с его подошвой связывается подошва многолетнемерзлых пород. Погружение подошвы и увеличение общей мощности многолетнемерзлых пород картируется вдоль простирания глубинных региональных разломов Вилуйско-Мархинского комплекса северо-восточного простирания. В 1–2 км к северо-востоку от площади известно несколько кимберлитовых трубок, внедрявшихся в доюрское время по данной системе разломов. Наибольшая глубина залегания подошвы мерзлоты 330–380 м зафиксирована, согласно результатам электроразведочных исследований, в северо-восточной оконечности площади в непосредственной близости от поля кимберлитовых трубок.

Таким образом, на самой северной из изученных площадей Якутии в пределах Маччобинского локального поднятия мерзлота охватывает нижнеюрские и нижнеордовикские отложения, джуктинскую и бордонскую свиты среднего – верхнего кембрия практически на всю мощность (см. рис. 7), глубина залегания подошвы многолетнемерзлых пород варьирует в пределах 240–380 м. Полученные данные согласуются с результатами мониторинговых исследований Мало-Ботуобинского алмазоносного района⁹, согласно которым мощность многолетнемерзлых пород здесь может достигать 300–400 м, а температура – -2,3...-2,7 °С.

На основе использования имеющейся информации по 75 гидрогеологическим скважинам и 9 площадям детальных криогидрогеологических исследований методом мЗСБ была составлена общая карта глубины залегания подошвы многолетнемерзлых пород, демонстрирующая в числе прочего неравномерность геотермической изученности района (рис. 8). В зонах отсутствия скважинной ин-

формации был использован тренд со схемы гидрогеологического районирования по Б.В. Боровицкому¹⁰. Полученная карта согласуется с региональными представлениями, в частности с тенденцией к увеличению мощности многолетнемерзлых пород в северо-восточном направлении.

Полученные материалы позволяют существенно уточнить морфологию многолетнемерзлых пород в межскважинном пространстве, при детальном рассмотрении выявить в разрезе водоносные таликовые зоны и рекомендовать их изучение гидрогеологическими скважинами (рис. 9).

В направлении с северо-востока на юго-запад мощность многолетнемерзлых пород и глубина залегания их подошвы постепенно сокращаются (см. рис. 9, а–е).

На юго-западе изучаемой территории (в зоне сочленения Мирнинского выступа и Непского свода) в разрезе сохраняется лишь верхний высокоомный слой многолетнемерзлых пород с УЭС 100–250 Ом·м, он охватывает верхнюю часть бордонской свиты, сохранившиеся маломощные образования юры и ордовика, а также четвертичные отложения, развитые по долинам рек. Мощность многолетнемерзлых пород здесь подчиняется геоморфологическим особенностям территории – достигает 140–200 м на водораздельных поверхностях, уменьшается до первых десятков метров в долинах рек и сокращается до полного отсутствия в участках развития сквозных таликов. Примером является сквозной талик в долине руч. Кудулах. Удельный дебит притока составляет 2 л/с, воды слабоминерализованные до 2,1 г/л, используются для технических нужд. Происхождение данного талика предположительно связывается с тектоническим нарушением, пересекающим долину, способствующим отепляющему действию восходящих подземных вод, разгружающихся в водоток. Сквозной талик приурочен к терригенным отложениям верхоленского комплекса (бордонской свиты), которые на преобладающей части территории заморожены до глубин 140–200 м.

⁹ Власова Т.А. Отчет о результатах работ по ведению мониторинга подземных вод на площади Мало-Ботуобинского алмазоносного района и прилегающей территории за 2007 – 2009 гг. (режимная партия). Мирный, 2010. 165 с.

¹⁰ Геологическая карта СССР. М-б 1:200000. Серия Верхне-Вилуйская. Лист Р-49-ХVIII / сост. Н.В. Кинд, М.П. Метелкина, В.В. Юдина; ред. А.А. Арсеньев. Объяснительная записка. М., 1990.

