

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КРИОСФЕРЫ

УДК 551.341+550.834

DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2017-3(69-82)

ПРИМЕНЕНИЕ ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ
ПРИ КОМПЛЕКСНЫХ ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

М.С. Судакова^{1,2}, М.Р. Садуртдинов¹, Г.В. Малкова^{1,3}, А.Г. Скворцов¹, А.М. Царев¹

¹Институт криосферы Земли СО РАН, 625026, Тюмень, ул. Малыгина, 86, Россия; mr_sadurtdinov@mail.ru

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический ф-т,
119234, Москва, Ленинские горы, 1, Россия; m.s.sudakova@yandex.ru

³Тюменский индустриальный университет, 625026, Тюмень, ул. Володарского, 38, Россия; galina_malk@mail.ru

Рассмотрены результаты георадиолокационных исследований, полученные на территории Европейского Севера на участках с различным литологическим составом и геокриологическими условиями в верхней части разреза. Георадиолокационные исследования проводились в составе геолого-геофизического комплекса работ, включающего также сейсморазведку, изучение литологического состава поверхностных отложений, измерения мощности сезонноталого слоя щупом и определения весовой влажности пород. Георадарный метод показал высокую эффективность в условиях песчаного и песчано-торфяного разреза и низкую – в условиях суглинистого. При глубине залегания кровли многолетнемерзлых пород менее 1.5 м (при которой возможны прямые измерения) георадиолокация может быть использована как дополнительный метод для детализации изменчивости мощности и свойств пород сезонноталого слоя в пространстве, а также оценки их объемной влажности по значениям скорости электромагнитных волн. При глубине залегания кровли более 1.5 м георадиолокация является основным методом определения ее положения в разрезе. Для геологической и геокриологической идентификации границ, выявленных с помощью георадиолокации, в качестве опорной информации предлагается использовать результаты сейсморазведки. Показана перспективность применения метода георадиолокации в комплексе с полевыми геокриологическими и сейсмическими методами исследований для решения различных инженерно-геокриологических задач в рамках мониторинга криолитозоны.

Георадар, сейсморазведка, многолетнемерзлые породы, сезонноталый слой

APPLICATION OF GROUND PENETRATING RADAR
IN PERMAFROST INVESTIGATIONS

M.S. Sudakova^{1,2}, M.R. Sadurtdinov¹, G.V. Malkova^{1,3}, A.G. Skvortsov¹, A.M. Tsarev¹

¹Earth Cryosphere Institute, SB RAS, 86, Malygina str., Tyumen, 625000, Russia; mr_sadurtdinov@mail.ru

²Lomonosov Moscow State University, Department of Geology, 1, Leninskie Gory, Moscow,
119234, Russia; m.s.sudakova@yandex.ru

³Tyumen Industrial University, 38, Volodarskogo str., Tyumen, 625026, Russia; galina_malk@mail.ru

The paper presents results of GPR investigations on the territory of Russia's European North carried out in the areas of different lithologies and permafrost conditions in the upper part of the geological section. The GPR surveys were part of the integrated geological and geophysical studies that also included seismic surveying, lithological differentiation of nearsurface deposits, measurement of active layer thickness, and weight rock moisture determination. The GPR was the most effective for the study of sandy and sand-peat geological sections, whereas in loamy environments its efficiency was low. Providing the upper limit of permafrost occurs at shallow depths (less than 1.5 m), which allows direct measurements, GPR can be used as supplementary method for more detailed description of spatial variability of the active layer thickness and other properties, including volumetric moisture estimates calculated from velocities of electromagnetic waves. Alternatively, with the permafrost table occurring deeper than 1.5 m, the GPR proves to be the main method for determining its position in the section. For more accurate geological and geocryological identification of the boundaries, the GPR data interpretation ought to be constrained by seismic results. Application of the GPR in combination with geocryological and seismic methods is ascertained to be highly perspective for solving various engineering problems, which will contribute to the existing permafrost monitoring frameworks.

GPR, seismic survey, permafrost, active layer

ВВЕДЕНИЕ

Определение формы и глубины кровли многолетнемерзлых пород (ММП) и изучение свойств сезонноталого слоя (СТС) – одни из основных задач геокриологических исследований. Прямые инженерно-геокриологические исследования не всегда позволяют решить поставленные задачи. В таких случаях целесообразно использовать геофизические методы. Одним из эффективных геофизических методов для решения этой задачи является георадиолокация.

Успешное применение георадара при изучении разреза криолитозоны обеспечивают различия в электрических свойствах льда, воды, воздуха, грунта. Кровля ММП является контрастной границей для электромагнитных волн, что позволяет использовать георадиолокацию для определения ее конфигурации, оконтуривания естественных и искусственных таликов и т. п. [Омельяненко, 2001; Ермаков, Старовойтов, 2010; Садуртдинов и др., 2015, 2016; Schwamborn et al., 2002; Shean, Marchant, 2010]. В большинстве случаев кровле ММП соответствует высокоамплитудное отражение, ниже которого не прослеживаются какие-либо продолжительные рефлекторы.

Несмотря на это, многие задачи, стоящие перед георадиолокацией в связи с изучением криолитозоны, до сих пор остаются нетривиальными. В частности, построение карт границ фазового перехода, определение влажности деятельного слоя и льдистости мерзлых пород, мониторинг изменения физических свойств и др. Для решения таких задач в ряде случаев требуется применение трехмерной или псевдотрехмерной съемки, которая более трудозатратна на этапе полевых измерений и требует дополнительных ресурсов для обработки данных.

Введение георадиолокации в состав используемого геолого-геофизического комплекса при исследовании верхних горизонтов криолитозоны могло бы значительно упростить изучение деятельного слоя, которое в настоящее время осуществляется с помощью трудоемких прямых методов [Изучение..., 1992; Павлов, 2008; Павлов, Малкова, 2009], и значительно повысить детальность и достоверность определения глубины и конфигурации кровли ММП. Особенно актуально это при большой ее глубине, когда определение положения кровли ММП с помощью щупа невозможно, а бурение затратно.

Как любой геофизический метод, георадиолокация имеет ограничения, поэтому затруднительно или невозможно определение подошвы СТС в случае, если он представлен грунтами с повышенной проводимостью – глинистыми или засоленными [Владов, Судакова, 2017; Annan, 2001; Grund..., 2009]. Граница мерзлое–талое в области развития островной мерзлоты может иметь сложную трехмерную форму, поэтому для интерпретации данных может понадобиться дополнительная информация [Arcone et al., 1998].

Основная цель данной статьи – описать и оценить возможности георадиолокации в комплексе геолого-геофизических исследований в различных геологических и геокриологических условиях. Статья написана по результатам полевых геолого-геофизических исследований, проведенных на участках, расположенных в дельте р. Печоры.

Георадиолокационные исследования проводились на трех площадках, входящих в единую международную базу CALM (Circumpolar Active Layer Monitoring – международный проект мониторинга деятельного слоя). Участки расположены на геокриологических стационарах, различающихся ландшафтными и геокриологическими условиями и, соответственно, электромагнитными и другими физическими свойствами: разрез поверхностных отложений на стационаре “Болванский” (CALM R24) сложен преимущественно суглинками, на стационаре “Кашин” (CALM R24A-1) – торфом и песками, на стационаре “Кумжа” (CALM R24A-2) – песками.

На этих участках одновременно с георадиолокацией проводились и другие работы, что позволило сделать выводы о месте и возможностях георадиолокации в комплексе геокриологических и геофизических исследований. Основные характеристики участков и методы их изучения в 2015 г. приведены в табл. 1.

УЧАСТКИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Геокриологические, метеорологические, ландшафтные и геофизические (сейсмоакустические и георадарные) работы проводились на острове Кашин, на участках Кумжа и Болванский (рис. 1, А). Эти участки расположены на севере Ненецкого автономного округа в дельте р. Печоры.

