



© Коллектив авторов,
2024



КРИТЕРИИ ПОИСКОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В УСЛОВИЯХ РАСПРОСТРАНЕНИЯ МНОГОЛЕТНЕЙ МЕРЗЛОТЫ НА ТЕРРИТОРИИ ЛЕНО-ВИЛЮЙСКОГО АРТЕЗИАНСКОГО БАСЕЙНА РЕСПУБЛИКИ САХА (ЯКУТИЯ)

А.А. Оцимик^{1,*}, И.В. Буддо^{2,3}, Н.В. Мисюркеева^{1,2}, О.В. Токарева¹, И.А. Шелохов², И.В. Акулова¹, Ю.А. Агафонов¹

¹ООО «СИГМА-ГЕО», РФ, Иркутск

²ФГБУН «Институт земной коры» СО РАН, РФ, Иркутск

³Иркутский национальный исследовательский технический университет, РФ, Иркутск

Электронный адрес: oaa@sigma-geo.ru

Введение. Эксплуатация объектов обустройства месторождений углеводородов сопровождается потребностью в подземных водах для использования при бурении скважин, обеспечения системы поддержания пластового давления и производственно-технических нужд при подготовке нефти. В северных регионах сложности поисков, разведки, оценки запасов и эксплуатации подземных вод связаны с разнообразием условий распространения и мощности многолетнемерзлых пород, а также особенностями строения водовмещающих толщ.

Цель. Определение критериев и разработка подходов к прогнозированию коллекторов подземных вод на территориях развития многолетнемерзлых пород.

Материалы и методы. Исследование заключалось в обобщении и анализе геологических и геофизических данных о строении верхних 500 м осадочного чехла. В том числе данных бурения и геофизических исследований скважин, результатов площадных электроразведочных работ методом малоглубинных зондирования становлением поля в ближней зоне на территории Лено-Вилуйского артезианского бассейна II порядка.

Результаты. В работе описаны подходы и критерии поисков коллекторов подземных вод, основанные на анализе геолого-геофизических данных на территории Республики Саха (Якутия).

Заключение. Комплексный анализ и обобщение геолого-геофизических данных с использованием материалов электроразведочных работ методом малоглубинных зондирования становлением поля в ближней зоне на территории Якутии позволили изучить особенности строения многолетнемерзлых пород, распространения межмерзлотных и подмерзлотных источников подземных вод, сформировать наборы критериев поиска коллекторов подземных вод для различных условий распространения мерзлоты и таликов.

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

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Оцимик А.А., Буддо И.В., Мисюркеева Н.В., Токарева О.В., Шелохов И.А., Акулова И.В., Агафонов Ю.А. Критерии поисков подземных вод в условиях распространения многолетней мерзлоты на территории Лено-Вилуйского артезианского бассейна Республики Саха (Якутия). ПРОНЕФТЬ. Профессионально о нефти. 2024;9(4):125–134. <https://doi.org/10.51890/2587-7399-2024-9-4-125-134>

Статья поступила в редакцию 13.09.2024

Принята к публикации 04.10.2024

Опубликована 27.12.2024

APPROACH TO DATA INTEGRATION FOR GROUNDWATER EXPLORATION WITHIN THE PERMAFROST AREAS OF THE LENA-VILYUI ARTESIAN BASIN OF THE REPUBLIC OF SAKHA (YAKUTIA)

Anastasia A. Otsimik^{1,*}, Igor V. Buddo^{2,3}, Natalia V. Misyurkeeva^{1,2}, Olga V. Tokareva¹, Ivan A. Shelokhov^{1,2}, Irina V. Akulova¹, Yuri A. Agafonov¹

¹SIGMA-GEO LLC, RF, Irkutsk

²Institute of the Earth's Crust of SB RAS, RF, Irkutsk

³Irkutsk National Research Technical University, RF, Irkutsk

E-mail: oaa@sigma-geo.ru

Introduction. Hydrocarbon field exploration and development require groundwater for well drilling, reservoir pressure maintenance systems, and production and technical needs during oil processing. In northern regions, the difficulties of prospecting, exploration, assessment of reserves, and exploitation of groundwater

are associated with the diversity of permafrost distribution conditions and thickness, as well as the structural features of water-bearing strata.

Aim. To determine criteria and develop approaches to predicting groundwater reservoirs in permafrost areas.

Materials and methods. The study included generalization and analysis of geological and geophysical data on the structure of the upper 500 m of the sedimentary cover, including drilling data and geophysical well-log surveys, and the results of area electromagnetic exploration with shallow transient electromagnetic sounding in the near zone (TEM).

Results. The paper describes approach to data integration for groundwater exploration within the permafrost areas of the Lena-Vilyui artesian basin of the Republic of Sakha (Yakutia)

Conclusion. A comprehensive analysis and integration of geological and geophysical data using electromagnetic TEM data in Yakutia made it possible to study the structural features of permafrost rocks, the distribution of interpermafrost and subpermafrost groundwater reservoirs, and to derive approach to groundwater reservoirs exploration for various permafrost and talik distribution conditions.