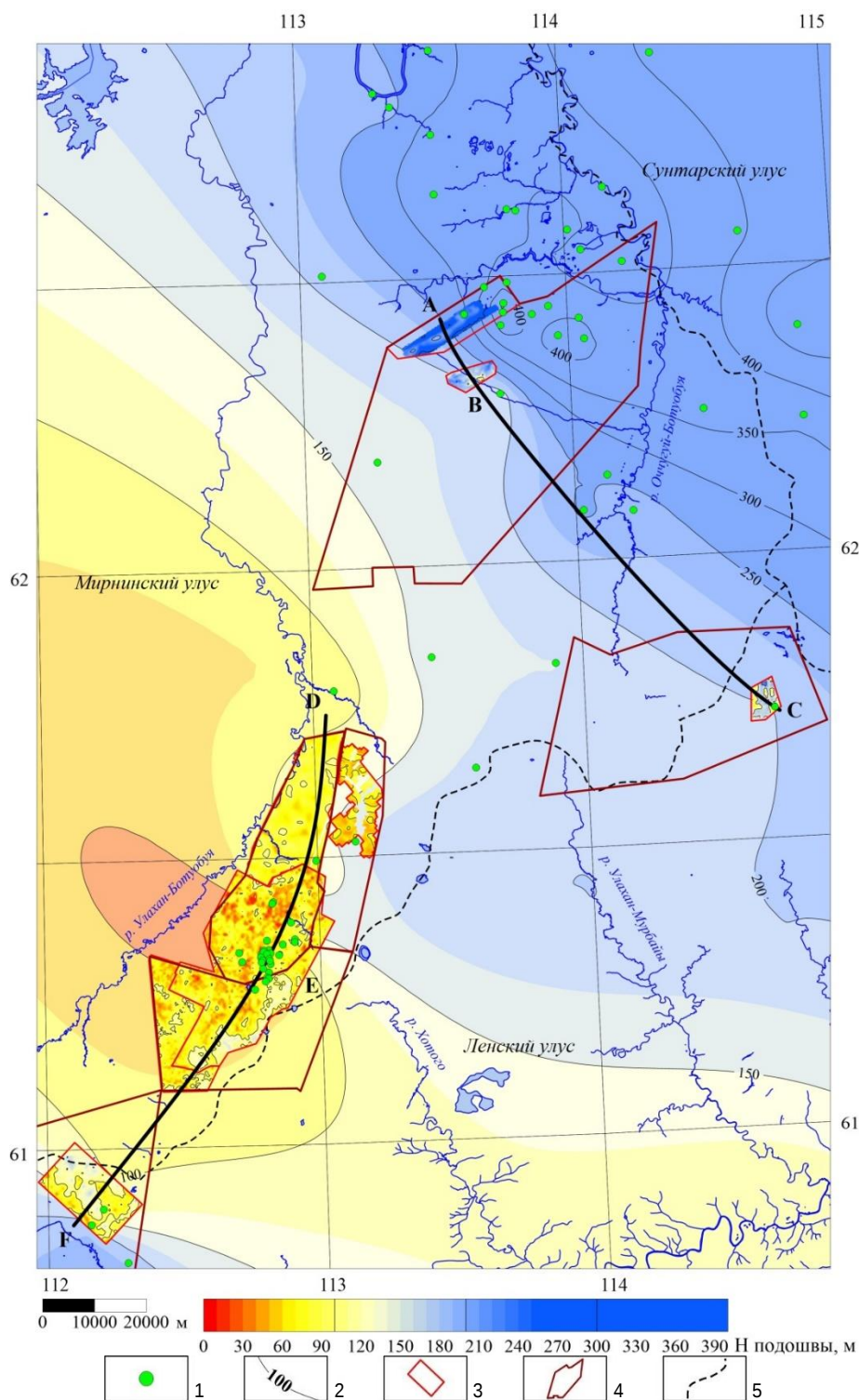


Рис. 8. Результирующая карта глубин залегания подошвы многолетнемерзлых пород по данным гидрогеологических скважин и криогидрогеологических исследований с применением малоглубинных зондирований становлением поля в ближней зоне:

1 – гидрогеологические скважины с замера мощности многолетнемерзлых пород и гидрогеологических параметров водоносных горизонтов; 2 – изогипсы подошвы многолетнемерзлых пород, м; 3 – контуры работ малоглубинных зондирований становлением поля в ближней зоне; 4 – контуры лицензионных участков; 5 – административные границы

Fig. 8. Resulting map of permafrost base depths according to the data of hydrogeological wells and cryohydrogeological studies by shallow near-field TEM sounding:

1 – hydrogeological wells with measured permafrost thickness and hydrogeological parameters of aquifers; 2 – isohypses of the permafrost base, m; 3 – contours of the shallow near-field TEM soundings; 4 – contours of licensed areas; 5 – administrative boundaries

