КРИОСФЕРА ЗЕМЛИ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Криосфера Земли, 2022, т. XXVI, № 1, с. 55-64

https://www.sibran.ru

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КРИОСФЕРЫ

УДК 551.341+550.834

DOI: 10.15372/KZ20220106

ГЕОРАДАРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОДЗЕМНОГО ЛЬДА В КОМПЛЕКСЕ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЙ

Д.В. Копылов^{1,2}, М.Р. Садуртдинов², С.Ю. Янин¹

¹ООО "Тюменский нефтяной научный центр", 625000, Тюмень, a/я 747, Россия; kopylovdmitr@yandex.ru, yanin sergey@list.ru ²Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, 625026, Тюмень, ул. Малыгина, 86, Россия; mr_sadurtdinov@mail.ru

Рассмотрены результаты георадиолокационных исследований в комплексе инженерно-геологических изысканий на участке проектирования кустовой площадки нефтегазового месторождения на территории со сплошным распространением многолетнемерзлых грунтов. Бурение геологических скважин с отбором керна показало наличие линзы ледогрунта с содержанием льда до 90 %. Сопоставление результатов бурения и характерной волновой картины на георадиолокационных разрезах позволило выявить область аномального изменения свойств грунтов, которая интерпретируется как линза ледогрунта. На границе "ледогрунт–торф" выделяются высокоамплитудные дифракции электромагнитной волны, которые, по мнению авторов, связаны с наличием тел повторно-жильного льда. С помощью атрибутного анализа оконтурена линза ледогрунта и рассчитан ее приблизительный объем.

Ключевые слова: атрибутный анализ, георадиолокация, инженерно-геологические изыскания, криолитозона, ледогрунт.

GEORADAR STUDIES OF GROUND ICE IN THE COMPLEX OF ENGINEERING AND GEOLOGICAL SURVEYS

D.V. Kopylov^{1,2}, M.R. Sadurtdinov², S.Yu. Yanin¹

¹Tyumen Petroleum Research Center, P/O box 747, Tyumen, 625000, Russia; kopylovdmitr@yandex.ru Earth Cryosphere Institute, Tyumen Scientific Centre SB RAS, Malygina str. 86, Tyumen, 625026, Russia; mr sadurtdinov@mail.ru

The results of ground-penetrating radar studies in the complex of engineering and geological surveys at the design site of the cluster site of an oil and gas field in an area with a continuous spread of permafrost soils are considered. Drilling of geological wells with core sampling have revealed the presence of an ice ground lens with an ice content of up to 90 %. Comparison of the drilling results and the characteristic wave pattern on the ground-penetrating radar sections have allowed us to identify the area of abnormal changes in soil properties, which is interpreted as an ice-ground lens. High-amplitude diffractions of an electromagnetic wave are distinguished at the "ice-ground-peat" boundary, which, according to the authors, are due to the presence of wedge ice bodies. The lens of the ice ground has been contoured and its approximate volume has been calculated with the help of attribute analysis.

Key words: attribute analysis, ground-penetrating radar, engineering and geological surveys, cryolithozone, ice-ground.

ВВЕДЕНИЕ

Темпы освоения нефтегазовых месторождений Заполярья растут с каждым годом, что обусловливает интенсивное строительство нефтегазовой инфраструктуры в криолитозоне, где грунты находятся в меняющемся поле отрицательных или нулевых температур. Многолетнемерзлые грунты (ММГ) и льды достаточно чувствительны и нестабильны при антропогенном воздействии, что приводит к деградации либо разрушению сложных криогенных систем. Поэтому получение информа-

© Д.В. Копылов, М.Р. Садуртдинов, С.Ю. Янин, 2022

ции о залегании талых высокольдистых грунтов и льдов с целью выбора оптимального и безопасного места расположения фундаментов сооружений является одной из основных задач инженерно-геологических изысканий и геокриологических исследований.

Инженерно-геологические изыскания (ИГИ) в районах распространения ММГ выполняются с целью всесторонней оценки современных инженерно-геокриологических условий территории, включая геологическое строение, геоморфологические и гидрогеологические условия, геокриологическое строение, состав, состояние и свойства грунтов, инженерно-геологические процессы [СП 11-105-97, 1999]. Кроме того, в рамках ИГИ выполняется прогноз возможных изменений инженерно-геологических условий при взаимодействии проектируемых объектов с геологической средой.