В регионе наблюдаются области сплошного, прерывистого и островного распространения

Таблица 1. Характеристики участков работ и методы их исследований

Стационар	Тип грунта	Глубина кровли ММП, м	Тип мерзлоты	Температура ММП, °С	Проводимые исследования
Болванский	Суглинки	0.2–5.0	Сплошная	–2	Измерения мощности щупом, георадиолокация, сейсморазведка, термометрия
Кашин	Торф и песок	0.3–1.5	Островная	0...–1	Измерения мощности щупом, измерения влажности, георадиолокация, термометрия
Кумжа	Песок	2–9	Островная	0...–0.5	Георадиолокация, сейсморазведка, термометрия



Рис. 1. Снимки района исследований.

А – общий вид; Б – стационар “Болванский”, площадка CALM R24; В – стационар “Кашин”, площадка CALM R24A-1; Г – стационар “Кумжа”, площадка CALM R24A-2.

ММП [*Вечная мерзлота...*, 2002]. Здесь развиты как несквозные, так и сквозные талики. Существенное тепляющее влияние оказывает р. Печора, ее рукава и протоки.

В соответствии с представлениями о характере распространения ММП в данном регионе геокриологический стационар “Болванский” попадает в область сплошного распространения ММП с температурами около -2°C , а опорные площадки “Кашин” и “Кумжа”, расположенные в дельте р. Печоры, попадают в область островного распространения ММП с температурами ММП от 0 до -1°C .

Участок Болванский

“Болванский” – один из геокриологических стационаров, оборудованных в 1980-х гг. на Европейском Севере для наблюдения за динамикой криогенных процессов. На стационаре “Болванский” мониторинг температурного режима в скважинах проводится с 1983 г., а мониторинг сезонного оттаивания на площадке CALM R24 – с 1999 г. [*Малкова, 2010*].

Стационар расположен на южном берегу Печорской губы в подзоне южной тундры (Большеземельская тундра европейской части России), в пределах ледово-морской равнины с абсолютными отметками 20–50 м. Территория относится к области сплошного распространения ММП, несквозные талики встречаются под днищами логов, хасыреев и озер. Поверхностные отложения представлены верхнечетвертными прибрежно-морскими супесями и суглинками с включениями гальки, которые на глубинах 10–15 м подстилаются среднечетвертными ледово-морскими валунными суглинками.

На стационаре “Болванский” площадка CALM расположена в типичных ландшафтных условиях на вершине пологого увала, сложенного суглинками (см. рис. 1, Б). Мощность торфа в пределах площадки изменяется от 1 до 22 см, а в среднем составляет 5 см.

Участок Кашин

Геокриологический стационар “Кашин” оборудован в 2009 г. Стационар расположен в краевой части дельты р. Печоры, на острове в Коровинской губе. Мониторинг СТС в рамках программы CALM (R24A-1) здесь проводится с 2010 г.

Площадка CALM на о. Кашин расположена в пределах I морской террасы с абсолютными отметками до 10 м (см. рис. 1, В). Поверхность террасы имеет пологоволнистый рельеф и расчленена озерными котловинами и ложбинами стока.

Остров Кашин в силу своей приуроченности в краевой части дельты р. Печоры расположен в зоне островного распространения многолетне-

мерзлых пород. По геофизическим данным мощность ММП в пределах острова не превышает 30–40 м [*Садуртдинов и др., 2012*]. Остров сложен мерзлыми песками, в верхней части разреза на отдельных участках встречается торф различной мощности (на площадке от 0 до 30 см).

Как показали предыдущие исследования [*Малкова и др., 2015*], глубина протаивания пород на площадке “Кашин” CALM R24A-1 тесно связана с литологией, в частности с мощностью торфа. Мощность СТС от 70 до 140 см характерна для песчаных участков с тундровой растительностью и мощностью торфа не более 10–12 см. На участках болот, торфяников и пушицевых валиков с мощностью торфа от 15 до 30 см глубина протаивания не превышает 70 см.

Участок Кумжа

На участке Кумжа исследования проводятся с 2013 г., площадка CALM R24A-2 оборудована в 2014 г. (см. рис. 1, Г).

Участок расположен на останце I аллювиально-морской террасы в дельте р. Печоры. В разрезе с поверхности повсеместно залегают пески плотного сложения с горизонтами ожелезнения и следами нефтяного загрязнения. В конце 1970-х гг. на этом останце располагалась площадка разведочного бурения Кумжинского месторождения, в результате чего естественный ландшафт был существенно нарушен. До настоящего времени еще сохранились следы техногенеза – вездеходные колеи, выемки, насыпи и пр. До техногенного вмешательства в пределах возвышенного тундрового участка ММП залегали повсеместно (по фондовым материалам геокриологических исследований в 1980-е гг.), но после нарушения растительного покрова и рельефа поверхности глубина протаивания стала постепенно увеличиваться, и в настоящее время наблюдается опущенная кровля, где есть техногенные нарушения. О мощности ММП достоверных сведений нет.

Площадка CALM R24A-2 расположена в 100 м от края карьера на относительно ненарушенном участке с сохраненной растительностью: лишайниковая тундра, чередующаяся с березовым редколесьем. На локальных участках прослеживаются следы старых вездеходных колеи.

Результаты измерения температурного режима в скважинах глубиной до 3 м свидетельствуют о неустойчивом состоянии ММП в данных ландшафтных и климатических условиях. Мерзлота с поверхности непосредственно под деятельным слоем существует фрагментарно и приурочена к ненарушенным участкам лишайниковой тундры. На таких участках глубина протаивания летом достигает 1.8–2.0 м, а в зимний период оттаившие грунты промерзают на всю глубину сезонного слоя.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Схемы фактического материала на указанных площадках представлены на рис. 2. Георадиолокационные исследования на всех площадках проводились методом профилирования по сети перпендикулярных профилей, расстояние между которыми 10 м. На участках Болванский и Кашин проводились измерения глубины протаивания пород металлическим щупом во всех точках пересечения профилей, на участке Кашин в тех же точках были сделаны измерения весовой влажности приповерхностного слоя. На отдельных профилях участков Болванский и Кумжа были проведены сейсмические исследования.

Георадиолокация

Георадиолокация – неразрушающий бесконтактный метод исследования верхней части геологического разреза с помощью высокочастотных электромагнитных волн. Возбуждение и прием

происходят либо на дневной поверхности, либо в непосредственной близости от нее. В передающей антенне генерируется сверхвысокочастотный электромагнитный импульс (частота 50–2000 МГц), который распространяется в изучаемом разрезе, отражается от границ слоев с различными электромагнитными свойствами и (или) объектов, отличающихся по своим свойствам от вмещающей среды, возвращается обратно к приемной антенне, где записывается в виде зависимости амплитуды сигнала от времени [Финкельштейн и др., 1986; Владов, Судакова, 2017; Ground..., 2009].