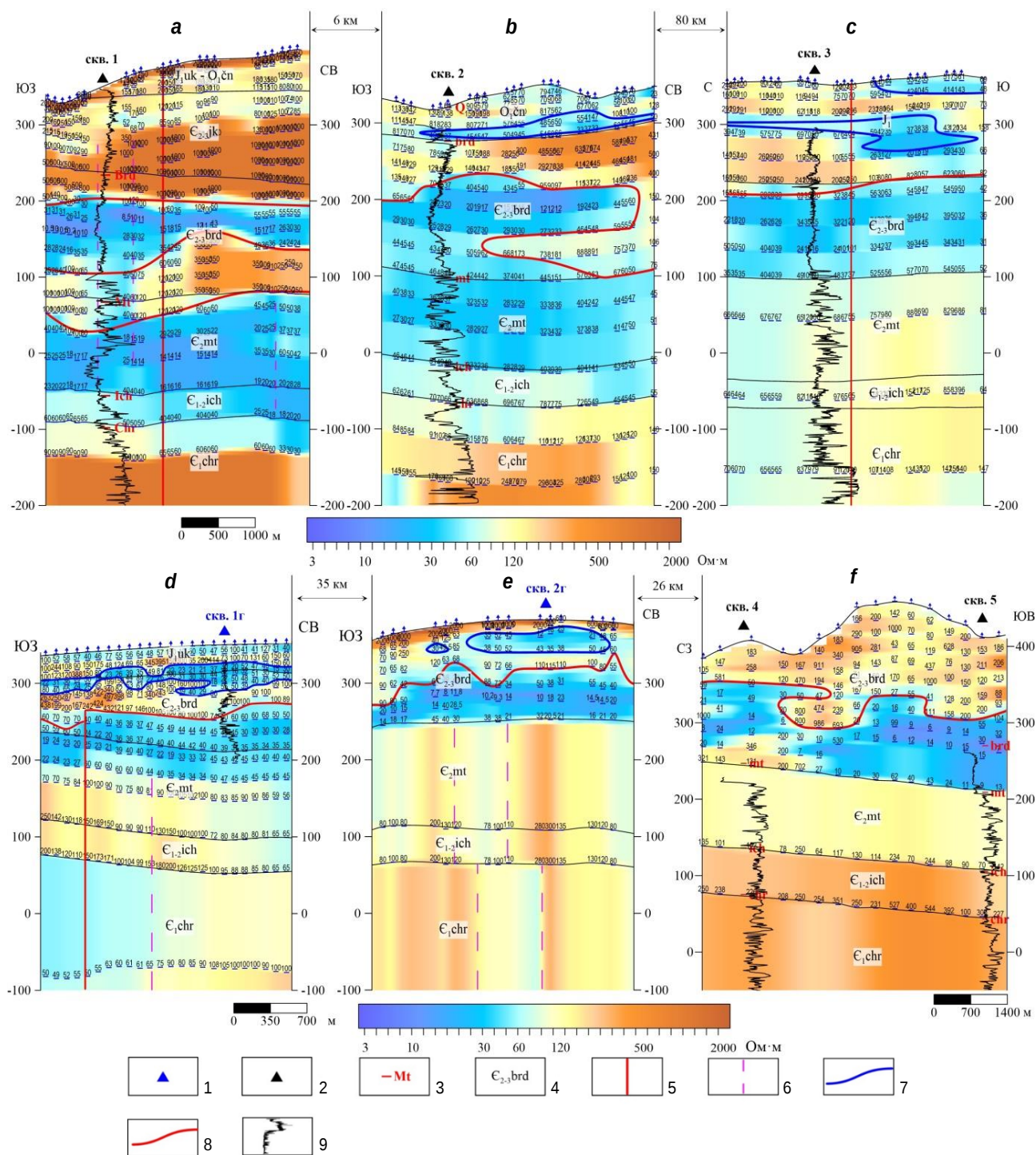


Рис. 9. Фрагменты типовых геоэлектрических разрезов, отображающих криогидрогеологические условия верхней части разреза:

a – северная оконечность Мирнинского структурного мыса; *b* – Мирнинская брахиантиклиналь; *c* – Иктехское куполовидное поднятие; *d* – северная часть Среднеботубинской антиклинали; *e* – центральная часть Среднеботубинской антиклинали; *f* – область сочленения Непского свода и Мирнинского структурного мыса:

1 – гидрогеологические скважины; 2 – скважины глубокого бурения; 3 – стратиграфические отбивки в скважинах; 4 – индексы стратиграфических подразделений; 5 – тектонические нарушения, известные по данным сейсморазведки; 6 – тектонические нарушения, предполагаемые по данным малоглубинных зондирований становлением поля в ближней зоне; 7 – границы горизонтов с пониженными значениями сопротивления по данным малоглубинных зондирований становлением поля в ближней зоне; 8 – границы слоев с повышенными значениями сопротивления, связанных с многолетнемерзлыми породами по данным малоглубинных зондирований становлением поля в ближней зоне; 9 – диаграммы бокового каротажа



Fig. 9. Fragments of typical geoelectric sections showing the cryohydrogeological conditions of the upper part of the section:

a – northern extremity of the Mirny structural cape; b – Mirny brachianticline; c – Iktekh dome-shaped uplift; d – northern part of the Middle Botuoba anticline; e – central part of the Middle Botuoba anticline; f – the junction area of the Nepa arch and the Mirny structural cape:

1 – hydrogeological wells; 2 – deep-hole wells; 3 – stratigraphic toppings in wells; 4 – indices of stratigraphic units; 5 – tectonic faults known from seismic survey data; 6 – tectonic faults, assumed according to the shallow near-field TEM soundings data; 7 – boundaries of the horizons with reduced resistivity values according to the shallow near-field TEM soundings data; 8 – boundaries of layers with increased resistance values associated with permafrost rocks according to the shallow near-field TEM sounding data; 9 – lateral logging diagrams

Минимумы глубины залегания многолетнемерзлых пород фиксируются на территории Среднеботуобинского месторождения. По данным термометрии, температура пород в зоне многолетней мерзлоты здесь изменяется от 0 до -2,3 °C и преимущественно держится на близких к 0 величинах (вероятно, по причине недостаточной выстойки скважин). Глубина их залегания варьирует от 0 до 90 м, в единичных скважинах достигая 160 и 175 м.