Keywords: permafrost, cryolithozone, thermometry, temperature, taliks, water supply, cryohydrogeological systems, shallow transient electromagnetic sounding in the near zone, electrical resistivity, Yakutia

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

For citation: Otsimik A.A., Buddo I.V., Misyurkeeva N.V., Tokareva O.V., Shelokhov I.A., Akulova I.V., Agafonov Yu.A. Approach to data integration for groundwater exploration within the permafrost areas of the Lena-Vilyui artesian basin of the Republic of Sakha (Yakutia). PRONEFT. Professionally about oil. 2024;9(4):125–134. <https://doi.org/10.51890/2587-7399-2024-9-4-125-134>

Manuscript received 13.09.2024

Accepted 04.10.2024

Published 27.12.2024

ВВЕДЕНИЕ

Эксплуатация объектов обустройства месторождений углеводородов сопровождается потребностью в подземных водах для использования при бурении скважин, обеспечения системы поддержания пластового давления и производственно-технических нужд при подготовке нефти. В северных регионах сложности поисков, разведки,

температуры горных пород в верхней части разреза зачастую отсутствуют. В то же время информация о глубине залегания и внутреннем строении многолетнемерзлых пород позволяет прогнозировать условия бурения и обнаруживать водообильные зоны, месторождения подземных вод.

Для изучения мерзлоты и обнаружения коллекторов подземных вод предлагается применение технологии электромагнитных исследований методом малоглубинных зондирований становлением поля в ближней зоне (мЗСБ), которая позволяет изучать геофизические свойства пород в межскважинном пространстве, повысить успешность скважин и оптимизировать сеть бурения.

ЦЕЛЬ

Определение критериев и разработка подходов к прогнозированию коллекторов подземных вод на территориях развития многолетнемерзлых пород.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектом исследований послужили отложения верхней части геологического разреза, залегающие в интервале от дневной поверхности до глубины 500 м. Данный интервал включает в себя породы (снизу вверх) чарской свиты, ичерской, метегерской, бордонской и джуктинской свит кембрия,

НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСНОГО АНАЛИЗА ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ И МАТЕРИАЛОВ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ МЕТОДОМ МАЛОГЛУБИННЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ СТАНОВЛЕНИЕМ ПОЛЯ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ ИЗУЧЕНО СТРОЕНИЕ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД, РАЗВИТИЕ МЕЖМЕРЗЛОТНЫХ И ПОДМЕРЗЛОТНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД.

оценки запасов и эксплуатации подземных вод связаны с разнообразием условий распространения и мощности многолетнемерзлых пород (ММП), а также особенностями строения водовмещающих толщ. Успешность бурения скважин на воду в северных районах Восточной Сибири зачастую не превышает 25 % по причине вскрытия промороженного интервала ММП с невысокими либо отсутствующими водопритоками.

На месторождениях углеводородов верхние 200–500 м разреза осадочного чехла слабо изучены бурением и геофизическими исследованиями в скважинах, замеры

отложения нижнего ордовика и нижней юры, а также четвертичные образования. В административном плане участки исследований сосредоточены преимущественно в пределах Мирнинского улуса Республики Саха (Якутия). Рассматриваемые территории характеризуются сплошным распространением мерзлоты различной мощности — от первых десятков до 300 м.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование заключалось в обобщении и анализе геологических и геофизических данных о строении верхних 500 м осадочного чехла, в том числе данных бурения и геофизических исследований скважин (ГИС), результатах площадных электроразведочных работ мЗСБ на территории Лено-Вилюйского артезианского бассейна II порядка. 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 [1, 2].

Исследования методом мЗСБ выполнялись с применением соосно-разнесенной установки. Размеры генераторных петель составляли 100×100 м, шаг между приемниками — 100 м, 300 м, между источниками — 500 м. Малоуглубинные 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. Возможность картирования ММП и прогнозирования таликовых зон по данным мЗСБ

основана на высоком контрасте удельных электрических сопротивлений (УЭС) пород в мерзлом и талом состояниях.

В ходе исследования выполнялось космодешифрирование для определения зон развития мерзлоты на основе геоботанических индикаторов. Для анализа использован мультиспектральный космоснимок SWIR (Short wave infrared composite). SWIR — это коротковолновой инфракрасный композитный снимок. Измерения в коротковолновом инфракрасном диапазоне помогают оценить, сколько воды присутствует в растениях и почве, поскольку вода поглощает волны SWIR. На этом сложном изображении растительность окрашена в оттенки зеленого, почвы и застроенные территории окрашены в различные оттенки коричневого, а вода кажется черной.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В исследуемом регионе основные перспективы подземных вод пригодных для технических нужд связаны с межмерзлотными коллекторами — таликами и подмерзлотными водоносными горизонтами. Данные объекты вмещают воды пресные или слабоминерализованные с низкими концентрациями или без сероводорода.

Критерии поисков межмерзлотных коллекторов подземных вод

На исследуемых территориях межмерзлотные коллекторы пресных подземных вод связаны с таликами и имеют ограниченное распространение. Встречаются талики радиационно-теплогового и гидрогенного типов. Радиационно-тепловые талики образуются в результате обогревающего воздействия таких природных факторов, как повышенная солнечная радиация (радиационные талики), скапливание толстого слоя снега (тепловые талики) или инфильтрация атмосферных осадков (дождевально-радиационные талики).

Гидрогенные талики существуют вследствие обогревающего влияния рек (подрусловые и пойменные талики), озер (подозерные талики) и других водоемов. Гидрогенные талики обнаруживаются по всей зоне вечной мерзлоты.