На территории тундры со сплошным распространением ММГ протекают различные криогенные процессы как природного, так и техногенного характера [Алванян, Алванян, 2020], которые зачастую не имеют геоморфологических признаков, особенно в зимний период, когда снежный покров сглаживает все формы рельефа. Эти процессы по характерным признакам не заметны инженеругеологу при рекогносцировочном обследовании и маршрутном наблюдении территории в зимний период, а большой шаг между инженерно-геологическими и зондировочными скважинами обычно не позволяет обнаружить области аномального изменения свойств грунтов. Например, согласно [СП 11-105-97, 1999], расстояние между инженерно-геологическими скважинами по линии трассы эстакады трубопроводов в районе распространения ММГ должно быть 100 м, а размер полигонально-жильных льдов (ПЖЛ) и таликов в плане может составлять первые метры. Геофизические методы, реализуемые в рамках одномерной горизонтально-слоистой модели среды, такие как электро- и сейсмозондирования, которые выполняются с шагом 50-100 м и более, также малоинформативны в условиях криолитозоны. Уменьшение шага между точками зондирования часто экономически неэффективно в рамках ИГИ. В таких случаях целесообразно применять геофизические исследования с бесконтактными высокоплотными системами наблюдения. Одним из таких методов геофизики является георадиолокация (ГРЛ) [Ермаков, Старовойтов, 2010; Владов, Судакова, 2017]. В данной работе рассматриваются результаты применения георадиолокационных исследований на территории с широким распространением различных морфологических типов подземного льда. Основной целью было обнаружение и оконтуривание подземного льда в пределах контуров проектируемых сооружений, а также оценка возможности применения атрибута волнового поля (Q-фактор) для выявления тел подземного льда различной формы.

ОПЫТ ГЕОРАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В РАМКАХ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЙ

Георадиолокационные исследования при инженерно-геологических изысканиях закреплены нормативной базой в сфере строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации с вступлением в силу нового свода правил об инженерно-геологических изысканиях для строительства в 2019 г. [СП 446.1325800.2019, 2019]. Согласно этому нормативному документу, ГРЛ относится к основным геофизическим методам при решении задач по определению местоположения, глубины залегания и формы локальных неоднородностей (льдов, сильнольдистых грунтов и таликов) и изучению геологических процессов. Кроме того, развитие отечественной серийно выпускаемой аппаратуры и программного обеспечения, популяризация метода на различных конференциях и семинарах существенно упростили применение георадарных исследований в инженерных изысканиях.

За последние годы опубликовано много работ, где освещается опыт применения метода при решении различных задач на территории распространения ММГ [Копылов, Садуртдинов, 2019; Судакова и др., 2019: Bradford et al., 2005: Brosten et al., 2009; Hubbard et al., 2013; Sjoberg et al., 2014; Navarro et al., 2016; Campbell et al., 2018; Wang, Shen, 2019; Ganiyu et al., 2020; Rey et al., 2020]. Из отечественных работ следует отметить диссертацию [Бричева, 2018], которая полностью посвящена изучению криогенных объектов с помощью георадиолокации. В ней автор приводит результаты полноволнового численного моделирования криогенных объектов методом конечных разностей во временной области в программе gprMax. Были получены волновые картины от тел, имитирующих в разрезе узкую треугольную, широкую треугольную и прямоугольную жилы. На синтетических радарограммах наблюдаются гиперболические отражения от краев жил и горизонтальные отражения от кровли и подошвы прямоугольной жилы. Кровля жил выделяется высокоамплитудной горизонтальной осью синфазности. В работе приводится результат численного моделирования реальной ледяной жилы. Показана сложная волновая картина с множеством псевдогиперболических отражений. Физическое моделирование было выполнено с помощью лабораторного георадарного стенда, модель жилы из пенопласта помещалась в песок и воду. В связи с высоким контрастом воды и пенопласта на волновой картине удалось определить контуры модельной жилы. Моделирование позволило выделить кровлю и подошву жилы в зависимости от ее формы и примерно оценить геометрию криогенного тела по данным ГРЛ.

В работе [Sokolov et al., 2020] представлены результаты математического и физического моделирования георадарных измерений над телами льда, расположенными в массиве мерзлой породы. При физическом моделировании специально изготовленные из речного льда тела прямоугольной формы помещались в ящик с мерзлым песком на открытом воздухе в зимнее время года при отрицательной температуре. Георадарное профилирование и зондирование выполнялись по поверхности мерзлой породы. В результате эксперимента выявлены закономерности динамических и кинематических характеристик электромагнитного сигнала на границах "мерзлая порода–лед–мерзлая порода". Получены критерии идентификации ледяных тел в массиве мерзлого грунта. Акцентируется внимание на том, что для правильной интерпретации данных ГРЛ необходимо иметь достаточно полную априорную информацию о геокриологическом строении исследуемого массива мерзлых горных пород.

В этих работах рассматривались тела однородного по внутреннему строению льда, что в природе встречается очень редко. Как правило, клинья и линзы подземного льда содержат прослои минерального грунта, которые вносят свой вклад в волновую картину георадарного разреза при отражении и преломлении электромагнитной волны в процессе георадиолокационных исследований. В результате на георадиолокационных разрезах отображается волновая картина, существенно отличающаяся от модельной.