Между моментом времени, когда источник излучает сигнал, и моментом времени, когда отражения вернутся к приемнику, есть определенная задержка. Это время задержки определяется расстоянием от источника антенны георадара до цели и скоростью, с которой волны распространяются через среду. Суть георадиолокации, как и радио-

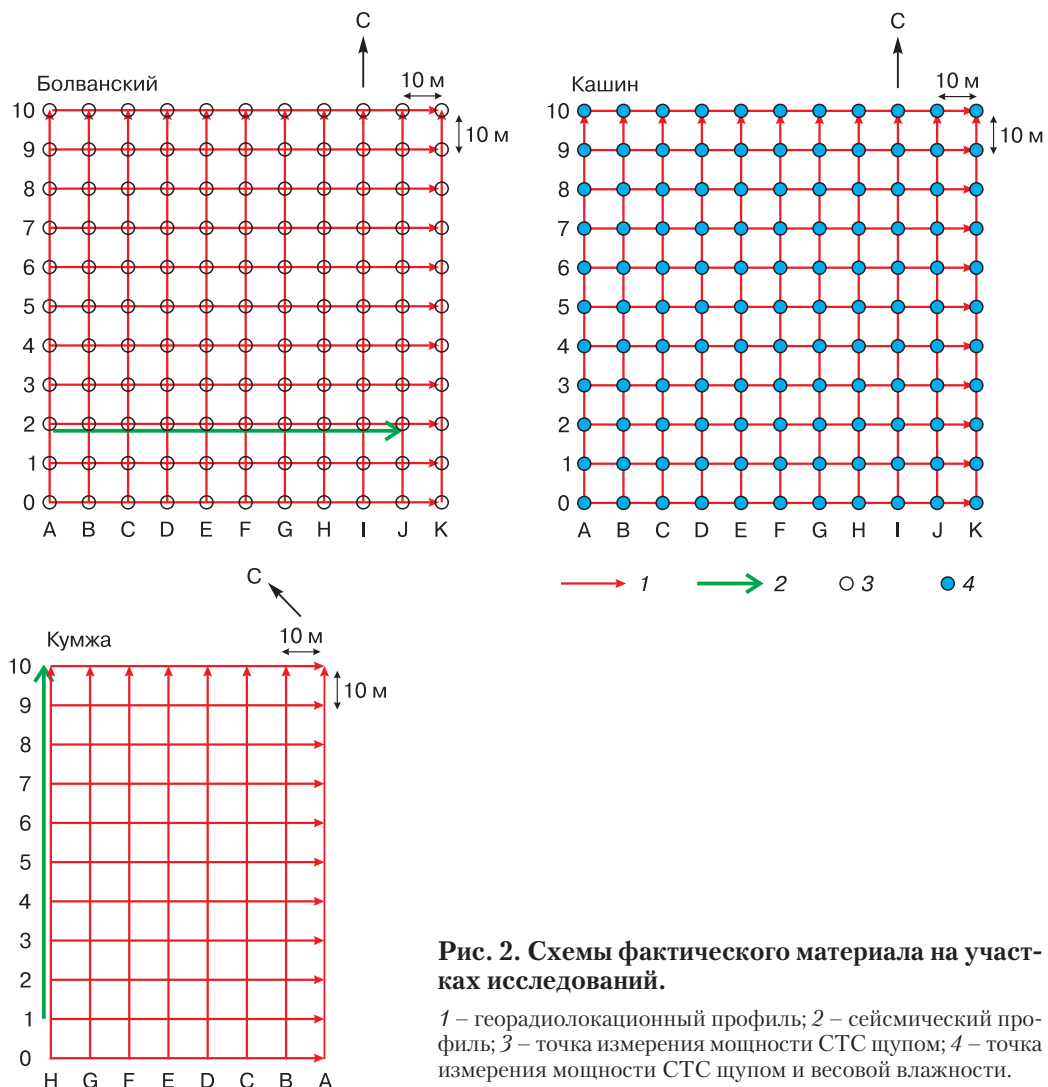


Рис. 2. Схемы фактического материала на участках исследований.

1 – георадиолокационный профиль; 2 – сейсмический профиль; 3 – точка измерения мощности СТС щупом; 4 – точка измерения мощности СТС щупом и весовой влажности.

локации, заключается в измерении этого времени задержки: чем дольше время задержки – тем больше расстояние до цели при условии постоянства скорости.

После того как отраженный сигнал записан, георадар перемещается на следующую точку, также расположенную на поверхности вдоль линии профиля. Таким образом непрерывно проводят множественные измерения: расстояния между точками измерения на профиле составляют сантиметры, в то время как длины профилей – десятки и сотни метров. В результате георадарные данные должны представлять собой изображение контраста электромагнитных свойств в геологической среде в поперечном сечении [Davis, Annan, 1989] – “электромагнитный разрез” – георадарограмму.

Успешность применения георадиолокации в области развития многолетнемерзлых пород объясняется тем, что значения электромагнитных свойств воды и льда отличаются на порядки. Относительная диэлектрическая проницаемость незамерзшей воды на георадарных частотах при температуре, близкой к 0 °С, равна 87–88, тогда как для чистого льда – 3.2 [Davis, Annan, 1989; Brosten et al., 2009].

Отражение электромагнитных волн на границе в большей степени обусловлено контрастом диэлектрической проницаемости, следовательно, георадар является отличным инструментом для картирования границы между водонасыщенными и мерзлыми породами [Старовойтов, 2008; Arcone et al., 1998; Hinkel et al., 2001].

Скорость электромагнитной волны (V , см/нс) в среде с диэлектрической проницаемостью (ϵ) определяется следующим соотношением:

$$V = 30/\sqrt{\epsilon}, \quad (1)$$

где 30 см/нс – скорость электромагнитной волны в вакууме (воздухе).



Рис. 3. Полевые георадиолокационные работы на участке Кумжа.

Разрешающая способность метода равна примерно половине длины волны (λ), которая связана со скоростью электромагнитной волны в среде и частотой георадарного сигнала (f):

$$\lambda = V/f. \quad (2)$$

Чем выше частота, тем меньше длина волны и меньше размер локальных неоднородностей или мощностей слоев, которые с помощью георадиолокации можно выделить в разрезе. Однако высокие частоты затухают быстрее, чем низкие, поэтому при выборе центральной частоты аппаратуры для решения конкретной задачи предпочтение мы отдаем более низкой частоте для достижения заданной глубинности, пренебрегая высокой разрешающей способностью.

Глубина проникновения георадарного сигнала ограничена его затуханием в разрезе: чем больше электрическая проводимость среды, по которой распространяется георадарный сигнал, тем меньше возможная глубинность исследования. Проводимость возрастает с ростом глинистости, влажности, засоленности. За исключением редких случаев, в глинистых или засоленных грунтах георадиолокация “не работает” и не применяется [Владов, Судакова, 2017; Ground..., 2009].

В настоящих работах применялся георадар “Зонд-12е” (Radar inc., Рига, Латвия) с антенной типа “бабочка” с центральной частотой в воздухе 300 МГц (рис. 3). Расстояние между трассами (точками на профиле) составило не более 10 см. Привязка трасс осуществлялась с помощью меток, которые ставились каждые 10 метров, в точках пересечения профилей. Параметры записи подбирались исходя из глубины залегания кровли ММП.

Граф обработки данных на всех участках состоял из следующих процедур:

- масштабирование георадарограмм по меткам и уменьшение шага между трассами до 10 см;
- корректировка начала записи – введение статической поправки;
- полосовая фильтрация (фильтр Ормсби) в полосе, соответствующей полезному сигналу;
- амплитудная коррекция на сферическое расхождение.

Принцип работы и подробное описание процедур можно найти в [Хаттон, 1989; Yilmaz, 2001]. После применения данных процедур проводилось пикирование осей синфазности отраженных волн, увязка во взаимных точках, построение глубинных разрезов и карт. На участке Кумжа с помощью гипербол дифракции определялись средние по разрезу эффективные скорости выше и ниже уровня грунтовых вод.

Сейсморазведка. На участках Болванский и Кумжа проведены сейсмические исследования методом преломленных волн (МПВ) с помощью

продольных и поперечных *SH*-волн. Шаг между пунктами приема составлял 2 м. Для регистрации сейсмического сигнала использовалась цифровая сейсмостанция “Эллисс-2” (ООО “Геосигнал”, Москва, РФ).

Измерения мощности активного слоя. На участках Кашин и Болванский с помощью металлического щупа (длиной 1.5 м) проводились измерения глубины протаивания на каждом пикете площадок CALM размером 100 × 100 м с сеткой пикетов через 10 м. Зондирование глубины сезонного оттаивания щупом основано на значительном изменении механических свойств пород при заморозии (оттаивании).