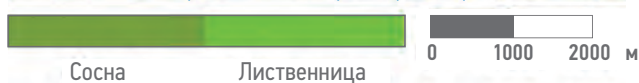
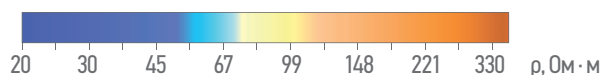
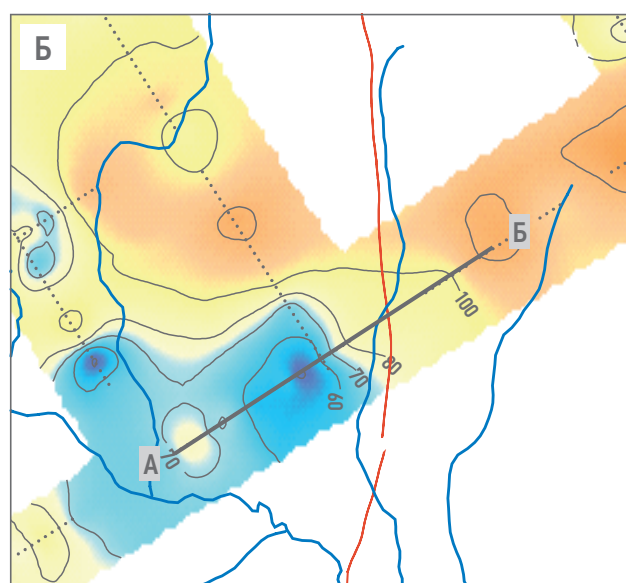
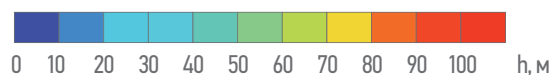
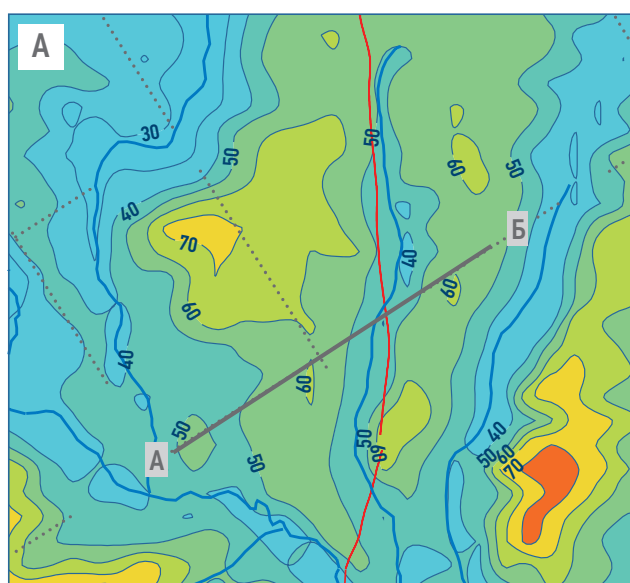
Радиационно-тепловые талики. Поисковые критерии коллекторов подземных вод, связанных с радиационными таликами, описаны в 2019 году в рамках подхода к решению проблемы дефицита воды для системы поддержания пластового давления на примере Среднеботуобинского месторождения [3].

Пресные воды получают из верхних 100 метров разреза осадочного чехла, сложенных нижнеюрскими песчаниками и терригенными породами верхнего кембрия. Территория относится к зоне слабо-прерывистого распространения многолетней мерзлоты. Благоприятные гидрогеологические условия обуславливаются относительно повышенными абсолютными отметками рельефа дневной поверхности до 390–400 м, где в силу повышенного температурного градиента возможно формирование радиационно-тепловых таликов большой латеральной протяженности. В разрезах скважин с высокими дебитами притоков пресных вод по данным

геофизических исследований скважин выделяется до двух интервалов водопритоков в отложениях укугутской свиты юры и верхней части бордонской свиты кембрия. Дебиты пресных вод из данного интервала достигают 600–1000 м³/сут.

Критерии поиска участков развития водообильных радиационных таликов:

- наличие нижнеюрских песчаников по данным геологической карты;
- наличие возвышенных участков местности на основе цифровой модели рельефа с абсолютными отметками более +375 м;
- наличие участков развития обильной растительности на основе космоснимков;