В работе иностранных коллег [Munroe et al., 2007] приводятся результаты георадиолокационных исследований на участке распространения ПЖЛ на севере Аляски. Площадные работы выполнялись с шагом между профилями 50 см с целью построения трехмерной модели среды. Применялся георадар SIR-3000 с антенным блоком с центральной частотой 400 МГц. В результате анализа срезов трехмерной модели на глубине 120 см наблюдаются высокоамплитудные протяженные аномалии, характеризующие сеть ПЖЛ. Данные результаты исследования показывают эффективность применения ГРЛ в исследовании подземных льдов при условии использования высокоплотной сети наблюдений с дальнейшим построением трехмерных моделей среды.

Из немногочисленных научных публикаций по георадиолокации в рамках инженерно-геологических изысканий на территории распространения ММГ необходимо отметить работу [*Tregubov*] et al., 2020], в которой авторы приводят результаты георадиолокационных исследований на территории пос. Лорино (Чукотка), где многолетнемерзлые породы (ММП) распространены повсеместно. Выполнена оценка деградации ММП в связи с антропогенными воздействиями на территории этого населенного пункта. Составлена схема распространения опасных криогенных процессов, таких как термокарст и термоэрозия, областей распространения высокольдистых и пучинистых грунтов. Показана высокая эффективность георадарной съемки в сочетании с инженерно-геологическими данными при оценке динамики криогенных процессов.

С развитием ГРЛ совершенствуется не только аппаратная часть и методика работ, но и программное обеспечение с процедурами обработки и интерпретации исходных данных. Как правило, процедуры обработки и интерпретации георадарных данных вытекают из хорошо разработанного на данный момент метода отраженных волн сейсморазведки [Владов, Судакова, 2017]. Так, в работе [Wang et al., 2020] демонстрируются результаты георадиолокационных исследований на Тибетском плато в области распространения ММП. Работы выполнялись с целью изучения сезонноталого слоя (СТС) и определения его мощности для нужд хозяйственной деятельности человека. В связи с тем, что СТС имеет неоднородный состав с включениями гальки и валунов, от которых на радарограммах наблюдается дифракция, однозначно определить мощность СТС очень сложно. Для получения волновой картины высокого разрешения при обработке к радарограммам применен метод обратной миграции во временной области (RTM – reverse time migration), в результате чего была точно определена мощность СТС и его строение. Однако в последние десятилетия появляются процедуры обработки георадиолокационных данных, основанные на исследовании электрофизических свойств. Так, в работе [Денисов, Капустин, 2010] авторы предлагают метод автоматизированного поля обратного рассеяния для обработки и интерпретации данных ГРЛ. Суть метода заключается в поиске и обнаружении сигналов, характеризующихся дифракционными признаками, образованными в результате отражения электромагнитной волны от локальных объектов. В автоматическом режиме на георадарном профиле анализируются точки, положение которых совпадает с вершинами дифракционных отражений. Кинематические и динамические характеристики этих дифракционных отражений являются атрибутами исследуемых точек. В результате анализа радарограммы строятся разрезы атрибутов, вычисляемые на основе как измеренных характеристик, так и корреляционных зависимостей. Одним из наиболее значимых атрибутов анализа электромагнитного поля является *Q*-фактор (отношение центральной частоты спектра сигналов к его ширине), вычисляемый по формуле

$$Q = \frac{\omega}{\Delta \omega} = \frac{\omega}{2\delta}$$

где Q - Q-фактор; δ – декремент затухания; $\omega = 2\pi f$ – круговая частота, Гц.

Смысл *Q*-фактора заключается в следующем: чем выше его значение, тем меньше величина потери энергии электромагнитной волны при прохождении через толщу грунтов и тем медленнее эта волна затухает.

При прохождении электромагнитной волны через чистый лед без примесей практически не происходит отражений и преломлений, а затухание электромагнитной волны существенно ниже, чем в грунтах с низкой льдистостью [Фролов, 1998; Якупов, 2008; Нерадовский, 2013]. Атрибут Q-фактор дает возможность исследовать и картировать льдистые грунты и подземные льды с помощью георадиолокации.

ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕРРИТОРИИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Район работ расположен в Тазовском районе Ямало-Ненецкого автономного округа, в пределах Мессояхской низменности, приуроченной к отрицательной неотектонической структуре, испытавшей в позднечетвертичное время относительное опускание. За историю своего существования поверхность террасы была переработана в результате вытаивания пластовых льдов, ПЖЛ и высокольдистых грунтов. В геоморфологическом отношении участок работ относится к третьей морской террасе, сложенной аллювиально-морскими отложениями - песками, суглинками и супесями, мощность которых изменяется от 3 до 25 м. Голоценовые озерно-болотные отложения повсеместно распространены и приурочены к котлованам озер, представлены торфяниками мощностью до 6 м.

Согласно схеме общего геокриологического районирования Западно-Сибирской плиты [Геокриология СССР, 1989], площадка изысканий расположена в северной зоне Новоуренгойской подзоны Мессояхской области. Высокоширотное положение области в условиях сурового климата предопределило повсеместное, практически сплошное развитие многолетнемерзлых пород, мощность которых составляет 250-350 м, в отдельных случаях может достигать 400-450 м. Талики здесь существуют под крупными озерами и руслами рек. В районе работ ММП образовались эпигенетическим способом, льдистость верхних горизонтов достигает 40-50 % и быстро убывает с глубиной. В этих отложениях вскрываются пласты, состоящие из слоев льда и льдистого суглинка.