По данным анализа геоэлектрического строения, а также температурных исследований, в гидрогеологических скважинах отмечается аномалия в строении мерзлоты и криолитозоны в целом в центральной части Среднеботуобинского локального поднятия, где мощность многолетнемерзлых пород сокращается до 40–90 м и полного отсутствия на фоне 100–150 м, свойственным рассматриваемому району.

В связи с данной аномалией в центральных частях структуры развиты таликовые зоны, вмещающие пресные воды, удельные дебиты притоков составляют 2,5–5,9 л/с, способны обеспечивать техническое водоснабжение и систему поддержания пластового давления. Пример выделения таликовой зоны в геоэлектрическом разрезе приведен на рис. 10. Наличие таликовых вод на территории месторождения было установлено в 2015 г., их распространение в плане было околонушено по результатам бурения с учетом данных мЗСБ в период 2016–2017 гг. С 2017 г. начата промышленная эксплуатация Среднеботуобинского месторождения технических подземных вод.

Согласно техническим отчетам по строительству водозаборных скважин ООО «Ангарская геологическая экспедиция», талики имеют радиационную природу. По данным источника [21], они формируются на водораздельных пространствах с абсолютными отметками

дневной поверхности более +375 м. Еще одним критерием для выявления зон отсутствия мерзлых пород является присутствие обильной растительности на дневной поверхности [21, 25]. Водовмещающими породами служат песчаники укугутской свиты нижней юры и верхних горизонтов верхоленьского комплекса среднего – верхнего кембрия. Глубина залегания водоносных объектов составляет не более 100 м от поверхности. Воды – пресные гидрокарбонатные, сульфатно-гидрокарбонатные или гидрокарбонатно-сульфатные магниевые с минерализацией 0,25–0,8 г/л, жесткостью 2,75–10,5 мг-экв/л.

Результаты исследования и их обсуждение

В целом локальные линзы талых пород отмечаются, согласно данным мЗСБ, на всех рассматриваемых территориях (см. рис. 9), однако их водообильность не изучена скважинами. Вероятно, ввиду их малых площадей распространения и зачастую отсутствия связи с нижележащими водоносными комплексами она существенно уступает таликам Среднеботуобинского месторождения технических подземных вод. Результаты электроразведочных работ методом мЗСБ, проведенных на территории Якутии в период 2016–2022 гг., свидетельствуют об уникальности данной области в криогидрогеологическом плане. На сегодняшний день на территориях, рассматриваемых в данной статье, не вскрыты таликовые зоны, сопоставимые по запасам со Среднеботуобинским месторождением технических подземных вод. На данный момент нет единой теории происхождения столь обширных и водообильных талых зон. Среди факторов, которые могли оказать тепляющее воздействие на мерзлую зону, рассматриваются радиационный, тектонический, техногенный.