Определение литологического состава пород и их влажности. Определение влажности пород СТС на площадке CALM о. Кашин проводилось в каждой точке. Через каждые 10 м закладывались закопашки в сезонноталом слое, для которых проводились литологические описания разреза. На каждом пикете отбиралась одна проба грунта с глубины 20 см для определения влажности грунта. Влажность определялась термостатно-весовым способом согласно [ГОСТ 5180-2015, 2015]. После взвешивания влажного и сухого (вы-

сушенного при температуре 100–105 °С) грунта рассчитывались два значения влажности: W_v (отношение веса воды к весу влажного грунта) и W_c (отношение веса воды к весу сухого грунта).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Участок Болванский

На рис. 4 приведена характерная георадаграмма, полученная на площадке (профиль А2–J2): георадарные данные представляют собой быстро затухающую запись. Как до, так и после обработки на большинстве георадарограмм не удалось проследить оси синфазности, которые могли бы соответствовать физическим или геологическим границам.

Верхняя часть разреза сложена влажными суглинками, для которых характерно высокое затухание электромагнитных волн на георадарных частотах, поэтому на большей части площадки метод георадиолокации не дал положительных результатов. Однако на отдельных участках площадки, где верхняя часть разреза представлена песками, можно выделить волну, отраженную от кровли ММП. В качестве иллюстрации на рис. 5 приведен

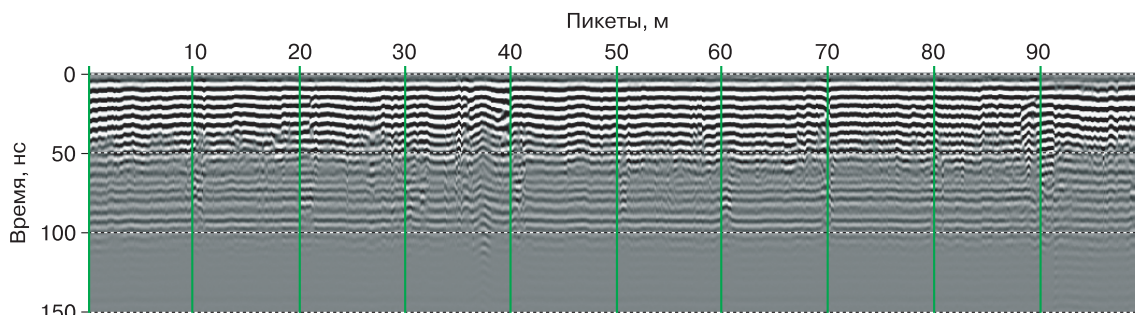


Рис. 4. Георадарограмма по профилю А2–J2 (станция “Болванский”).

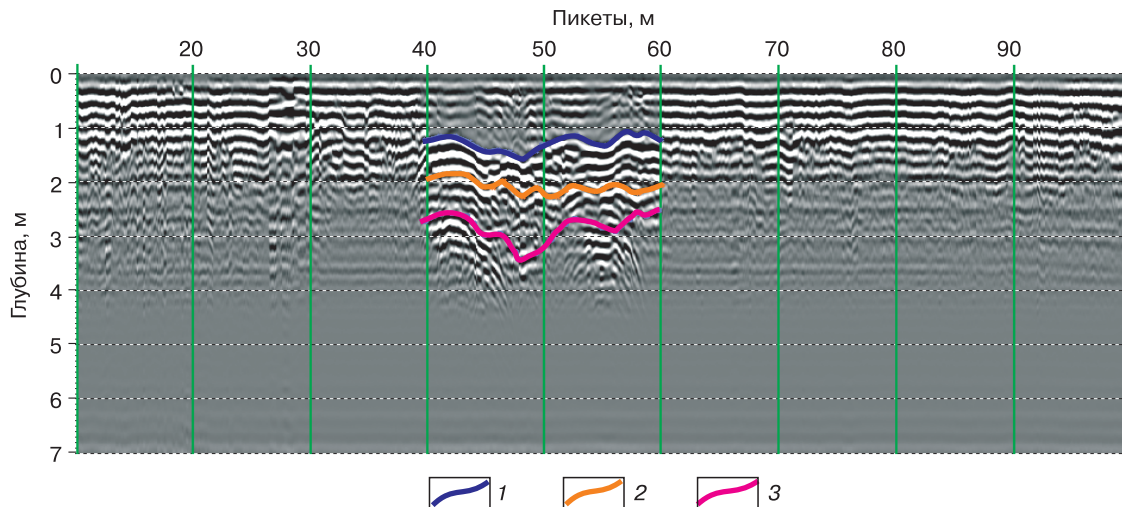


Рис. 5. Глубинный георадиолокационный разрез по профилю J1–J10 (станция “Болванский”).

1 – кровля ММП; 2 – граница в толще ММП; 3 – кратная волна.

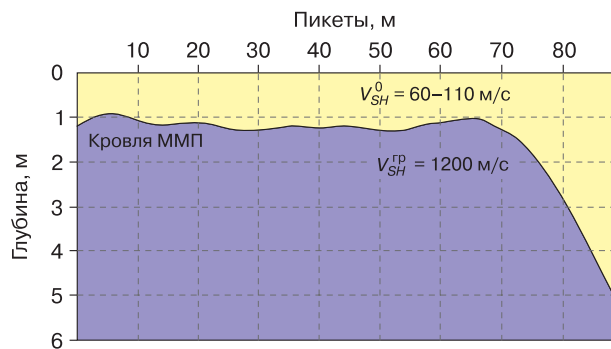


Рис. 6. Сейсмогеокриологический разрез по профилю А2–J2, полученный с помощью пределенных поперечных SH-волн (стационар “Болванский”).

V_{SH}^0 – скорость поперечных SH-волн в первом слое; $V_{SH}^{гр}$ – граничная скорость на кровле ММП.

глубинный георадиолокационный разрез по профилю J1–J10. На участке профиля пк40–пк60 четко прослеживается волна, отраженная от кровли ММП, от литологической границы в толще ММП и кратная волна от кровли ММП.

Георадиолокационные исследования на данном участке в целом дали положительные результаты лишь фрагментарно.

По профилю А2–J2 проводились также сейсмические исследования. Результаты приведены на рис. 6. Расхождения с прямыми измерениями мощности СТС щупом на пикетах 0–70 м (А2–Н2) составили менее 10 %. В юго-восточной части площадки, расположенной в пойме озера, по данным сейсмических исследований отмечается резкое понижение кровли ММП до 5 м.

Участок Кашин

Карта мощности СТС, измеренной щупом, приведена на рис. 7. Исследуемый участок характеризуется неравномерной глубиной протаивания. Мощность СТС меняется на различных пикетах от 30 до 140 см [Малкова и др., 2015].

Целью георадиолокационных исследований являлось детальное изучение мощности СТС и

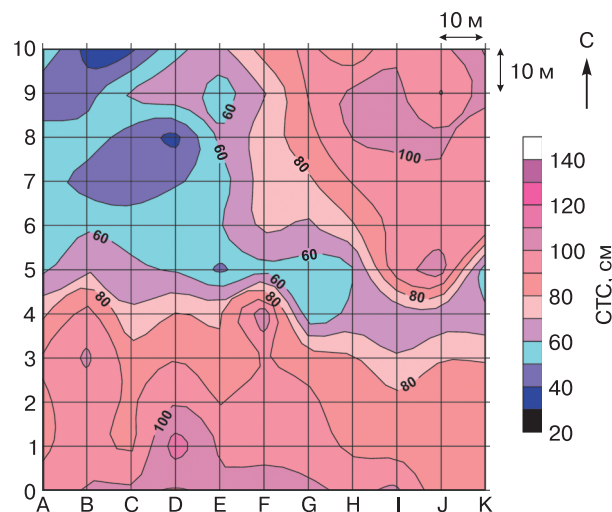


Рис. 7. Карта мощности СТС на площадке CALM R24A-1 по результатам измерения щупом (стационар “Кашин”, август 2015 г.).