На исследуемой территории ведущими факторами, влияющими на формирование температурного поля, являются суровые климатические условия, характер снегонакопления, тип растительного покрова, рельеф, состав пород и их влажность. Среднегодовая температура пород –5... –7 °С, а в понижениях микрорельефа, где скапливается снег, она повышается на 2–3 °С. По результатам измерений температуры в скважинах на участке исследований рассчитана средняя температура на глубине нулевых годовых амплитуд температуры (10 м), равная -3.0 °С (минимальная -4.6 °С, максимальная -1.8 °С). На территории изысканий на глубину пробуренных скважин до 12 м ММП представлены преимущественно супесями, реже суглинками и песками. Минеральные отложения с поверхности перекрыты мохово-растительным слоем и торфом. Следует обратить внимание на то, что, по данным авторов [Данилов, 1975; Васильчук, 2018], на исследуемой территории может встречаться парагенез жил льда с внутригрунтовыми пластовыми льдами. Одним из самых распространенных парагенетических сочетаний льдов является совместное сосуществование жильного и сегрегационного льдов в голоценовых отложениях, сверху перекрытых торфяниками, а снизу подстилаемых супесчаносуглинистыми грунтами. Кроме того, нередки случаи, когда ПЖЛ проникают сверху из торфа в пластовые залежи льда.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

На изучаемой территории выполнен комплекс инженерно-геологических работ, в который вошли сбор, изучение и систематизация материалов изысканий и исследований прошлых лет, рекогносцировочное обследование участка работ, проходка инженерно-геологических скважин, геофизические и геокриологические исследования. Полевые работы выполнены в апреле. Проходка инженерно-геологических выработок производилась самоходными буровыми установками УРБ-2А2, колонковым способом "в сухую" при минимальной скорости вращения, диаметром до 160 мм, глубиной до 12 м. При обнаружении талых грунтов бурение производилось с обсадными трубами для изоляции водоносного горизонта. В скважинах с ММП измерялась температура пород. Температурные наблюдения выполнены в скважинах комплектом для полевого измерения температуры грунтов ЭТЦ-0.1/10 с термокосой ТК 20/20 с интервалами глубин в пределах первых 5 метров – кратными 0.5 м; затем, до глубины 10 м – кратными 1 м; свыше 10 м – кратными 2 м, а также на забое скважин.

Геофизические исследования выполнялись методом георадиолокации на проектируемых площадочных объектах сеткой 50×50 м (рис. 1, *A*). Работы производились георадаром ОКО-2 (НПЦ "Геотех", Россия) по методике профилирования с антенным блоком АБ-150 дипольного типа на постоянной базе. Исследования выполнялись в зимний период года (см. рис. 1, *Б*), когда СТС с повышенной электропроводностью отсутствует, что благоприятно сказывалось на качестве и глубинности полученного материала, так как затухание электромагнитной волны в верхней части разреза минимально. Кроме того, маломощный плотный ГЕОРАДАРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОДЗЕМНОГО ЛЬДА В КОМПЛЕКСЕ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЙ





Рис. 1. Схема георадиолокационных работ (A), общий вид на площадку в зимнее (B) и летнее (B) время.

1 – георадиолокационный профиль и его номер;
2 – направление профиля;
3 – инженерно-геологическая скважина и ее номер.

снежный покров на участке работ сгладил неровную поверхность тундры, тем самым улучшив точность привязки георадарных данных по профилю. Обработка полученных данных выполнена с использованием программного обеспечения "Георадар-Эксперт" [Денисов, 2021], построены временные и глубинные разрезы, выполнен атрибутный анализ по параметру Q-фактор [Денисов, Капустин, 2010]. Скорость электромагнитной волны (V) измерялась в программе обработки по дифракционному отражению на радарограмме с помощью теоретической гиперболы. Диэлектрическая проницаемость рассчитывалась по формуле

$$\sqrt{\varepsilon} = \frac{V}{c},$$

где V – скорость распространения электромагнитной волны, см/нс; c – скорость света в вакууме, см/нс; ε – диэлектрическая проницаемость, у.е.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для проектирования наибольший интерес представляет верхняя часть разреза четвертичных отложений, которые будут служить основанием для проектируемых объектов. На участке исследований развиты морозобойное растрескивание и связанное с ним образование повторно-жильных льдов. По периметру площадку изысканий окружают термокарстовые озера глубиной 0.4–0.6 м, как блюдцевидной, так и вытянутой формы.