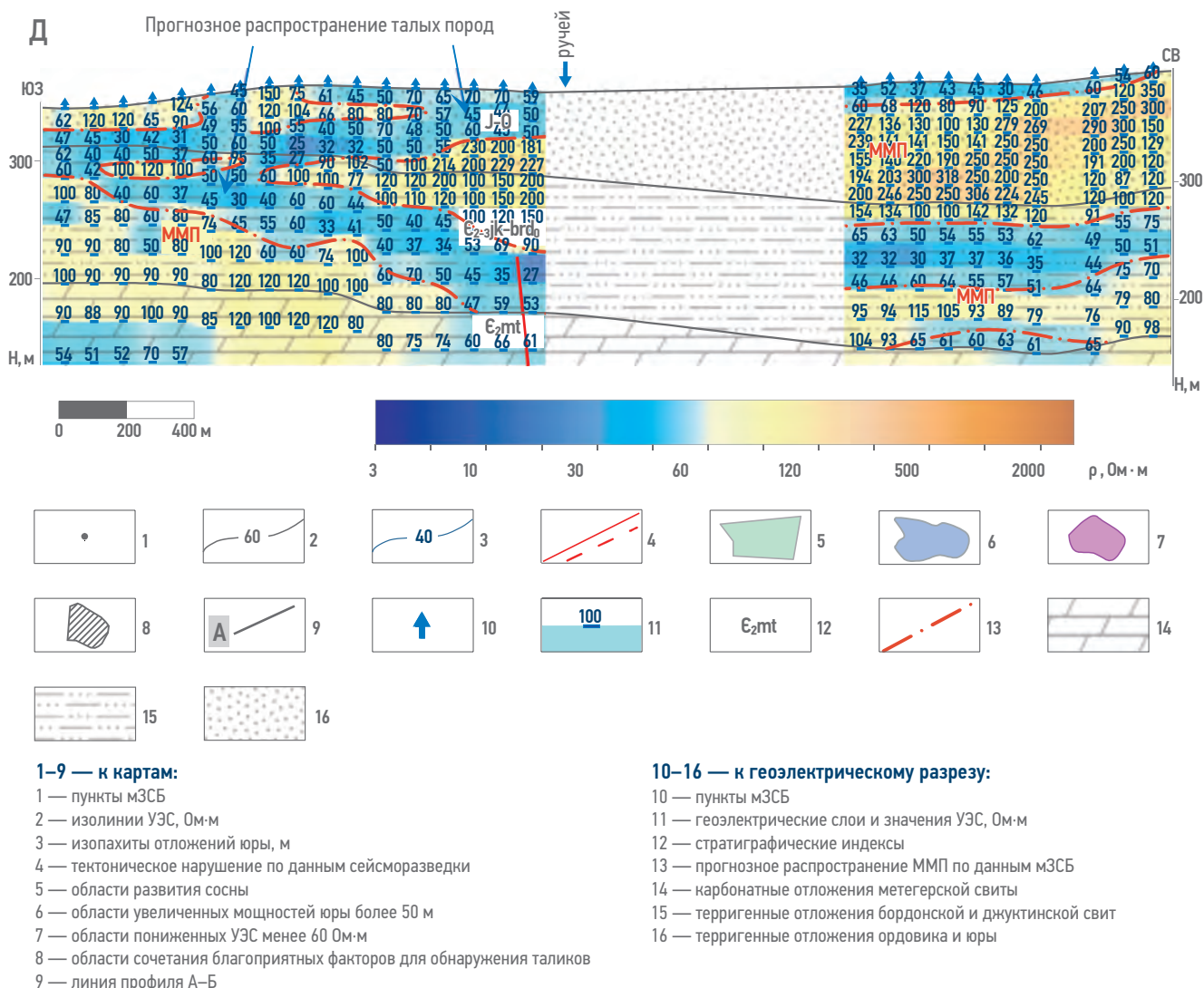


Рис. 1. Выявление таликов гидрогенного типа по данным комплексного анализа геолого-геофизических данных: А — карта мощности отложений юры, Б — карта УЭС отложений юры по данным мЗСБ, В — космоснимок SWIR, Г — комплексная карта факторов, Д — геоэлектрический разрез по линии А–Б. Составлено авторами

Fig. 1. Identification of hydrogenic taliks based on an integrated analysis of geological and geophysical data: А — thickness map of Jurassic deposits, Б — map of longitudinal resistance of Jurassic deposits according to sTEM data, В — SWIR satellite image, Г — complex map of factors, Д — geoelectric section along line А–В. Compiled by the authors

- наличие пониженных удельных электрических сопротивлений (УЭС) пород по данным мЗСБ — менее 60 Ом·м.

Известно, что песчаные отложения таликовых зон Центральной Якутии при температуре около 0 °С и пористости 35–42 % характеризуются УЭС, меняющимся от 70–80 до 20–25 Ом·м, при минерализации, варьирующей от 0,5 до 3 г/л [4]. На территории Среднеботубинского месторождения таликовые зоны сопровождаются значениями УЭС менее 60 Ом·м. Данное граничное значение УЭС определено в результате сопоставления результатов откачек в 17 гидрогеологических скважинах со значениями УЭС отложений юры в точках скважин по данным мЗСБ. На сегодняшний день граничный уровень УЭС подтверждается

бурением более 30 гидрогеологических скважин.

Гидрогенные талики. При исследованиях мЗСБ в зоне сплошного распространения ММП обнаружено, что области пониженных значений УЭС менее 60 Ом·м тяготеют к долинам рек и озер, реже — к склонам южной экспозиции. Данное наблюдение позволяет предполагать наличие на таких территориях гидрогенных таликов.

Важным поисковым критерием является наличие перспективных водовмещающих пород — песчаников укугутской свиты нижней юры.

Известно, что большинство таликов, формирующихся под водоемами, не связаны с глубокими подмерзлотными водоносными горизонтами, так как имеют в основании

водоупорные породы. Очень редкие очаги питания и разгрузки подмерзлотных вод возникают лишь при совпадении таликов с зонами разломов [5]. Таким образом, фактор наличия тектонических нарушений является важным критерием для обнаружения водообильных таликовых зон.

Одним из основных методов при исследовании мерзлоты является метод ландшафтной индикации, в основе которого лежит анализ элементов ландшафта, таких как рельеф, гидросеть и растительность.

В южных районах распространения криолитозоны, где температура пород близка к нулю, растительные ассоциации, а следовательно, и внешний облик природных комплексов индицируют различные мерзлотно-температурные условия. Например, известно, что в большинстве случаев сосна не растет на мерзлоте и указывает на талое состояние мерзлых пород. В зоне распространения низкотемпературных ММП в северных районах распространения криолитозоны значение геоботанических индикаторов не столь велико и ландшафтная индикация температурных условий зависит в большей степени от рельефа местности [6]. Тем не менее геоботанические индикаторы используются в качестве косвенных и в северных районах. Анализ геоботанических индикаторов выполнялся в рамках работ по выявлению участков потенциального термосуффозионного разуплотнения грунтов вдоль федеральной автодороги А-360 «Лена» в Центральной Якутии [7], а также при поиске подхода к решению проблемы дефицита воды для системы поддержания пластового давления на Среднеботуобинском месторождении [3].