конфигурации кровли ММП на площадке. В отличие от участка на площадке Болванский, верхняя часть разреза здесь представлена торфом и песчаными отложениями, что является благоприятным фактором для использования метода георадиолокации.

Характерная обработанная радарограмма, полученная по одному из профилей, приведена на рис. 8. На ней отчетливо выделяется ось синфазности отражения от кровли ММП.

После выделения (“пикировки”) осей синфазности была проведена оценка точности времени прихода отраженной от кровли ММП волны в точках пересечения профилей. Средняя абсолютная погрешность равна 0.4 нс, что составляет около двух дискретов по времени, средняя относительная невязка составила 3.5 %, максимальная – 15 %, минимальная – менее 0.1 %. Величина погрешности является допустимой и может быть объяснена, во-первых, изменчивостью конфигурации границы в пространстве и, во-вторых, неточностью привязки точек наблюдения.

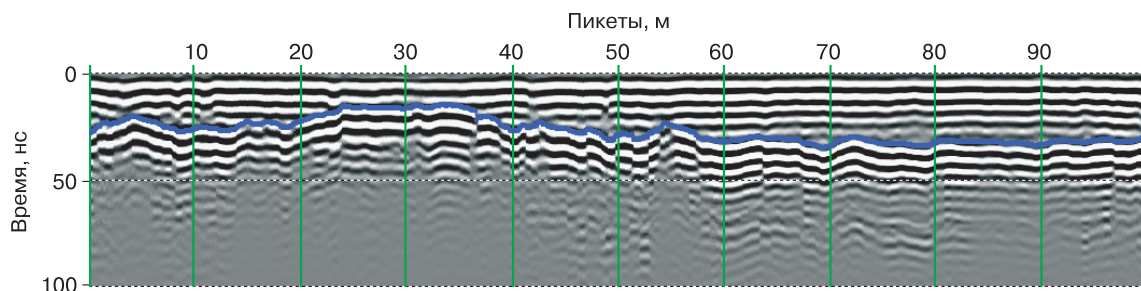


Рис. 8. Радарограмма по профилю I0–I10 после обработки (стационар “Кашин”).

Фиолетовым цветом показана ось синфазности волны, отраженной от кровли ММП.

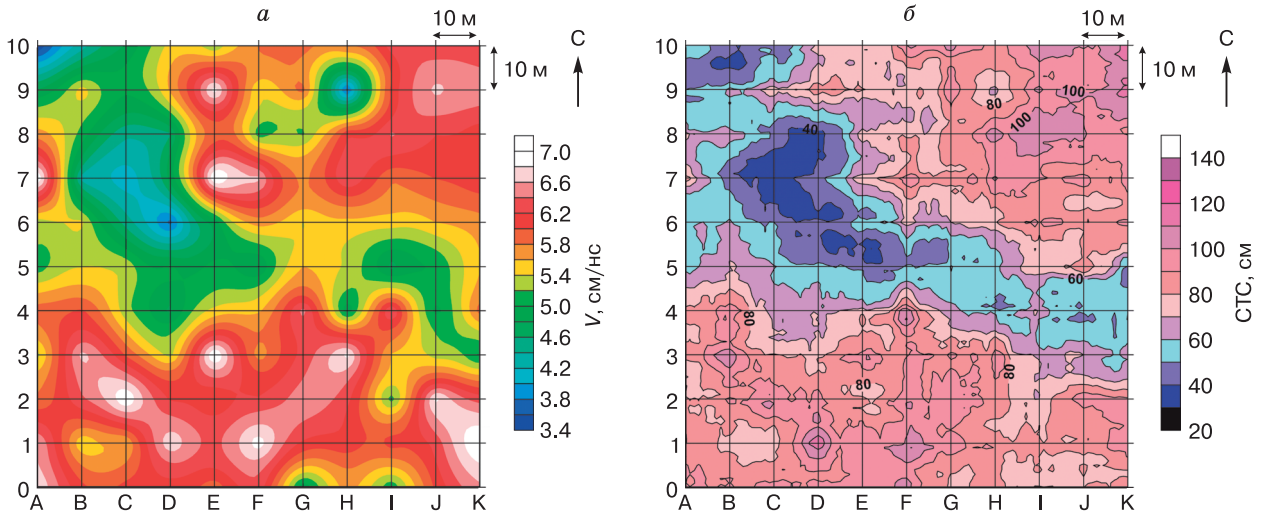


Рис. 9. Результаты георадиолокационной съемки на площадке CALM R24A-1 (станция “Кашин”).
a – карта скоростей электромагнитных волн; *б* – карта мощности СТС.

На радарограммах, полученных на площадке, отсутствуют гиперболы дифракции от локальных неоднородностей, поэтому определение скорости электромагнитных волн и, соответственно, точное определение глубины границы по радарным данным невозможно. Для расчета и построения карты распространения скорости электромагнитных волн (рис. 9, *a*) были использованы данные о мощности СТС, полученные с помощью щупа (см. рис. 7).

Скорость электромагнитных волн в пределах площадки различается более чем в 2 раза, полученные значения (от 3.4 до 7.1 см/нс) довольно низкие, что говорит о высокой влажности, характерной как для торфов и грунтов СТС вообще, так и для участка Кашин в частности.

Значения скорости, рассчитанные по сети 10 × 10 м, интерполированы на сеть с ячейкой 1 м и построена карта мощности СТС по результатам георадиолокации с привязкой к значениям, полученным с помощью щупа (см. рис. 9, *б*). Карта отражает особенности залегания подошвы СТС, выявленные прямыми наблюдениями, при этом детализируя ее.

По значениям диэлектрической проницаемости возможно рассчитать объемную влажность ($W_{об}$) с применением различных эмпирических формул. В частности, по формуле Топпа [Топп *et al.*, 1980]:

$$W_{об} = -5.3 \cdot 10^{-2} + 2.92 \cdot 10^{-2} \epsilon - 5.5 \cdot 10^{-4} \epsilon^2 + 4.3 \cdot 10^{-6} \epsilon^3. \quad (3)$$

Формула (3) считается универсальной для расчета влажности песчано-глинистых грунтов по диэлектрической проницаемости, измеренной в

георадарном диапазоне частот [*Near-Surface...*, 2005].

Интересным представляется сравнение значений весовой влажности приповерхностного слоя, измеренных во время полевых работ в точках по сети 10 × 10 м и рассчитанной по данным георадиолокации объемной влажности. Зависимости скорости электромагнитной волны или диэлектрической проницаемости грунтов от весовой влажности в литературе найти не удалось, поэтому сравнение можно провести только на качественном уровне. Карты влажности приведены на рис. 10. Характерные участки высокой и низкой влажности практически совпадают: на обеих картах северо-западная часть участка характеризуется самыми высокими значениями влажности. В целом значения объемной влажности больше весовой, что принципиально правильно, так как весовая характеризует только приповерхностный слой, а полученная по данным георадиолокации объемная влажность – весь СТС, включая зону полного водонасыщения.

Полученные результаты подтвердили, в частности, ранее сделанные выводы [Малкова *и др.*, 2015]: для ландшафтных условий участка Кашин глубина сезонного протаивания прежде всего зависит от мощности торфа в активном слое – чем больше мощность торфа, тем меньше глубина протаивания ММП. Максимальная глубина протаивания до 100–130 см наблюдается на участках с развитием минеральных грунтов и мощностью торфа до 10 см. При мощности торфа 0.5–1.0 м и более увеличение глубины протаивания происходит также на участках локальных обводненных понижений за счет отепляющего влияния поверхностных вод.