Геологическое строение района работ (рис. 2) до глубины 12 м представлено следующими литолого-генетическими комплексами: морские и аллювиальные отложения третьей морской террасы позднечетвертичного возраста и голоценовые биогенные отложения. Почвенный и мохово-растительный слои вскрыты в интервалах глубин от 0 до 0.2 м, мощность их меняется от 0.1 до 0.2 м. Ниже залегают голоценовые биогенные отложе-



Рис. 2. Геологические колонки по данным бурения.

1 – ледогрунт; 2 – торф мерзлый, слабольдистый; 3 – супесь твердомерзлая, слабольдистая; 4 – песок твердомерзлый слабольдистый; 5 – глубина подошвы слоя, м; 6 – температура грунта (°С) и дата ее замера; 7 – обозначение состояния грунта (мерзлый грунт); 8 – номер скважины.

ния, представленные мерзлым слабольдистым торфом со слоистой криотекстурой. Торф вскрыт в интервалах глубин от 0.4 до 6.1 м. Особенностью инженерно-геологического разреза площадки является наличие ледогрунта, встреченного в торфах и на границе с минеральным грунтом, содержащим более 90 % льда. Ледогрунт вскрыт в интервалах глубин 0.4–4.7 м. Плотность его 0.83 г/см³. Максимальная мощность составила 3.7 м. Термометрические наблюдения в скважине с ледогрунтом 16.04.2018 г. показали минимальную ее температуру до –12.2 °С на глубине 1.4 м.

На рис. 3 приведены временной и глубинный георадиолокационные разрезы по профилю 6, проходящие через линзу ледогрунта, вскрытую скважинами 316/30 и 316/51.



Рис. 3. Временной (a) и глубинный (δ) георадиолокационные разрезы по профилю 6.

1 – ледогрунт; 2 – торф мерзлый; 3 – супесь мерзлая; 4 – суглинок талый; 5 – предполагаемые ледяные тела; 6 – георадиолокационная граница.



Рис. 5. Объемная псевдотрехмерная модель линзы ледогрунта.

На георадарном разрезе (см. рис. 3, б) по осям синфазности выделяются слои с различной диэлектрической проницаемостью. Разрез осложнен латеральной изменчивостью грунтов и присутствием аномалеобразующих тел. Первый от дневной поверхности георадарный слой с параметрами V = 13.0 см/нс, $\varepsilon = 5.0$ и мощностью до 2 м выделяется по высокоамплитудным осям синфазности. Слой представлен сверху снегом, ниже мерзлым слабольдистым торфом. Различия мощности слоев по данным георадиолокации и бурения связаны с удалением (до 15 м) скважин от профиля. В интервале профиля 5-170 м с глубины 1.8 м выделяется аномальная область, представленная ледогрунтом с параметрами V = 16.6 см/нс, $\varepsilon = 3.2$ и мощностью до 3 м. Наличие хаотичных отражений в теле ледогрунта указывает на присутствие во льду примесей грунта, от которого и происходит отражение электромагнитной волны. Весьма необычная картина наблюдается на нижней границе "ледогрунт-торф". Она осложнена наличием множества высокоамплитудных дифракций электромагнитной волны. Диэлектрическая проницаемость составила є = 2.9-3.4, что соответствует льду. Согласно работе [Бричева, 2018], в которой выполнено численное моделирование ледяных жил различной формы, на волновой картине отмечаются гиперболы дифракции от жил и их краев. На других участках исследований с аналогичными климатическими и геологическими условиями [Tregubov et al., 2019] также наблюдаются дифракционные отражения от локальных объектов, представленных ледяными телами. На основании вышеизложенного авторы связывают присутствие на георадиолокационном разрезе дифракционных отражений электромагнитной волны на подошве линзы ледогрунта с наличием тел ПЖЛ.

Следует отметить, что расстояние 50 м между георадарными профилями не позволило оконтурить в плане системы ПЖЛ. Необходимо сгущение сети профилей. Для подтверждения наличия ПЖЛ на подошве линзы ледогрунта требуется провести заверку бурением в местах концентрации дифрагированных отражений.

С помощью атрибутного анализа получены срезы псевдотрехмерной модели по атрибуту *Q*-фактор (рис. 4), которые позволили отобразить пространственное распределение линзы ледогрунта. Локальные тела ПЖЛ не выделяются по атрибуту *Q*-фактор. Данный факт объясняется тем, что от локальных тел ПЖЛ электромагнитная волна отражается и преломляется достаточно интенсивно, в результате чего она теряет свою энергию и затухает. Так как значение *Q*-фактора обратно пропорционально затуханию электромагнитной волны, на разрезах по атрибуту *Q*-фактор локальные тела ПЖЛ не отличить от вмещающих пород.

В результате площадочных георадиолокационных исследований построена объемная псевдотрехмерная модель участка работ (рис. 5). По изоповерхности трехмерной модели рассчитан объем залегающей линзы ледогрунта, который примерно равен 20 795 м³.