Таким образом, в критерии поиска гидрогенных таликов также включен фактор растительности. Светлыми оттенками зеленого отображается распространение лиственных, предположительно распространения ММП. Талые породы ассоциируются с участками развития вечнозеленых хвойных деревьев, в частности сосны, которые отображаются на снимке темными оттенками зеленого. По результатам дешифрирования преимущественное распространение сосны картируется именно вблизи речных долин.

Критерии поиска перспективных участков развития гидрогенных таликов:

- пониженные значения УЭС пород по данным мЗСБ менее 60 Ом·м;
- расположение вблизи долин рек и озер;
- наличие тектонических нарушений;
- увеличенная мощность водовмещающих пород;

- распространение сосны на дневной поверхности.

Ниже охарактеризована перспективная зона, выявленная по сформированному комплексу критериев (рис. 1).

Перспективная зона имеет пониженные УЭС 25–60 Ом·м, пересекает интервал разреза от основания бордонской свиты до юрских отложений и выходит на дневную поверхность, прерывает сплошность яруса высокольдистых пород с повышенными УЭС 70–230 Ом·м. Прогнозной таликовой зоне соответствует зона распространения сосны по космоснимку и глубинный разлом, выявленный по данным сейсморазведки. Прогнозная таликовая зона приурочена к долине ручья. По данным опробований 2007–2008 годов воды в ручье гидрокарбонатные кальциевые пресные с минерализацией от 95,3 до 677,1 мг/л. Концентрация хлоридов изменяется от 5,3 до 142,9 мг/л, сульфатов — от 6,2 до 180,2 мг/л, натрия — от 2,5 до 33,9 мг/л. Содержание макрокомпонентов — ниже ПДК (предельно допустимых концентраций) для питьевой воды [8]. Критерии для обнаружения гидрогенных таликов разработаны для территории нефтегазоконденсатного месторождения, расположенного в суровых криогидрогеологических условиях с мощностью ММП 100–300 м, требуют дальнейшего уточнения, верификации бурением и ГИС.

Критерии поисков подмерзлотных коллекторов подземных вод

На одной из нефтегазопромысловых площадей в ходе бурения водозаборных скважин встречены и изучены коллекторы локального распространения в верхней части метегерской свиты среднего кембрия. Метегерская свита сложена доломитами светло-серыми, коричнево-серыми, с прослоями красновато-коричневых аргиллитов и серых ангидритов [9]. Ее толщина на территории исследований составляет порядка 110 м. Водовмещающие породы представлены доломитом. По результатам анализа геофизических исследований в 31 скважине установлено, что толщина коллектора изменяется от 1 до 16 м, наиболее часто встречающиеся значения — 4–8 м. Воды комплекса слабосолоноватые, гидрокарбонатно-сульфатные или сульфатные, магниевые-кальциевые или кальциевые с минерализацией 1–1,83 г/л, жесткостью 9,3–20,3 мг-экв/л. Содержание сероводорода менее 5 мг/л. Дебиты притоков достигают 110–550 м³/сут.

Поскольку объект поисков залегает в верхах метегерской свиты и имеет малую мощность, до 20 м, важным этапом являлось уточнение