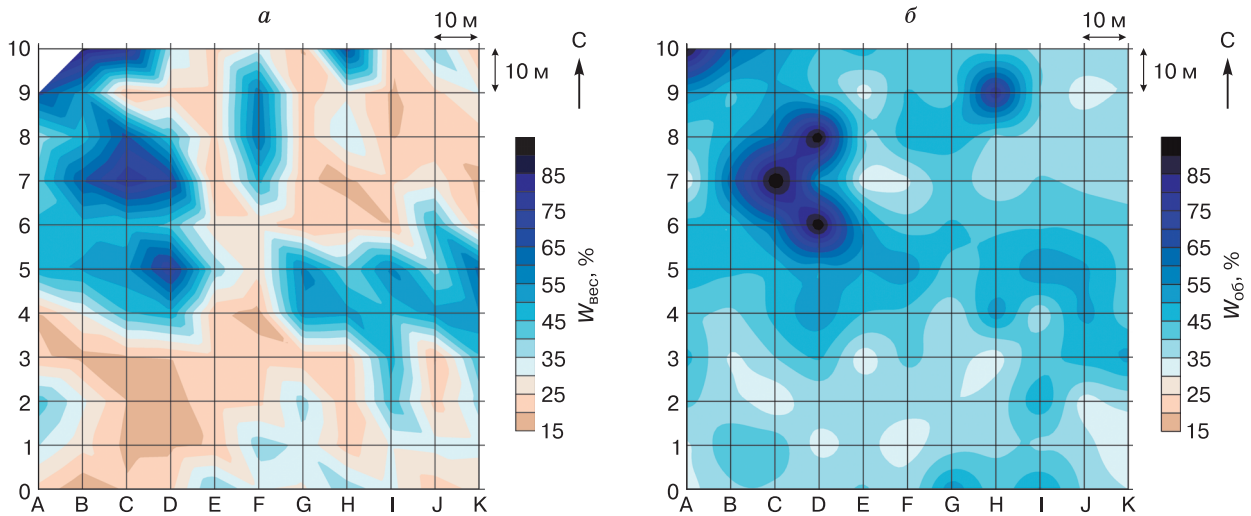


Рис. 10. Результаты исследований на площадке CALM R24A-1 (станционар “Кашин”).

a – карта весовой влажности (прямые наблюдения); *б* – карта объемной влажности (по данным георадиолокации).

Сходство карт влажности, полученных прямыми измерениями и с помощью георадиолокации, позволяет утверждать, что георадиолокация может быть использована для оценки влажности талого слоя.

Участок Кумжа

Практически на всей площадке кровля ММП залегает на глубине более 1.5 м, что делает невоз-

можным определение ее положения в разрезе с помощью щупа. Для решения этой задачи на исследуемом участке был использован комплекс геофизических методов, который включал методы георадиолокации и сейсморазведки.

На рис. 11 приведена характерная для данного участка радарограмма по профилю Н0–Н10. На данных георадиолокации на всем протяжении профиля отчетливо выделяются три оси синфаз-

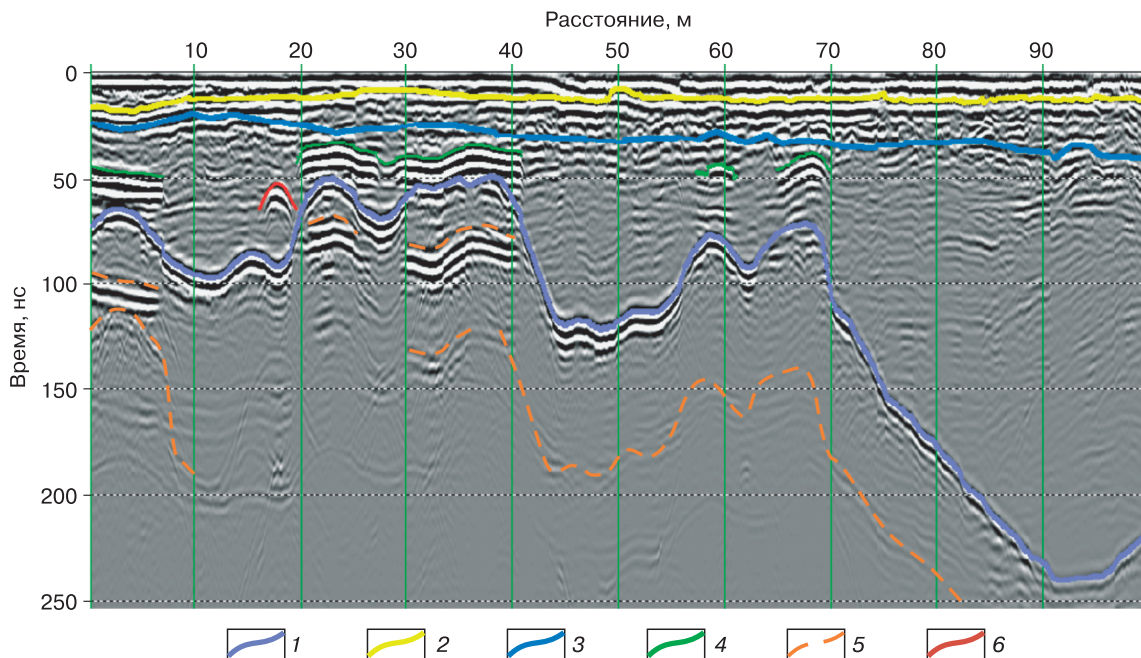


Рис. 11. Радарограмма, полученная по профилю Н0–Н10 после обработки с выделенными осями синфазности (станционар “Кумжа”).

1 – предположительно кровля ММП; 2 – подошва песков с нефтяным загрязнением; 3 – кровля зоны полного водонасыщения; 4 – предположительно “боковые” отражения от кровли ММП; 5 – кратные и неполнократные волны; 6 – дифрагированная волна.

ности (показаны желтым, синим и фиолетовым цветами). Анализ гипербол дифракции, присутствующих на отдельных радарограммах (одна из них показана красным цветом), показал, что скорость электромагнитных волн в породах выше “синей” оси синфазности около 12 см/нс, ниже – 7 см/нс. Это является одним из признаков того, что данная граница соответствует границе зоны полного водонасыщения (ЗПВ). Фиолетовым цветом выделена граница, предположительно соответствующая кровле ММП. Помимо указанных волн на радарограмме прослеживается также граница в толще талых пород, соответствующая подошве песков с нефтяным загрязнением, что было подтверждено данными бурения неглубоких зондировочных скважин в пределах площадки.

Кроме протяженных осей синфазности, на многих радарограммах видны высокоамплитудные фрагменты отражений (показаны зеленым цветом), приуроченные к участкам минимального времени прихода волны, отраженной от кровли ММП. Их геологическая интерпретация представляется затруднительной, вероятно, это “боковые” отражения от кровли ММП, обусловленные ее неровностью в зонах минимального протаивания. Ниже кровли ММП на радарограмме можно выделить большое количество кратных и неполнократных волн от границы ЗПВ и кровли ММП (фрагменты некоторых показаны оранжевым цветом).

Для получения опорных данных о глубине основных отражающих границ и для их геокриологической идентификации на участке профиля Н0–Н10 были выполнены сейсмические исследования методом МПВ. Сейсмогеокриологический разрез приведен на рис. 12. На разрезе выделены две основные границы: кровля ММП и граница ЗПВ.

На основе данных сейсморазведки и георадиолокации построен сводный геолого-геофизический

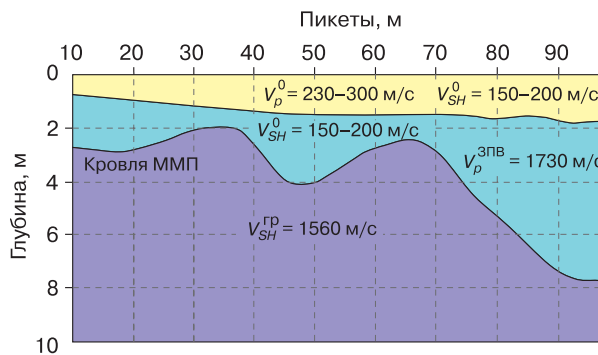


Рис. 12. Сейсмогеокриологический разрез на участке профиля Н0–Н10 (пк10–98), полученный с помощью преломленных продольных и поперечных волн (стационар “Кумжа”).