выводы

В результате исследований выявлена линза ледогрунта в слое слабольдистого торфа. На радарограммах линза проявляется в виде аномальных областей, где отсутствуют оси синфазности, что свидетельствует о низком коэффициенте затухания амплитуды электромагнитной волны. На нижней границе "ледогрунт-торф" присутствуют высокоамплитудные дифракционные отражения, которые, по мнению авторов, связаны с наличием тел ПЖЛ. Выполнен атрибутный анализ георадарных данных и получены срезы по параметру О-фактор, на которых выделяется линза ледогрунта. Локальные тела ПЖЛ на срезах по параметру *Q*-фактор не выделяются. По изоповерхности объемной псевдотрехмерной модели рассчитан ее объем. Для более точного количественного анализа георадарных данных необходимо сгущать сеть системы профилей до 0.5-1.0 м. Присутствие на волновых картинах различных форм отражений электромагнитной волны, которые характерны для линзы ледогрунта и тел ПЖЛ, по мнению авторов, указывают на их парагенез, что весьма распространено на исследуемой территории. Для подтверждения этого вывода необходимо провести заверку бурением аномальных областей на радарограммах.

Литература

Алванян А.К. Геокриология: учеб. пособие / А.К. Алванян, К.А. Алванян. Пермь, Перм. гос. нац. исслед. ун-т, 2020, 139 с.

Бричева С.С. Разработка методики изучения криогенных объектов при помощи георадиолокации: дис. ... канд. геол.мин. наук. М., 2018, 169 с.

Васильчук Ю.К. Парагенетические ансамбли повторножильных льдов со льдами различного генезиса // Арктика и Антарктика, 2018, № 2, с. 71–112.

Владов М.Л. Георадиолокация. От физических основ до перспективных направлений: учеб. пособие / М.Л. Владов, М.С. Судакова. М., ГЕОС, 2017, 240 с.

Геокриология СССР. Западная Сибирь. М., Недра, 1989, 454 с.

Данилов И.Д. Пластовые льды в субаквальных отложениях севера Западной Сибири // Природные условия Западной Сибири. М., Изд-во Моск. ун-та, 1975, вып. 5, с. 205–215.

Денисов Р.Р. Программный комплекс автоматизированной обработки георадиолокационных данных. Георадар-Эксперт. Руководство пользователя. 2021 [Электрон. pecypc]. – URL: http://www.georadar-expert.ru/download/georadar/expert/manual/rus.pdf (дата обращения: 15.11.2021).

Денисов Р.Р., Капустин В.В. Обработка георадарных данных в автоматическом режиме // Геофизика, 2010, № 4, с. 76–80.

Ермаков А.П., Старовойтов А.В. Применение метода георадиолокации при инженерно-геологических исследованиях для оценки геокриологической обстановки // Вестн. МГУ. Сер. 4. Геология, 2010, № 6, с. 91–97.

Копылов Д.В., Садуртдинов М.Р. Применение электроразведки при инженерно-геокриологических исследованиях на объектах нефтегазовой инфраструктуры // Экспозиция нефть–газ, 2019, № 6 (73), с. 12–15.

Нерадовский Л.Г. Опыт применения георадиолокации на северо-востоке Якутии // Инж. изыскания, 2013, № 2, с. 26–37.

СП 11-105-97. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Ч. IV. Правила производства работ в районах распространения многолетнемерзлых грунтов. М., Госстрой РФ, 1999, 25 с.

СП 446.1325800.2019. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Общие правила производства работ. М., Стандартинформ, 2019, 80 с.

Судакова М.С., Садуртдинов М.Р., Царев А.М. и др. Возможности георадиолокации для исследования заболоченных торфяников в криолитозоне // Геология и геофизика, 2019, т. 60, № 7, с. 1004–1013.

Фролов А.Д. Электрические и упругие свойства мерзлых пород и льдов. Пущино, ОНТИ ПНЦ РАН, 1998, 515 с.

Якупов В.С. Геофизика криолитозоны. Якутск, Изд-во Якут. ун-та, 2008, 342 с.

Bradford J.H., McNamara J.P., Bowden W., Goose M.N. Measuring thaw depth beneath peat-lined arctic streams using ground-penetrating radar // Hydrolog. Process., 2005, No. 19 (14), p. 2689–2699.

Brosten T.R., Bradford J.H., McNamara J.P. et al. Estimating 3D variation in active-layer thickness beneath arctic streams using ground-penetrating radar // J. Hydrol., 2009, vol. 373, p. 479–486.

Campbell S., Affleck R.T., Sinclair S. Ground-penetrating radar studies of permafrost, periglacial, and near-surface geology at McMurdo Station, Antarctica // Cold Regions Sci. and Technol., 2018, No. 148 (4), p. 38–49.

Ganiyu S., Oladunjoye M., Onakoya O. et al. Combined electrical resistivity imaging and ground penetrating radar study for detection of buried utilities in Federal University of Agriculture, Abeokuta, Nigeria // Environ. Earth Sci., 2020, No. 79 (8), DOI: 10.1007/s12665-020-08919-2.