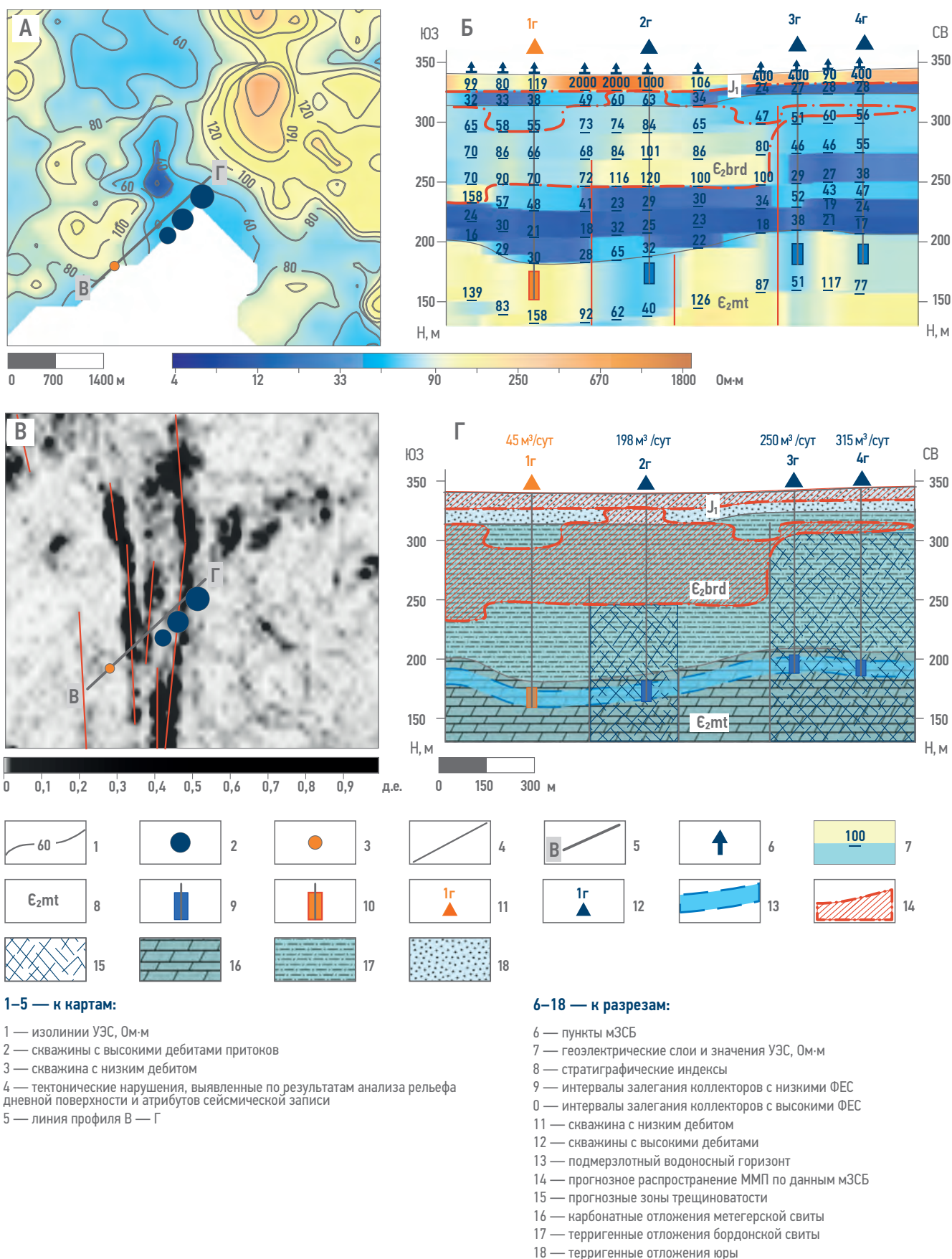


Рис. 2. Выявление подмерзлотных водоносных коллекторов в верхних горизонтах метегерской свиты по данным комплексного анализа геолого-геофизических данных: А — карта УЭС верхних 40 м метегерской свиты по данным мЗСБ, Б — карта когерентности сейсмической записи в интервале олекминской свиты, В — геоэлектрический разрез по линии В-Г, Г — геологический разрез по линии В-Г. Составлено авторами

Fig. 2. Identification of subpermafrost aquifers in the upper horizons of the Meteger suite based on a comprehensive analysis of geological and geophysical data: А — longitudinal resistivity map of the upper 40 m of the Meteger suite according to sTEM data, Б — the map of seismic record coherence in the interval of the Olekminsk suite, В — geolectric section according to lines В-Г, Г — geological section along the line В-Г. Compiled by the authors

тектонического строения кровли метегерской свиты. Ее неоднородное строение в изученном районе связано с вертикальными тектоническими движениями и проявлениями магматизма, протекавшими при формировании Вилюйско-Мархинской зоны глубинных разломов.

Определение кровли метегерской свиты выполнено по данным мЗСБ на основе контраста между высокопроводящими отложениями бордонской свиты и карбонатными отложениями метегерской свиты. Полученная геоэлектрическая граница уверенно совпадает со стратиграфическими отбивками в скважинах участка.

Определение тектонических нарушений выполнялось на основе линеamentного анализа рельефа и анализа сейсмических атрибутов нижележащих отражающих горизонтов. В результате определены системы тектонических нарушений субмеридиональной ориентировки.

С учетом структурного положения объекта поисков по данным мЗСБ определены УЭС пород в перспективном интервале. На исследованной территории значения УЭС верхних горизонтов метегерской свиты изменяются в широких пределах — от 30 до 500 Ом·м. Известно, что распространение геоэлектрических зон подчиняется системам тектонических нарушений. Геоэлектрические зоны имеют субмеридиональную ориентировку, совпадающую с простиранием основных тектонических элементов района. В блоках с пониженными УЭС пород 30–60 Ом·м дебиты притоков в скважинах достигают 200–550 м³/сут. В зонах с повышенными УЭС более 200 Ом·м встречаются сухие и низкодебитные скважины менее 50 м³/сут.

Ниже представлен пример выявления водообильных трещиноватых зон в подмерзлом водоносном горизонте (рис. 2). В одной из выявленных зон повышенной трещиноватости пробурено три водозаборные скважины 2г, 3г, 4г с притоками воды 198–315 м³/сут. По данным мЗСБ пробуренная зона характеризуется пониженными УЭС — 40–77 Ом·м. В 300 м к юго-западу пробурена скважина 1г, дебит притока в которой оказался существенно меньше и составил 45 м³/сут. Значение УЭС в точке скважины составляет 158 Ом·м, скважина удалена от выявленных тектонических нарушений.

На тектоническое строение и фильтрационно-емкостные свойства карбонатных пород могло оказать влияние проникновение трапповой интрузии в нижележащие горизонты галогенно-карбонатного комплекса.

Внедрение трапповой интрузии сопровождается развитием дизъюнктивных нарушений, которые могут как служить каналами для циркуляции вод, так и быть подвержены процессам вторичного преобразования пород (засолонения, карбонатизации), что ухудшает фильтрационно-емкостные свойства (ФЕС) коллекторов [10].

Критерии поиска подмерзлотных источников подземных вод в верхних горизонтах метегерской свиты:

- наличие тектонической трещиноватости;
- пониженные УЭС по данным мЗСБ.

Важным условием для осуществления подхода является точное гипсометрическое положение кровли метегерской свиты.

Критерии разработаны и апробированы на территории крупного нефтегазоконденсатного месторождения Республики Саха (Якутия) с распространением мерзлоты от слабопрерывистого до сплошного мощностью до 100–150 м.