$V_p^0, V_p^{ЗПВ}$ – скорости продольных волн в зоне аэрации и зоне полного водонасыщения; $V_{SH}^0, V_{SH}^{ГП}$ – скорость поперечных SH-волн в слое выше ММП и на кровле ММП соответственно.

ский разрез (рис. 13), где выделены три границы: подошва песков с нефтяным загрязнением, граница ЗПВ и кровля ММП. Незначительные расхождения в глубине границ по данным сейсморазведки и георадиолокации объясняются разной разрешающей способностью методов. В большей степени это относится к границе ЗПВ ввиду относительно небольшой ее глубины. Определение скорости электромагнитных волн в нижнем слое по данным георадиолокации невозможно, однако эта граница может быть однозначно интерпретирована как кровля ММП по значениям сейсмических скоростей.

Сравнительный анализ полученных данных показывает, что с учетом результатов МПВ удалось надежно выполнить геологическую иденти-

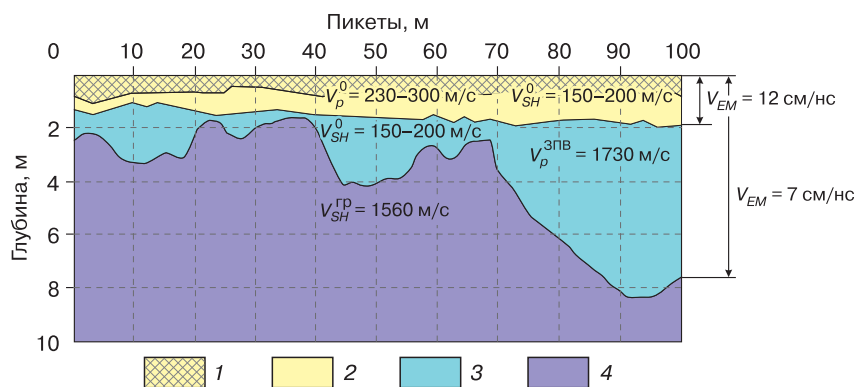


Рис. 13. Сводный геолого-геофизический разрез по профилю Н0–Н10 (стационар “Кумжа”).

1 – пески с нефтяным загрязнением; 2 – пески без нефтяного загрязнения; 3 – зона полного водонасыщения; 4 – многолетнемерзлые породы.

$V_p^0, V_p^{ЗПВ}$ – скорости продольных волн в зоне аэрации и зоне полного водонасыщения; $V_{SH}^0, V_{SH}^{ГП}$ – скорость поперечных SH-волн в слое выше ММП и на кровле ММП соответственно; V_{EM} – скорость электромагнитных волн.

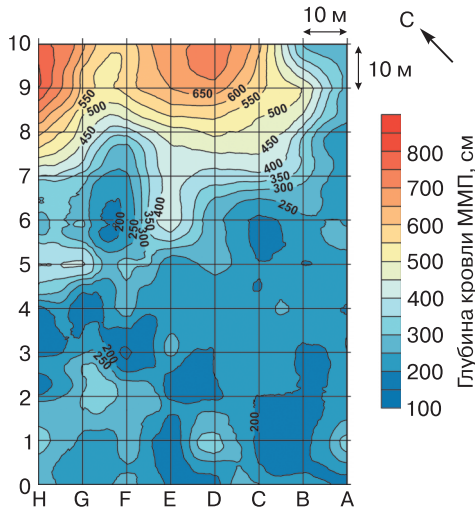


Рис. 14. Карта глубины ММП по результатам георадиолокационной съемки на площадке CALM R24A-2 (стационар “Кумжа”).

фикацию основных отражающих границ и определить их положение в пространстве.

В точках пересечения профилей была выполнена оценка точности определения времени прихода отраженной от кровли ММП волны по данным георадиолокации. Средняя абсолютная погрешность равна 3 нс, средняя относительная невязка составила 3 %, максимальная – 15 %, минимальная – менее 0.03 %. Величина погрешности является допустимой. Как и на участке Кашин, это, вероятно, связано со сложным строением и пространственной изменчивостью кровли ММП и неточностью привязки точек наблюдения.

Эффективная скорость электромагнитных волн, определенная по гиперболам дифракции от локальных объектов, расположенных ниже уровня грунтовых вод (УГВ), находится в пределах 6.2–7.7 см/нс, среднее значение равно 7 см/нс; оно было использовано для построения карты глубины залегания кровли ММП (рис. 14). Небольшие вариации скорости электромагнитных волн сви-

детельствуют о постоянстве литологии в пределах площадки.

По результатам георадиолокационной съемки можно сделать вывод, что в ненарушенных ландшафтных условиях при сохраненном растительном покрове мерзлые толщи сливающего типа (ММП непосредственно под СТС) распространены в южной половине площадки CALM R24A-2. Здесь по данным георадиолокации кровля ММП прослеживается на глубинах от 1.5 до 2.5 м. В зимнее время протаявший горизонт полностью промерзает, что подтверждают данные термических наблюдений в скважинах [Малкова и др., 2016].

В северной половине площадки сохраняются следы техногенных нарушений, встречаются участки, лишенные растительного покрова в результате многократного проезда транспорта. Кровля ММП постепенно понижается от 3 до 9.5 м, что, несомненно, является несквозным таликом, поскольку интенсивное охлаждение и сезонное промерзание пород в зимнее время при отсутствии растительного покрова происходит только до глубины 2.5–3.0 м [Малкова и др., 2016].

Уровень грунтовых вод по данным георадиолокации на площадке “Кумжа” находится на глубине 1–2 м.

Кроме вышеописанных границ на радарограммах, полученных на участке, наблюдаются другие оси синфазности и особенности волновой картины, являющиеся отражением сложной структуры разреза. Для их геологической идентификации необходимо бурение скважин на территории площадки или вблизи нее.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты применения георадиолокации соответствуют современным представлениям о распространении электромагнитных волн в геологической среде.

Использованный комплекс геокриологических и геофизических методов показал его высокую эффективность в решении геокриологических задач.

Таблица 2. Виды исследований для решения инженерно-геокриологических задач при различных геокриологических условиях

Тип разреза	Глубина кровли ММП, м	Метод исследований			
		Прямые измерения щупом	Сейсморазведка	Георадиолокация	Измерение влажности в приповерхностном слое
Глинистый	<1.5	+	+/-	-	+
	>1.5	-	+	-	-
Песчаный	<1.5	+	+/-	+	+
	>1.5	-	+	+	-

Примечание. “+” – необходимо использовать; “+/-” – для получения дополнительных данных; “-” – использование неэффективно.

Исследования были проведены на участках с различным литологическим и геокриологическим строением, что позволяет сделать выводы о целесообразности и эффективности использования того или иного вида исследований для решения инженерно-геокриологических задач в различных типах геологического разреза (табл. 2).

На стационаре “Болванский” разрез сложен в основном влажными суглинками, и высокое затухание электромагнитных волн на георадарных частотах не позволило полностью решить поставленную задачу с помощью георадиолокации – кровля ММП прослеживается на локальных участках с песчаным разрезом. Однако измерения мощности СТС с помощью щупа в комплексе с сейсмическими исследованиями позволили надежно проследить кровлю ММП. На участках с опущенной кровлей мерзлоты эффективным оказалось использование сейсморазведки.

На стационарах “Кашин” и “Кумжа” верхняя часть разреза сложена малопоглощающими песками и торфом. Здесь кровля ММП отчетливо выделяется на всех радарограммах.