Hubbard S., Gangodagamage C., Dafflon B. et al. Quantifying and relating land-surface and subsurface variability in permafrost environments using LiDAR and surface geophysical datasets // Hydrogeol. J., 2013, No. 21 (1), p. 149–169.

Munroe J.S., Doolittle J.A., Kanevskiy M.Z. et al. Application of Ground-Penetrating Radar imagery for three-dimensional visualisation of near-surface structures in ice-rich permafrost, Barrow, Alaska // Permafrost and Periglacial Process., 2007, vol. 18, p. 309–321, DOI: 10.1002/ppp.594.

Navarro F., Lapazaran J., Martin-Espanol A., Otero J. Ground-Penetrating Radar studies in Svalbard aimed to the calculation of the ice volume of its glaciers // Cuadernos de Investigacion Geografica, 2016, No. 42 (2), DOI: 10.18172/ cig.2929.

Rey J., Martinez J., Hidalgo M. et al. Ground Penetrating Radar study of progradational units in Holocene Coastal Plains: Carchuna Beach (SE Spain) // Geosciences, 2020, No. 10 (7), p. 277.

Sjoberg Y., Marklund P., Pettersson R., Lyon S.W. Geophysical mapping of palsa peatland permafrost // The Cryosphere, 2014, No. 9, p. 465–478.

Sokolov K.O., Fedorova L.L., Fedorov M.P. Prospecting and evaluation of underground massive ice by Ground-Penetrating Radar // Geosciences (Switzerland), 2020, No. 10 (7), p. 274.

Tregubov O.D., Nuteveket N.A., Uyagansky K.K. The application of Ground Penetrating Radar (GPR) at the interpretation of engineering survey data of the Past Years: Massive ice beds or ice wedges? // Conf. Proc., Engineering and Mining Geophysics: 15th Conference and Exhibition (Apr. 2019), 2019, vol. 2019, p. 1–10.

Tregubov O.D., Kraev G.N., Maslakov A.A. Hazards of activation of cryogenic processes in the Arctic Community: A Geopenetrating Radar study in Lorino, Chukotka, Russia // Geosciences (Switzerland), 2020, No. 10 (2), p. 57.

Wang Y., Fu Z., Lu X. et al. Imaging of the internal structure of permafrost in the Tibetan Plateau using Ground Penetrating Radar // Electronics, 2020, No. 9 (1), p. 56–70.

Wang Q., Shen Y. Calculation and interpretation of Ground-Penetrating Radar for temperature and relative water content of seasonal permafrost in Qinghai-Tibet Platea // Electronics, 2019, No. 8 (7), p. 731.

References

Alvanyan A.K., Alvanyan K.A. Geokriologiya: uchebnoe posobie [Geocryology: a textbook]. Perm, Perm State National Research University, 2020, 139 p. (in Russian).

Bricheva S.S. Razrabotka metodiki izucheniya kriogenny'x ob'ektov pri pomoshhi georadiolokacii [Development of a method for studying cryogenic objects using Ground-Penetrating Radar]. Dissertation abstract for the candidate of Geological and Mineralogical Sciences. Moscow, 2018, 169 p. (in Russian). Vasil'chuk Yu.K. Paragenetic ensembles of re-vein ice with ice of different genesis. Arktika i Antarktika [Arctic and Antarctic], 2018, No. 2, p. 71–112 (in Russian).

Vladov M.L., Sudakova M.S. Georadiolokaciya. Ot fizicheskih osnov do perspektivnyh napravlenij. Uchebnoe posobie [Ground-Penetrating Radar. From the physical basics to promising areas. Training manual]. Moscow, GEOS, 2017, 240 p. (in Russian).

Geokriologiya SSSR. Zapadnaya Sibir' [Geocryology of the USSR. Western Siberia]. Moscow, Nedra, 1989, 454 p. (in Russian).

Danilov I.D. Formation ice in subaqual deposits of the North of Western Siberia. Prirodnye usloviya Zapadnoj Sibiri [Natural conditions of Western Siberia], 1975, No. 5, p. 205–215 (in Russian).

Denisov R.R. Software package for automated processing of geo-radar data. Georadar-Expert. Manual. 2021. – URL: http://www.georadar-expert.ru/download/georadar/expert/manual/rus.pdf (last visited: 15.11.2021).

Denisov R.R., Kapustin V.V. Processing of GPR data in automatic mode. Geofizika [Geophysics], 2010, No. 4, p. 76–80 (in Russian).

Ermakov A.P., Starovojtov A.V. Application of the georadiolocation method in engineering and geological studies to assess the geocryological situation. Vestnik Moskovskogo universiteta [Bulletin of Moscow University], 2010, No. 6, p. 91–97 (in Russian).

Kopylov D.V., Sadurtdinov M.R. Using geoelectrical prospecting for engineering-geocryological studies on objects of oil and gas infrastructure. Ekspozitsiya Neft'–Gaz [Exposition Oil– Gas], 2019, No. 6 (73), p. 12–15 (in Russian). Neradovsky L.G. Experience of using georadiolocation in the North-East of Yakutia. Injenernie iziskaniya [Engineering Surveys], 2013, No. 2, p. 26–37 (in Russian).