ДИСКУССИЯ И ВЫВОДЫ

Комплексный анализ и обобщение геолого-геофизических данных с использованием материалов электроразведочных работ мЗСБ на территории Якутии позволили изучить особенности строения многолетнемерзлых пород, распространения межмерзлотных и подмерзлотных источников подземных вод на ряде месторождений и нефтегазопосевных площадей, сформировать критерии поиска коллекторов подземных вод для различных условий распространения ММП и таликов.

Опыт проведенных исследований показывает, что, применяя определенный комплекс методов и набор обоснованных критериев оценки наличия подземных вод, существует возможность оптимизировать сеть гидрогеологических скважин на нефтяных месторождениях, сокращая затраты на бурение и повышая успешность проходки непродуктивных (сухих) скважин.

Тем не менее многообразие и изменчивость, а также слабая и неравномерная изученность геологических и криогидрогеологических условий исследуемого региона не всегда позволяют успешно применять подходы, разработанные и апробированные на смежных площадях, и требуют глубокого и всестороннего изучения, привлечения специальных технологий бурения и опробования скважин в условиях многолетней мерзлоты.

Список литературы

1. Буддо ИВ, Поспеев АВ. Прецизионная инверсия данных ЗСБ при поисках нефти и газа на юге Сибирской платформы: монография. — Иркутск: Изд-во ИГУ, 2019. — 149 с. <https://elibrary.ru/myykuc>
2. Reynolds J.M. An introduction to applied and environmental geophysics. Chichester: John Wiley and Sons Ltd., 1997. — 796 p.
3. Валеев РР, Колесников ДВ, Буддо ИВ, Ильин АИ, Аксеновская АА, Чернасов НА, Агафонов ЮА, Гринченко ВА. Подход к решению проблемы дефицита воды для системы поддержания пластового давления нефтяных месторождений Восточной Сибири (на примере Среднеботуобинского НГКМ) // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений: научно-технический журнал. — 2019. — № 1. — 55–67 с.
4. Мельниановичий ИМ, Ряполова ВА, Хордиайнен МА. Методика геофизических исследований при поисках и разведке месторождений пресных вод / под ред. А.А. Огильви. — М.: Недра, 1982. — 239 с.
5. Сидоренко АВ. Гидрогеология СССР, том XX, Якутская АССР. Якутское геологическое управление. Институт мерзлотоведения СО АН СССР. — М.: Недра, 1970. — 384 с.
6. Тумель НВ, Зотова ЛИ. Геоэкология криолитозоны: Учебное пособие. — М.: Географический факультет МГУ, 2014. — 244 с.
7. Гагарин ЛА, Бажин КИ, Оленченко ВВ, Огонеров ВВ, Ву Цинбай. Выявление участков потенциального термосуффозионного разуплотнения грунтов вдоль федеральной автодороги А-360 «Лена» в Центральной Якутии // Криосфера Земли. — 2019. — Т. XXIII. — № 3. — С. 61–68.
8. Власова ТА. Отчет о результатах работ по ведению мониторинга подземных вод на площади Мало-Ботуобинского алмазоносного района и прилегающей территории за 2007–2009 гг. (Регимная партия). — Мирный: АК «АЛРОСА», 2010. — 165 с.
9. Мельников НВ. Венд-кембрийский соленосный бассейн Сибирской платформы. (Стратиграфия, история развития). Изд. 2-е, доп. — Новосибирск: СНИИГГиМС, 2018. — 177 с.
10. Мисюркеева НВ, Буддо ИВ, Шелохов ИА. Опыт применения малоглубинных электромагнитных зондирований при поисках подземных вод в пределах Непско-Ботуобинской антеклизы. Строение литосферы и геодинамика: Материалы XXVIII Всероссийской молодежной конференции (г. Иркутск, 8–14 апреля 2019 г.). — Иркутск, Институт земной коры СО РАН, 2019. — С. 110–112. ISBN 978-5-9908560-5-9

References

1. 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. <https://elibrary.ru/myykuc>. (In Russ.)
2. Reynolds J.M. *An introduction to applied and environmental geophysics*. Chichester: John Wiley and Sons Ltd., 1997. 796 p.
3. Valeev R.R., Kolesnikov D.V., Buddo I.V., Il'in A.I., Akseynovskaya A.A., Cherkasov N.A., Agafonov Y.U.A., Grinchenko V.A. An approach to solving the problem of water deficiency for the reservoir pressure maintenance system of oil fields in Eastern Siberia (using the Srednebotuobinskoye NGKM as an example). *Geology, geophysics and development of oil and gas fields: scientific and technical journal*. 2019, no. 1, pp. 55–67. (In Russ.)
4. Mel'nikanovich I.M., Ryapolova V.A., Hordikajnen M.A. *Geophysical research methods in prospecting and exploration of fresh water deposits*. Moscow: Nedra, 1982. 239 p. (In Russ.)
5. Sidorenko A.V. volume XX, *Yakut Autonomous Soviet Socialist Republic*. Yakut Geological Department. Institute of Permafrost Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences. Moscow: Nedra, 1970, 384 p. (In Russ.)
6. Tumel' N.V., Zotova L.I. *Geocology of the cryolithozone*: Textbook. Moscow: Faculty of Geography, Moscow State University, 2014. 244 p. (In Russ.)
7. Gagarin L.A., Bazhin K.I., Olenchenko V.V., Ogonerov V.V., Vu Cinbaj. Identification of areas of potential thermosuffusion loosening of soils along the federal highway A-360 "Lena" in Central Yakutia. *Earth's Cryosphere*. 2019, vol. XXIII, no. 3, pp. 61–68. (In Russ.)
8. Vlasova T.A. *Report on the results of groundwater monitoring in the Malo-Botuobinsky diamondiferous region and adjacent territory for 2007–2009* (Regime party). Mirny: AK ALROSA, 2010. 165 p. (In Russ.)
9. Mel'nikov N.V. *Vendian-Cambrian salt-bearing basin of the Siberian platform*. (Stratigraphy, history of development). 2nd ed., suppl. Novosibirsk: SNIIGGIMS, 2018. 177 p. (In Russ.)
10. Misyurkeeva N.V., Buddo I.V. *Irkutsk, Institut zemnoj kory*. SO RAN, p. 110–112. (In Russ.) ISBN 978-59908560-5-9