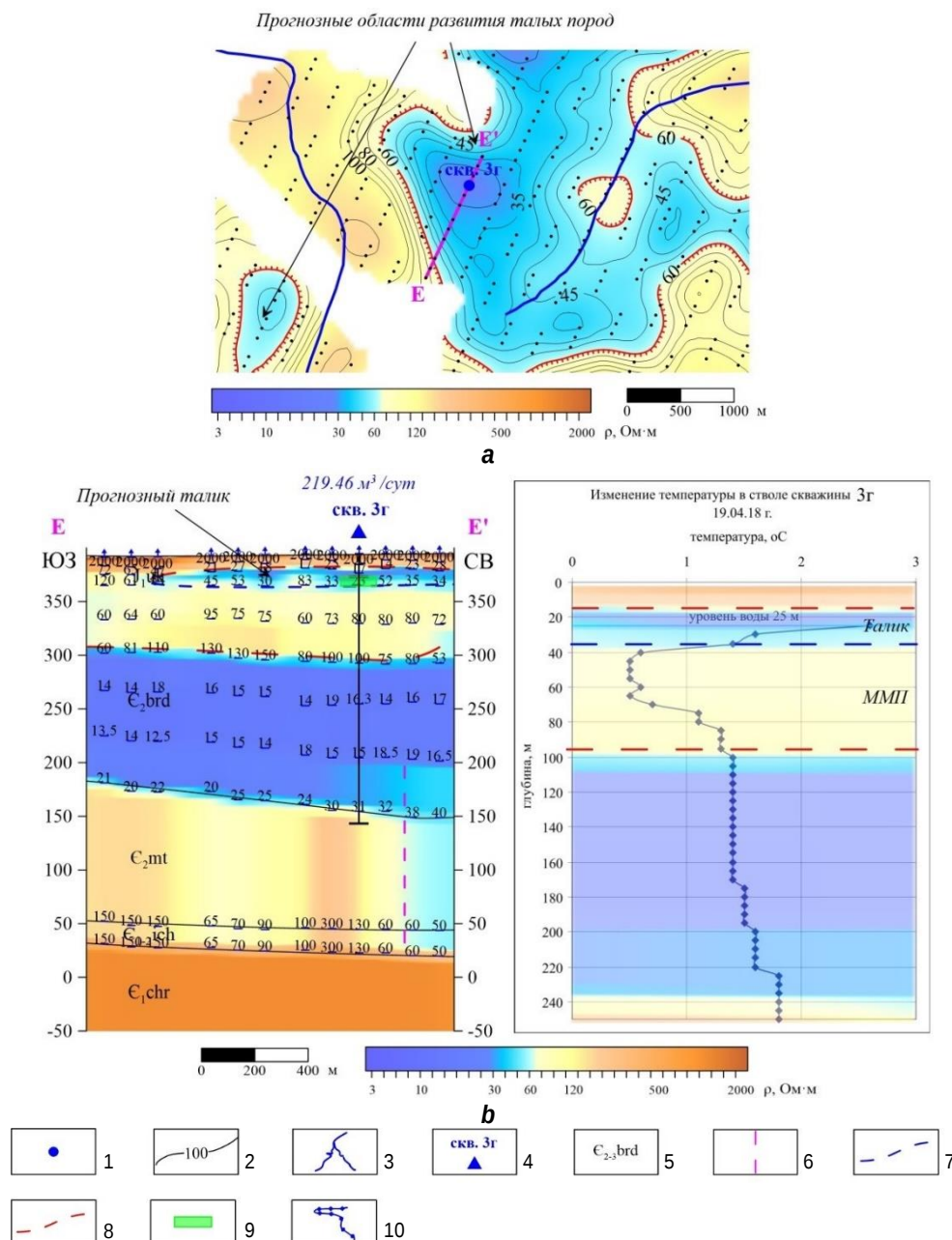


Рис. 10. Пример выделения таликовой зоны на территории Среднеботуобинского месторождения технических подземных вод:

а – карта удельного электрического сопротивления интервала распространения многолетнемерзлых пород (нижнеюрско-верхнекембрийские отложения); **б** – геоэлектрический разрез в сопоставлении с термограммой:

1 – гидрогеологическая скважина на карте; 2 – изолинии продольного сопротивления, Ом·м; 3 – гидросеть; 4 – гидрогеологическая скважина на разрезе; 5 – индексы стратиграфических подразделений; 6 – тектонические нарушения, предполагаемые по данным малоглубинных зондирований становлением поля в ближней зоне; 7 – границы межмерзлотных горизонтов по данным малоглубинных зондирований становлением поля в ближней зоне; 8 – границы ярусов многолетнемерзлых пород по данным малоглубинных зондирований становлением поля в ближней зоне; 9 – интервал водопритока; 10 – термограмма (после выстойки в течение трех суток)

Fig. 10. An example of talik zone identification on the territory of the Middle Botuoba field of technical underground waters:

а – electrical resistivity map of permafrost distribution interval (Lower Jurassic-Upper Cambrian deposits); **б** – goelectric section as compared with the temperature log:

1 – hydrogeological well on the map; 2 – isolines of longitudinal resistivity, Ohm·m; 3 – hydraulic network; 4 – hydrogeological well in the section; 5 – indices of stratigraphic units; 6 – tectonic faults, assumed according to the shallow near-field TEM sounding data; 7 – boundaries of interpermafrost horizons according to the shallow near-field TEM sounding data; 8 – boundaries of permafrost stages according to the shallow near-field TEM sounding data; 9 – water inflow interval; 10 – temperature log (after 3 days curing)



Заключение

Проведенные исследования позволили решить ряд геологических и гидрогеологических задач:

1. Дифференцировать породы на мерзлые и талые – получить новые данные о морфологии толщи многолетнемерзлых пород, выявить межмерзлотные талики, перспективные на вскрытие коллекторов пресных и слабоминерализованных вод.

2. Уточнить особенности тектонического строения верхней части разреза территорий и их влияние на размещение коллекторов подземных вод.

3. Минимизировать риски бурения гидрогеологических скважин с неудовлетворительным результатом.

4. Прогнозировать участки осложнений при бурении скважин, связанных с мерзлотой (таких как разрушения стенок скважины, прихваты бурового инструмента, газопроявления, связанные с коллекторами, в виде поглоще-

ний бурового раствора, ускорения механической проходки).

В результате отмечена неравномерная геотермическая изученность района. Прослежено сокращение глубины залегания подошвы многолетнемерзлых пород с северо-востока на юго-запад от 400 до 150 м. На территории Среднеботуобинского месторождения закартировано прерывистое распространение мерзлых толщ, выявлены таликовые зоны с разной водообильностью, ряд выявленных объектов водоснабжения эксплуатируется.