На о. Кашин мощность СТС небольшая, что позволяет проводить ее измерения прямыми методами, поэтому георадиолокация здесь может применяться как дополнительный метод. Площадное распределение объемной влажности талого слоя, полученное по данным георадиолокации, подтверждает выводы о зависимости глубины протаивания от мощности торфа и содержания воды в активном слое. Более того, сходство карт влажности, построенных по данным георадиолокации и прямых наблюдений, позволяет сделать вывод о целесообразности применения георадиолокации для оценки площадной изменчивости влажности пород в талом слое. В таком случае можно отказаться от прямых измерений весовой влажности приповерхностного слоя или уменьшить их количество.

На участке Кумжа кровля ММП залегает значительно глубже 100 см, что делает невозможным ее картирование прямыми методами, и здесь георадиолокация является основным методом изучения. Однако для точной идентификации и привязки по глубине основных геокриологических границ предпочтительнее использовать методы сейсморазведки на опорных георадарных профилях.

Результаты исследований свидетельствуют о перспективности применения метода георадиолокации в комплексе с сейсмическими и прямыми геокриологическими методами исследований для решения инженерно-геокриологических задач и мониторинга криолитозоны, в частности, на площадках CALM.

Работы выполнены при финансовой и технической поддержке международных проектов CALM, TSP и РНФ (грант 16-17-00102).

При проведении полевых работ большое содействие оказывали сотрудники заповедника “Ненецкий” и лично директор С.А. Золотой.

Литература

- Вечная** мерзлота и освоение нефтегазоносных районов / Под ред. Е.С. Мельникова, С.Е. Гречищева. М., ГЕОС, 2002, 402 с.
- Владов М.Л.** Георадиолокация: от физических основ до перспективных направлений. Учеб. пособие / М.Л. Владов, М.С. Судакова. М., ГЕОС, 2017, 240 с.
- ГОСТ 5180-2015.** Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. М., Стандартинформ, 2015, 30 с.
- 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.
- Изучение** инженерно-геологических и гидрогеологических условий верхних горизонтов пород в нефтегазоносных районах криолитозоны (Методическое руководство) / Под ред. Е.С. Мельникова, С.Е. Гречищева, А.В. Павлова. М., Недра, 1992, 288 с.
- Малкова Г.В.** Мониторинг среднегодовой температуры пород на стационаре “Болванский” // Криосфера Земли, 2010, т. XIV, № 3, с. 3–14.
- Малкова Г.В., Садуртдинов М.Р., Скворцов А.Г., Царев А.М.** Мониторинг криогенных геосистем в Ненецком автономном округе, их современное состояние и тенденции изменения // Тр. Междунар. конф. “Арктика, Субарктика: мозаичность, контрастность, вариативность криосферы” / Под ред. В.П. Мельникова, Д.С. Дроздова. Тюмень, Эпоха, 2015, с. 217–221.
- Малкова Г.В., Садуртдинов М.Р., Скворцов А.Г., Царев А.М.** Температурный режим верхних горизонтов пород в нарушенных и ненарушенных криогенных ландшафтах Европейского Севера // Материалы Пятой конф. геокриологов России (Москва, 14–17 июня 2016 г.). М., Унив. книга, 2016, т. 2, с. 63–69.
- Омельяненко А.В.** Научно-методические основы георадиолокации мерзлых горных пород: Дис. ... д-ра техн. наук. Якутск, 2001, 359 с.
- Павлов А.В.** Мониторинг криолитозоны / А.В. Павлов. Новосибирск, Академ. изд-во “Гео”, 2008, 229 с.
- Павлов А.В., Малкова Г.В.** Мелкомасштабное картографирование трендов современных изменений температуры грунтов на севере России // Криосфера Земли, 2009, т. XIII, № 4, с. 32–39.
- Садуртдинов М.Р., Малкова Г.В., Скворцов А.Г., Судакова М.С., Царев А.М.** Современное состояние островной мерзлоты в пойме реки Печора (Ненецкий автономный округ) по результатам комплексных геокриологических и геофизических исследований // Материалы Пятой конф. геокриологов России (Москва, 14–17 июня 2016 г.). М., Унив. книга, 2016, т. 1, с. 340–345.
- Садуртдинов М.Р., Скворцов А.Г., Царев А.М., Малкова Г.В.** Изучение геокриологических условий острова Кашин в дельте Печоры с помощью сейсмических методов // Десятая Междунар. конф. по мерзлотоведению (TICOP): Ресурсы и риски регионов с вечной мерзлотой в меняющемся мире. Тюмень, Печатник, 2012, т. 5, с. 273–274.

- Садуртдинов М.Р., Царев А.М., Скворцов А.Г., Судакова М.С., Слагода Е.А., Дубровин В.А.** Геофизические методы изучения инженерно-геокриологических условий на стационаре Марре-Сале (Ямал) в зимний период // Тр. Междунар. конф. "Арктика, Субарктика: мозаичность, контрастность, вариативность криосферы" / Под ред. В.П. Мельникова, Д.С. Дроздова. Тюмень, Эпоха, 2015, с. 333–337.
- Старовойтов А.В.** Интерпретация георадиолокационных данных / А.В. Старовойтов. М., Изд-во Моск. ун-та, 2008, 191 с.
- Финкельштейн М.И.** Применение радиолокационного под-поверхностного зондирования в инженерной геологии / М.И. Финкельштейн, В.А. Кутев, В.П. Золотарев. М., Недра, 1986, 128 с.
- Хаттон Л.** Обработка сейсмических данных. Теория и практика: Пер. с англ. / Л. Хаттон, М. Уэрингтон, Дж. Мейкин. М., Мир, 1989, 216 с.
- Annan A.P.** Ground penetrating radar workshop notes / A.P. Annan. Ontario, Canada, Sensors and Software Inc., 2001, 192 p.
- Arcone S.A., Lawson D.E., Delaney A.J., Strasser J.C., Strasser J.D.** Ground-penetrating radar reflection profiling of groundwater and bedrock in an area of discontinuous permafrost // *Geophysics*, 1998, vol. 63, No. 5, p. 1573–1584.
- Brosten T.R., Bradford J.H., McNamara J.P., Gooseff M.N., Zarnetske J.P., Bowden W.B., Johnston M.E.** Estimating 3D variation in active-layer thickness beneath arctic streams using ground-penetrating radar // *J. Hydrology*, 2009, vol. 373, p. 479–486.
- Davis J.L., Annan A.P.** Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy // *Geophys. Prospecting*, 1989, vol. 37, p. 531–551.
- Ground penetrating radar theory and applications** / Ed. by H.M. Jol. N.Y. etc., Elsevier, 2009, 523 p.
- Hinkel K.M., Doolittle J.A., Bockheim J.G., Nelson F.E., Paetzold R., Kimble J.M., Travis R.** Detection of subsurface permafrost features with groundpenetrating radar, Barrow, Alaska // *Permafrost and Periglacial Processes*, 2001, vol. 12, p. 179–190.
- Near-Surface Geophysics** / Ed. by D.K. Butler. Tulsa, Oklahoma, USA, Soc. Exploration Geophys., 2005, 732 p.
- Schwamborn G.J., Dix J.K., Bull J.M., Rachold V.** High-resolution seismic and ground penetrating radar-geophysical profiling of a thermokarst lake in the western Lena Delta, Northern Siberia // *Permafrost and Periglacial Processes*, 2002, vol. 1, p. 259–269.
- Shean D.E., Marchant D.R.** Seismic and GPR surveys of Mullins Glacier, McMurdo Dry Valleys, Antarctica: ice thickness, internal structure and implications for surface ridge formation // *J. Glaciology*, 2010, vol. 56, No. 195, p. 48–64.
- Topp G.C., Davis J.L., Annan A.P.** Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines // *Water Resource Res.*, 1980, vol. 16, p. 574–582.
- Yilmaz O.** Seismic data analysis: processing, inversion, and interpretation of seismic data // *Investigations in Geophysics*, Tulsa, USA, Soc. Exploration Geophys., 2001, vol. 1–2, No. 10, 2027 p.

*Поступила в редакцию
30 сентября 2016 г.*