ВКЛАД АВТОРОВ / AUTHOR CONTRIBUTIONS

А.А. Оцимик — разработала концепцию исследования, подготовила текст и рисунки. Согласна принять на себя ответственность за все аспекты работы.

И.В. Буддо — разработал концепцию исследования, проводил экспертное сопровождение работы. Согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Н.В. Мисюркеева — проводила экспертное сопровождение работы. Согласна принять на себя ответственность за все аспекты работы.

О.В. Токарева — проводила экспертное сопровождение работы. Согласна принять на себя ответственность за все аспекты работы.

И.А. Шелохов — разработал концепцию исследования, выполнял инверсию данных мЗСБ, анализ материалов сейсморазведки. Согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Anastasia A. Otsimik — developed the article concept, prepared text and pictures. Accepted the responsibility for all aspects of the work.

Igor V. Buddo — developed the article concept, preparation the supervision of experiment. Accepted the responsibility for all aspects of the work.

Natalia V. Misyurkeeva — preparation the supervision of experiment. Accepted the responsibility for all aspects of the work.

Olga V. Tokareva — preparation the supervision of experiment. Accepted the responsibility for all aspects of the work.

Ivan A. Shelokhov — developed the article concept, perform inversion of TEM data, analysis of seismic survey materials. Accepted the responsibility for all aspects of the work.

И.В. Акулова — выполняла инверсию данных мЗСБ. Согласна принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Ю.А. Агафонов — проводил экспертное сопровождение работы. Согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Irina V. Akulova — perform inversion of TEM data. Accepted the responsibility for all aspects of the work.

Yuri A. Agafonov — preparation the supervision of experiment. Accepted the responsibility for all aspects of the work.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Анастасия Александровна Оцимик* — геолог 1-й категории, ООО «СИГМА-ГЕО» 664039, Россия, Иркутская область, г. Иркутск, ул. Звездинская, д. 6.
e-mail: oaa@sigma-geo.ru

Игорь Владимирович Буддо — кандидат геолого-минералогических наук, заведующий Лабораторией комплексной геофизики, Институт земной коры СО РАН.
Доцент кафедры прикладной геологии, геофизики и геоинформационных систем, институт «Сибирская школа геонаук», Иркутский национальный исследовательский технический университет
SPIN-код: 6433-6211
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5204-9530>
Scopus ID: 49862710500

Наталья Викторовна Мисюркеева — кандидат геолого-минералогических наук, начальник геологического отдела, ООО «СИГМА-ГЕО», младший научный сотрудник лаборатории нефти и газа, Институт земной коры СО РАН
SPIN-код: 8883-1724
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9953-4963>
Scopus ID: 57202534902

Ольга Владимировна Токарева — главный геолог, ООО «СИГМА-ГЕО»

Иван Антонович Шелохов — кандидат геолого-минералогических наук, младший научный сотрудник, лаборатории комплексных исследований Арктики, Институт земной коры СО РАН
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3523-4440>
Scopus ID: 57195338937

Ирина Владимировна Акулова — ведущий геофизик, ООО «СИГМА-ГЕО»

Юрий Александрович Агафонов — кандидат технических наук, генеральный директор, ООО «СИГМА-ГЕО»

Anastasia A. Otsimik* — 1st Category geologist, SIGMA-GEO LLC
6, str. Zvezdinskaya, 664039, Irkutsk, Russia.
e-mail: oaa@sigma-geo.ru

Igor V. Buddo — Cand. Sci. (Geol.-Min.), Head of the Laboratory of Integrated Geophysics, Institute of the Earth's Crust SB RAS, Associate Professor of the Department of Applied Geology, Geophysics and Geoinformation Systems, Siberian School of Geosciences, Irkutsk National Research Technical University
SPIN-code: 6433-6211
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5204-9530>
Scopus ID: 49862710500

Natalia V. Misyurkeeva — Cand. Sci. (Geol.-Min.), Head of geological department, SIGMA-GEO LLC, Junior researcher, Oil and Gas Laboratory, Institute of the Earth's Crust SB RAS
SPIN-code: 8883-1724
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9953-4963>
Scopus ID: 57202534902

Olga V. Tokareva — Chief geologist, SIGMA-GEO LLC

Ivan A. Shelokhov — Cand. Sci. (Geol.-Min.), Junior researcher, Laboratory of Integrated Research of the Arctic, Institute of the Earth's Crust SB RAS
e-mail: sia@crust.irk.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3523-4440>
Scopus ID: 57195338937

Irina V. Akulova — Principal geophysicist, SIGMA-GEO LLC

Yuri A. Agafonov — Cand. Sci. (Tech.), General director, SIGMA-GEO LLC

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author