Таким образом, на сегодняшний день для территорий Республики Саха (Якутии) остается актуальной организация источников водоснабжения в подмерзлотных водоносных комплексах. Для поисков представительных межмерзлотных источников подземных вод требуется дальнейшее изучение криогидрогеологических систем бурением в комплексе с электроразведочными работами методом МЗСБ.

Список источников

1. Шепелёв В.В., Павлова Н.А., Иванова Л.Д. Состояние и перспективы использования подземных вод в Якутии // Наука и техника в Якутии. 2016. № 1. С. 22–26. <https://elibrary.ru/yxlgwl>.

2. Алексеев С.В. Криогидрогеологические системы Якутской алмазоносной провинции / науч. ред. Е.В. Складов. Новосибирск: Гео, 2009. 319 с. <https://elibrary.ru/qkiutb>.

3. Алексеева Л.П., Алексеев С.В. Геохимия подземных льдов, соленых вод и рассолов Западной Якутии / отв. ред. Е.В. Складов. Новосибирск: Гео, 2019. 214 с.

4. Kotlyakov V., Khromova T. Land resources of Russia – maps of permafrost and ground ice, version 1 // National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center [Электронный ресурс]. URL: <https://nsidc.org/data/ggd600/versions/1> (16.09.2022).

5. Вожов В.И., Сурнин А.И. Криолитосфера и геотермия Сибирской платформы в связи с ее нефтегазоносностью. М.: Изд-во ВИЭМС, 1983. 35 с.

6. Алексеев В.Р. Притяжение мерзлой земли / отв. ред. В.В. Шепелёв. Новосибирск: Гео, 2016. 535 с.

7. Ефимов А.И. Температура многолетнемерзлых горных пород в окрестностях г. Мирный // Современные вопросы региональной и инженерной геокриологии (мерзлотоведения): сб. ст. М.: Наука, 1964. С. 63–83.

8. Белопахова Е.Б. Льдистость и температура многолетнемерзлых пород лога Хабардина // Труды Института мерзлотоведения АН СССР. М.: Изд-во АН СССР, 1961. Т. XVII. С. 58–62.

9. Мощанский В.А., Мулина А.В. Некоторые данные о строении верхней части многолетнемерзлой толщи в пределах Лено-Вилуйского водораздела // Мерзлот-

ные исследования: сб. ст. М.: Изд-во МГУ, 1961. Вып. II. С. 115–128.

10. Геокриология СССР. Восточная Сибирь и Дальний Восток / под ред. Э.Д. Ершова. М.: Недра, 1989. 515 с.

11. Девяткин В.Н. Тепловой поток криолитозоны Сибири (методика и результаты изучения). Новосибирск: Наука, 1993. 162 с.

12. Девяткин В.Н. Результаты определения глубинного теплового потока на территории Якутии // Региональные и тематические геокриологические исследования: сб. ст. Новосибирск: Наука, 1975. С. 148–150.

13. Девяткин В.Н., Гаврильев Р.И. Геотермия вмещающих пород карьера Мир (Западная Якутия) // Строение и тепловой режим мерзлых пород: сб. ст. Новосибирск: Наука, 1981. С. 76–79.

14. Балобаев В.Т., Девяткин В.Н. Мерзлотно-геотермические условия Западной Якутии в связи с ее нефтегазоносностью // Гидрогеология нефтегазоносных областей Сибирской платформы: сб. науч. тр. Новосибирск: Изд-во СНИИГиМС, 1982. С. 18–28.

15. Теплофизические исследования криолитозоны Сибири / отв. ред. А.В. Павлов. Новосибирск: Наука, 1983. 214 с.

16. Климовский И.В., Готовцев С.П. О природе аномалий температуры мерзлых толщ в Западной Якутии // Региональные геокриологические исследования в Восточной Азии: сб. науч. тр. Якутск: Изд-во ИМЗ СО АН СССР, 1983. С. 54–65.

17. Климовский И.В., Готовцев С.П. Криолитозона Якутской алмазоносной провинции. Новосибирск: Наука, 1994. 165 с.



18. Мельникановицкий И.М., Ряполова В.А., Хорди-
кайнен М.А. Методика геофизических исследований
при поисках и разведке месторождений пресных вод /
под ред. А.А. Огильви. М.: Недра, 1982. 239 с.

19. Буддо И.В., Поспеев А.В. Прецизионная инвер-
сия данных ЗСБ при поисках нефти и газа на юге Си-
бирской платформы: монография. Иркутск: Изд-во ИГУ,
2019. 149 с. <https://elibrary.ru/myuykuc>.

20. Reynolds J.M. An introduction to applied and envi-
ronmental geophysics. Chichester: John Wiley and Sons
Ltd., 1997. 796 p.