SP 11-105-97. Engineering geological surveys for purposes of construction. Part IV. Rules and regulations on geophysical surveys. Moscow, Gosstroi RF, 2004, 58 p. (in Russian).

SP 446.1325800.2019. Engineering and geological surveys for construction. General rules for the production of works. Moscow, Standartinform, 2019, 80 p. (in Russian).

Sudakova M.S., Sadurtdinov M.R., Carev A.M. et al. GPR capabilities for studying wetlands in the cryolithozone. Geologiya i geofiziki [Geology and Geophysics], 2019, vol. 60, No. 7, p. 1004–1013 (in Russian).

Frolov A.D. Elektricheskie i uprugie svoistva merzlykh porod i l'dov [Electrical and elastic properties of frozen rocks and ice]. Pushchino, ONTI PNTs RAN, 1998, 515 p. (in Russian).

Yakupov V.S. Geofizika kriolitozony [Geophysics of Permafrost Areas]. Yakutsk, Yakutsk University Press, 2008, 342 p. (in Russian).

Bradford J.H., McNamara J.P., Bowden W., Goose M.N. Measuring thaw depth beneath peat-lined arctic streams using Ground-Penetrating Radar. Hydrological Processes, 2005, No. 19 (14), p. 2689–2699.

Brosten T.R., Bradford J.H., McNamara J.P. et al. Estimating 3D variation in active-layer thickness beneath arctic streams using Ground-Penetrating Radar. J. Hydrology, 2009, vol. 373, p. 479–486.

Campbell S., Affleck R.T., Sinclair S. Ground-Penetrating Radar studies of permafrost, periglacial, and near-surface geology at McMurdo Station, Antarctica. Cold Regions Science and Technology, 2018, No. 148 (4), p. 38–49.

Ganiyu S., Oladunjoye M., Onakoya O. et al. Combined electrical resistivity imaging and Ground-Penetrating Radar study for detection of buried utilities in Federal University of Agriculture, Abeokuta, Nigeria. Environmental Earth Sciences, 2020, No. 79 (8), DOI: 10.1007/s12665-020-08919-2.

Hubbard S., Gangodagamage C., Dafflon B. et al. Quantifying and relating land-surface and subsurface variability in permafrost environments using LiDAR and surface geophysical datasets. Hydrogeology J., 2013, No. 21 (1), p. 149–169.

Munroe J.S., Doolittle J.A., Kanevskiy M.Z. et al. Application of Ground-Penetrating Radar imagery for three-dimensional visualisation of near-surface structures in Ice-Rich Permafrost, Barrow, Alaska. Permafrost and Periglacial Processes, 2007, vol. 18, p. 309–321, DOI: 10.1002/ppp.594.

Navarro F., Lapazaran J., Martin-Espanol A., Otero J. Ground-Penetrating Radar studies in Svalbard aimed to the calculation of the ice volume of its glaciers. Cuadernos de Investigacion Geografica, 2016, No. 42 (2), DOI: 10.18172/cig.2929.

Rey J., Martinez J., Hidalgo M. et al. Ground-Penetrating Radar study of progradational units in Holocene Coastal Plains: Carchuna Beach (SE Spain). Geosciences, 2020, No. 10 (7), p. 277.

Sjoberg Y., Marklund P., Pettersson R., Lyon S.W. Geophysical mapping of palsa peatland permafrost. The Cryosphere, 2014, No. 9, p. 465–478.

Sokolov K.O., Fedorova L.L., Fedorov M.P. Prospecting and evaluation of underground massive ice by Ground-Penetrating Radar. Geosciences (Switzerland), 2020, No. 10 (7), p. 274.

Tregubov O.D., Nuteveket N.A., Uyagansky K.K. The application of Ground-Penetrating Radar (GPR) at the interpretation of engineering survey data of the Past Years: Massive ice beds or ice wedges? In: Conference Proceedings, Engineering and Mining Geophysics: 15th Conference and Exhibition (Apr. 2019), 2019, vol. 2019, p. 1–10.

Tregubov O.D., Kraev G.N., Maslakov A.A. Hazards of activation of cryogenic processes in the Arctic Community: A Geopenetrating Radar study in Lorino, Chukotka, Russia. Geosciences (Switzerland), 2020, No. 10 (2), p. 57.

Wang Y., Fu Z., Lu X., Qin S. et al. Imaging of the internal structure of permafrost in the Tibetan Plateau using Ground-Penetrating Radar. Electronics, 2020, No. 9 (1), p. 56–70.

Wang Q., Shen Y. Calculation and interpretation of Ground-Penetrating Radar for temperature and relative water content of seasonal permafrost in Qinghai-Tibet Platea. Electronics, 2019, No. 8 (7), p. 731.

Поступила в редакцию 16 августа 2021 г., после доработки – 13 января 2022 г., принята к публикации 19 января 2022 г.