21. Валеев Р.Р., Колесников Д.В., Буддо И.В.,
Ильин А.И., Аксеновская А.А., Черкасов Н.А., Агафонов
Ю.А., Гринченко В.А. Подход к решению проблемы де-
фьюита воды для системы поддержания пластового
давления нефтяных месторождений Восточной Сибири
(на примере Среднеботуобинского НГКМ) // Геология,
геофизика и разработка нефтяных и газовых месторож-
дений. 2019. № 1. С. 55–67. <https://elibrary.ru/ytnxjz>,

<https://doi.org/10.30713/2413-5011-2019-1-55-67>.

22. Кожевников Н.О., Антонов Е.Ю. Импульсная ин-
дуктивная электроразведка поляризующихся сред // Геофизический журнал. 2009. Т. 31. № 4. С. 104–118.

23. Стогний В.В. Импульсная индуктивная электро-
разведка таликов криолитозоны Центральной Якутии /
отв. ред. Г.М. Тригубович. Якутск, 2003. 123 с. <https://elibrary.ru/qkehjx>.

24. Балобаев В.Т., Голубев В.А., Девяткин В.Н.,
Дорофеева Р.П., Дучков А.Д., Зорин Ю.А. [и др.]. Труды
института геологии и геофизики. Вып. 681. Тепловое
поле недр Сибири / отв. ред. Э.Э. Фотиади. Новоси-
бирск: Наука, 1987. 200 с.

25. Medvedkov A., Vysotskaya A., Olchev A. Detection
of geocryological conditions in boreal landscapes of the
southern cryolithozone using thermal infrared remote sens-
ing data: a case study of the northern part of the Yenisei
Ridge // Remote Sens. 2023. Vol. 15. Iss. 2. P. 291.
<https://doi.org/10.3390/rs15020291>.

References

1. Shepelev V.V., Pavlova N.A., Ivanova L.D. State
and application prospects of groundwater in Yakutia.
Nauka i tekhnika v Yakutii. 2016;1:22–26. (In Russ.).
<https://elibrary.ru/yxlglw>.

2. Alekseev S.V. Cryohydrogeological systems of the
Yakutsk diamondiferous province. Novosibirsk: Geo; 2009.
319 p. (In Russ.). <https://elibrary.ru/qkiutb>.

3. Alekseeva L.P., Alekseev S.V. Geochemistry of un-
derground ice, saline waters and brines of Western Yaku-
tia. Novosibirsk: Geo; 2019. 214 p. (In Russ.).

4. Kotlyakov V., Khromova T. Land resources of Rus-
sia – maps of permafrost and ground ice, version 1. Na-
tional Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive
Center. Available from: [https://nsidc.org/data/ggd600/ver-](https://nsidc.org/data/ggd600/versions/1)
sions/1 [Accessed 16 September 2022].

5. Vozhov V.I., Surnin A.I. Cryolithosphere and geo-
thermy of the Siberian platform in terms of its oil and gas
potential. Moscow: All-Russian Research Institute of Eco-
nomics of Mineral Raw Materials and Geological Explora-
tion; 1983. 35 p. (In Russ.).

6. Alekseev V.R. Attraction of the frozen earth. Novo-
sibirsk: Geo; 2016. 535 p. (In Russ.).

7. Efimov A.I. Temperature of permafrost rocks in the
vicinity of Mirny. In: *Sovremennye voprosy regional'noi i in-
zhenernoi geokriologii (merzlotovedeniya) = Modern issues
of regional and engineering geocryology (permafrost sci-
ence)*. Moscow: Nauka; 1964, p. 63–83. (In Russ.).

8. Belopukhova E.B. Ice content and temperature of
permafrost rocks of the Khabardin ravine. In: *Trudy Instituta
merzlotovedeniya AN SSSR = Proceedings of the Institute
of Permafrost Science of the Academy of Sciences of the
USSR*. Moscow: USSR Academy of Sciences; 1961, vol.
17, p. 58–62. (In Russ.).

9. Moshchanskii V.A., Mulina A.V. Some data on the
structure of the upper part of the permafrost within the
Lena-Vilyui watershed. In: *Merzlotnye issledovaniya = Per-
mafrost studies*. Moscow: Lomonosov Moscow State Uni-
versity; 1961, iss. 2, p. 115–128. (In Russ.).

10. Ershov E.D. *Geocryology of the USSR. Eastern
Siberia and the Far East*. Moscow: Nedra; 1989. 515 p.
(In Russ.).

11. Devyatkin V.N. Heat flow of the Siberian perma-
frost zone (methodology and study results). Novosibirsk:
Nauka; 1993. 162 p. (In Russ.).

12. Devyatkin V.N. Determination results of deep heat
flow in Yakutia. In: *Regional'nye i tematicheskie geokriolog-
icheskie issledovaniya = Regional and thematic geocryo-
logical studies*. Novosibirsk: Nauka; 1975, p. 148–150.
(In Russ.).

13. Devyatkin V.N., Gavril'ev R.I. Geothermy of host
rocks of Mir open pit (Western Yakutia). In: *Stroenie i teplovoi
rezhim merzlykh porod = Structure and thermal regime of
frozen rocks*. Novosibirsk: Nauka; 1981, p. 76–79. (In Russ.).

14. Balobaev V.T., Devyatkin V.N. Permafrost and ge-
othermal conditions of Western Yakutia in connection with
its oil and gas potential. In: *Gidrogeologiya neftegazo-
nosnykh oblastei Sibirskoi platform = Hydrogeology of oil
and gas bearing regions of the Siberian platform*. Novosi-
birsk: Siberian Research Institute of Geology, Geophysics
and Mineral Resources; 1982, p. 18–28. (In Russ.).

15. Pavlov A.V. Thermophysical studies of Siberian per-
mafrost zone. Novosibirsk: Nauka; 1983. 214 p. (In Russ.).

16. Klimovskii I.V., Gotovtsev S.P. On the nature of fro-
zen strata temperature anomalies in Western Yakutia. In:
*Regional'nye geokriologicheskie issledovaniya v Vostoch-
noi Azii = Regional geocryological studies in East Asia*.
Yakutsk: Permafrost Institute SB RAS; 1983, p. 54–65.
(In Russ.).

17. Klimovskii I.V., Gotovtsev S.P. Cryolithozone of the
Yakutsk diamondiferous province. Novosibirsk: Nauka;
1994. 165 p. (In Russ.).

18. Mel'nikanovitskii I.M., Ryapolova V.A., Khordi-
kainen M.A. Methods of geophysical research in prospect-
ing and exploration of fresh water deposits. Moscow:
Nedra; 1982. 239 p. (In Russ.).

19. Buddo I.V., Pospeev A.V. Precision inversion of the



near field transient EM sounding data in oil and gas exploration in the south of the Siberian Platform: monograph. Irkutsk: Irkutsk State University; 2019. 149 p. (In Russ.). <https://elibrary.ru/myykuc>.

20. Reynolds J.M. An introduction to applied and environmental geophysics. Chichester: John Wiley and Sons Ltd., 1997. 796 p.

21. Valeev R.R., Kolesnikov D.V., Buddo I.V., Ilyin A.I., Aksenovskaya A.A., Cherkasov N.A., Agafonov Yu.A., Grinchenko V.A. An approach to the water shortage problem solution for a reservoir pressure maintenance of oil fields in the Eastern Siberia (on the example of Srednebotobinsky oil and gas-condensate field). *Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanykh i gazovykh mestorozhdenii = Geology, geophysics and development of oil and gas fields*. 2019;1:55-67. (In Russ.). <https://elibrary.ru/ytngxjz>, <https://doi.org/10.30713/2413-5011-2019-1-55-67>.

22. Kozhevnikov N.O., Antonov E.Yu. Pulsed inductive electrical exploration of polarizing media. *Geofizicheskii zhurnal*. 2009;31(4):104-118. (In Russ.).

23. Stognii V.V. *Pulsed inductive electrical exploration of permafrost zone taliks in Central Yakutia*. Yakutsk; 2003. 123 p. (In Russ.). <https://elibrary.ru/qkehjx>.

24. Balobaev V.T., Golubev V.A., Devyatkin V.N., Dorofeeva R.P., Duchkov A.D., Zorin Yu.A., et al. *Proceedings of the Institute of Geology and Geophysics. Issue. 681. Thermal field of Siberian bowels*. Novosibirsk: Nauka; 1987. 200 p. (In Russ.).

25. Medvedkov A., Vysotskaya A., Olchev A. Detection of geocryological conditions in boreal landscapes of the southern cryolithozone using thermal infrared remote sensing data: a case study of the northern part of the Yenisei Ridge. *Remote Sens*. 2023;15(2):291. <https://doi.org/10.3390/rs15020291>.

Информация об авторах / Information about the authors



Оцимик Анастасия Александровна,

геолог 1-й категории,
ООО «СИГМА-ГЕО»,
г. Иркутск, Россия,

✉ oaa@sigma-geo.ru

Anastasia A. Otsimik,

1st Category Geologist,
SIGMA-GEO LLC,
Irkutsk, Russia,

✉ oaa@sigma-geo.ru



Буддо Игорь Владимирович,

кандидат геолого-минералогических наук,
заместитель генерального директора по науке,
ООО «СИГМА-ГЕО»,
г. Иркутск, Россия,

заведующий Лабораторией комплексной геофизики,
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.),
Deputy Director General for Science,
SIGMA-GEO LLC,
Irkutsk, Russia,

Head of the Laboratory of Integrated Geophysics,
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>



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 30.03.2023; одобрена после рецензирования 24.04.2023; принята к публикации 10.05.2023.

The article was submitted 30.03.2023; approved after reviewing 24.04.2023; accepted for publication 10.05.2023.